

Редакционная коллегия:

Президент РУО АИН РФ, д-р техн. наук,
проф. **В.Г.Лисиенко** – научный редактор (УГТУ);
д-р техн. наук, проф. **Б.Н.Парсункин** – главный редактор (МГТУ);
канд. техн. наук, зав. кафедрой ПКисУ МГТУ **С.М.Андреев**;
канд. техн. наук, доц. **М.Ю.Рябчиков** – отв. секретарь (МГТУ);
ст. преп. **Е.Ю.Мухина** – секретарь (МГТУ)

Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: Межвуз. сб. научн. тр. / Под ред. Б.Н. Парсункина. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 198 с.

Межвузовский сборник научных трудов содержит публикации по результатам исследований специалистами ряда вузов и предприятий Российской Федерации.

Рассмотрены результаты теоретических разработок и практического применения современных управляющих технических средств при управлении процессами металлургического производства.

Предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников предприятий металлургической промышленности, эксплуатирующих системы автоматики. Может быть полезен студентам старших курсов соответствующих специальностей.

УДК 669.02/09-52

© ГОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова, 2009

Вступительное слово главного редактора

Использование современных микропроцессорных технических средств управления технологическими процессами в металлургии позволяет успешно решать экономические проблемы, возникшие в связи с недостаточным уровнем оснащения промышленных агрегатов современными средствами автоматизации. Причиной этому является существование известных трудностей со сбытом отечественной металлургической продукции на мировом и внутреннем рынках, обострившихся в течение последнего года.

Низкая производительность труда и значительные энергетические затраты существенно снижают конкурентоспособность товарной продукции. Поэтому решение задач ускорения автоматизации металлургического производства, внедрения и развития новых информационных систем диспетчерского управления (SCADA) является весьма актуальной проблемой.

Представленные в данном сборнике работы освещают практически все основные переделы металлургического производства и обеспечивают решение научно-практических задач контроля и управления технологическими процессами на основе разработки более совершенных алгоритмов управления. Большое внимание уделено применению искусственных нейронных сетей и аппарата нечеткой логики в задачах управления и создания моделей технологических процессов.

В данном сборнике приведены результаты исследований, оперативно дающих ощутимые результаты без значительных затрат с использованием ограниченных резервов.

Межвузовский сборник посвящен 75 – летию Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова и 35 – летию кафедры промышленной кибернетики и систем управления (ПКиСУ).

Редакционная коллегия сборника благодарит всех авторов за предоставленные к публикации материалы и надеется на дальнейшее сотрудничество.

*Д-р техн. наук,
профессор*

Б.Н. Парсункин

УДК 658.512:681.3:669.162

**В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова,
А.В. Сучков, А.В. Огаров**

ГОУ ВПО «Уральский государственный технический
университет – УПИ имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Многие энергетические и энерготехнологические агрегаты представляют собой сложные многомерные объекты управления с большим количеством параметров состояния и управляющих воздействий [1]. Как отмечалось, именно к таким объектам относятся доменные печи. Доменный процесс представляет собой совокупность явлений газодинамики, движения шихты, теплообмена, восстановления, размягчения и др., которые могут рассматриваться как независимые подсистемы, так как характеризуют различные стороны доменного процесса и описываются различными уравнениями. Однако все эти подсистемы тесно связаны между собой и оказывают друг на друга взаимное влияние.

Современные требования к качеству продукции, экономии энергии и материальных ресурсов, охране окружающей среды предъявляют все новые требования к системам автоматического и автоматизированного управления (в том числе и к экспертным системам управления) этими сложными процессами, которые, таким образом, находятся в постоянном развитии [1]. Совершенствование вычислительной техники и появление персональных компьютеров нового поколения, имеющих богатейшее программное обеспечение, развитие теории моделирования и численных методов решения уравнений способствуют появлению возможности реализации с использованием системного подхода сложных, полных, а потому весьма точных и содержательных математических моделей доменных печей. Вместе с этим непрерывно совершенствуются и базы знаний экспертных систем управления, которые включают математические модели, лежащие в основе процессов управления, при этом значительное внимание уделяется детерминированной компоненте этих моделей.

С нашей точки зрения, первым шагом на пути управления такими сложными объектами, как доменная печь, является построение экспертной системы с использованием логических моделей [1]. Данная разработка проводилась в содружестве с коллективами Института машиноведения Уральского отделения РАН, УГТУ–УПИ, Московского института стали и сплавов, Регионального уральского отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова и в настоящее время закреплена патентом на изобретение [2].

Задачей данной экспертной системы является обеспечение выдачи достоверной информации оператору для управления объектом – доменной печью в реальном времени и удешевление стоимости экспертной системы за счет применения доступной вычислительной техники в виде, например, персональных компьютеров [1, 2].

Указанная задача решается за счет того, что экспертная система, реализующая на подготовительном этапе сбор и обработку информации об объекте – доменной печи, обеспечивает в реальном времени пошаговый прогноз – совет оператору о необходимых действиях (изменениях управляющих воздействий) по выводу выходных параметров доменной печи (производительность, содержание кремния в чугуне, температура колошника, перепад давления по высоте печи, содержание двуокиси углерода в колошниковом газе и др.) от некоторого отклоненного от нормального состояния («норма») – т.е. «больше» или «меньше» нормы – к нормальному состоянию «норма». Таким образом, в данном способе для характеристики состояния объекта используют троичную логику с признаками состояний: «норма» (=), «больше» (>), «меньше» (<). При этом нормальным состоянием объекта – доменной печи – считают состояние, определяемое технологическими инструкциями, опытом работы и математическим описанием и моделированием процессов, реализующее поддержание выходных параметров доменной печи на требуемом уровне для обеспечения требуемой производительности и качества чугуна при минимальном расходе кокса и других топливных добавок, энергоносителей и материалов и обеспечивающее нормальный (безаварийный) ход доменной печи. Любые отклонения от нормального состояния («норма») в большую («больше») или меньшую («меньше») сторону, выходящие за пределы допустимой погрешности измерений (1 – 3%), считают отклонениями от нормального состояния и требуют соответствующего изменения входных управляющих параметров

доменной печи. Изменение управляющих параметров также определяют в рамках троичной логики значениями «норма», «больше» или «меньше» нормы, а их выбор определяют на основании технологических инструкций, опыта работы и математического описания и моделирования процессов в доменной печи.

При этом на основании технологической инструкции, опыта работы и данных математического моделирования формируется, так называемая, стратегическая логическая поведенческая модель печи в виде определенного множества пар «состояние – управление» доменной печи, при этом «состояние» определяется выходными параметрами состояния, а «управление» – управляющими воздействиями и, в частности, отклонениями выходных параметров и управляющих воздействий от состояния «норма».

Используя указанное множество пар, логическое вычислительное устройство, построенное в виде таблиц или композиции блоков, устанавливает качественные зависимости между выходными параметрами и управляющими воздействиями печи в виде знака отклонения от нормы выходного параметра («больше» или «меньше») и соответствующего этому знаку знака («больше» или «меньше») управляющего воздействия. Кроме того, задается последовательность изменения управляющих воздействий на каждом устанавливаемом шаге управления для приведения к норме выходных параметров. На основании действий данного логического вычислителя в зависимости от состояния печи и формируется совет мастеру-технологу о способе и порядке использования управляющих воздействий. В частности, на каждом шаге управления формируется прогноз поведения печи и ее перехода в следующее состояние, и этот процесс продолжается вплоть до предсказанного установления всех выходных параметров в положение «норма».

Примером и наглядным отражением указанных принципов прогноза является стратегическая логическая модель доменной печи, представленная в виде табл. 1 [1, 2]. Аналогичные модели могут представляться в виде системы блоков с соответствующими связями.

В табл. 1 приняты следующие обозначения [1, 2]: $m_j U_j$ – выходные параметры; $n_i U_i$ – управляющие воздействия; r – ранги воздействий; P – производительность печи; S_i – содержание кремния в чугуне; T_k – температура колошника; Δp – общий перепад давления; CO_2 – содержание CO_2 в колош-

никовом газе; W_k – влажность кокса; V_d – расход дутья; W_d – влажность дутья; T_d – температура дутья; O_{2d} – содержание кислорода в дутье; $ПГ_d$ – расход природного газа или других топливных добавок; R_H – рудная нагрузка; E_d – кинетическая энергия дутья; А и В – типы загрузки, соответственно прямой (РРКК) и обратной (ККРР); $У_3$ – уровень засыпи; * – регулирующие воздействия сверху, их воздействие на низ печи достигается через 5-6 часов после нанесения воздействия; $^{*2} - W_k$ – влажность кокса здесь рассматривается как помеха (возмущающее воздействие); $^{*3} - E_d$ – комплексный показатель, определяемый диаметром фурмы и расходом дутья. Изменение диаметра фурмы возможно лишь в ремонтный период печи.

Таблица 1 – Таблица соответствия выходных параметров и управляющих воздействий

$m_j U_j$ $n_i U_i$	P	r	Si	r	t_k	r	Δp	r	CO ₂	r	W_k^{*2}	r
V_d	-	1	+	8	-	7	-	1	+	5	-	6
W_d	-	5	+	1	-	6	+	5	-	6	-	2
t_d	-	4	-	2	+	9	-	7	-	7	+	3
O_{2d}	-	2	+	4	-	1	+	3	+	10	-	4
$ПГ_d$	+	6	-	3	-	3	-	2	-	9	+	5
R_H	-	3	+	5	+	2	-	4	+	1	-	1
E_d^{*3}	-	10	-	10	+	10	+	10	-	8	+	10
A	-	7	+	6	+	4	-	8	+	2	-	7
B	+	8	-	7	-	5	+	9	-	3	+	8
$У_3$	+	9	-	9	-	8	+	6	+	4	+	9

Отметим, что построение этой таблицы, выбор управляющих воздействий, возмущающих воздействий и выходных параметров зависит от типа печи, вида выплавляемых чугунов, наличия тех или иных средств инжекции топлива и подачи кислорода и т.д. Основой построения таблицы является технологическая инструкция, теоретические и модельные представления о процессе и опыт экспертов. Данная таблица приведена лишь в качестве возможного варианта.

Построение данной таблицы и функционирование на ее основании экспертной системы находятся в соответствии с тео-

рией дискретных автоматов, основой которой, как известно, являются наличие дискретного множества внутренних состояний и свойства скачкообразного перехода (в рамках определенного промежутка времени – интервала дискретного автомата) из одного состояния в другое [3].

При этом принято для таблиц переходов и выходов строки таблиц обозначать входными сигналами автомата, а столбцы – его состояниями. В нашем случае входными сигналами являются управляющие воздействия, а параметрами состояния автомата – выходные параметры состояния доменной печи.

Приведенная в качестве примера таблица (табл. 1), в частности, включает 6 важнейших выходных параметров доменной печи (производительность, содержание кремния в чугуне, температура колошника, перепад давления по высоте печи, содержание двуокси углерода в колошниковом газе, влажность кокса) и 10 управляющих воздействий (расход дутья, влажность дутья, температура дутья, содержание кислорода в дутье, расход природного газа, рудная нагрузка, кинетическая энергия дутья, типы загрузки шихты, уровень засыпи) и устанавливает в рамках троичной логики соответствие каждому из трех состояний выходных параметров (\Leftrightarrow) определенного (для приведения в нормальное состояние – «норму») значения управляющих воздействий: прямого, соответствующего изменению выходных параметров (\Leftrightarrow), или обратного, соответствующего обратному состоянию управляющих воздействий (\Rightarrow). При этом, естественно, значение «норма» (\equiv) выходного параметра соответствует значению «норма» управляющего воздействия. В таблице прямые воздействия отражены знаком (+), обратные – знаком (-).

Кроме того, таблица соответствия устанавливает ранжирование для каждого изменения выходного параметра соответствующих управляющих воздействий. Номер ранга (место по значимости воздействия) при этом определяется как оптимальный из совокупности двух факторов – наибольшей степени значимости влияния данного управляющего воздействия на соответствующий выходной параметр и наименьшей степени влияния на все другие выходные параметры, кроме рассматриваемого, то есть наибольшей степени кумулятивности (избирательности) данного управляющего воздействия.

В результате был предложен способ управления энерго-технологическим агрегатом (доменной печью), в основе которого лежит табличный метод реализации стратегических целей экспертной системы. Преимуществом рассматриваемого способа

является повышение оперативности управления доменной печью, обеспечение выдачи совета оператору в реальном времени и, как следствие, снижение расхода кокса и предотвращение расстройств и аварийных состояний хода доменных печей. Разработанные логические модели в виде таблиц соответствия выходных параметров и управляющих воздействий вошли в состав базы знаний логической экспертной системы доменной печи, которая, в свою очередь, явилась основой для построения тренажера – экспертной системы-советчика по управлению ходом доменной печи [4].

Следующим шагом развития модельной поддержки экспертных систем является дополнение логических экспертных систем количественными соотношениями по принципам, изложенным ниже.

В качестве первого шага для построения количественных моделей для управления доменным процессом предлагается использовать теорию и модели теплового состояния доменной печи в разработке научной школы Б.И. Китаева. Как известно, в рамках этой теории проводится зональный анализ теплового состояния доменной печи автономно для «верха» – верхней зоны – шахты и «низа» – нижней зоны – горна доменной печи (в дальнейшем условно применяются термины «верх» и «низ» доменной печи) [1, 5 – 10]. В дальнейшем могут быть использованы также более детализированные модели доменного процесса, такие как модели ВНИИМТ [11], балансовая логико-статистическая модель института металлургии УрО РАН [12], модель УГТУ – УПИ [13].

При этом в соответствии с принятым в ЛКЭС основным постулатом «отклонения от нормы» и с учетом требований технологической инструкции количественные модели нами предлагается также использовать в дискретной форме - в виде отклонений, но уже не только в виде качественных («больше», «меньше»), но и в виде количественных соотношений.

На первом этапе предлагается построить количественные модели управления с компенсацией по возмущению (инвариантная система) и по отклонению с определением количественных отклонений параметров состояния и управляющих воздействий от «нормы» в виде конечно-разностных – дискретных значений соответственно Δu_i и Δx_i . Естественно, что на первом шаге будут использоваться квазистатические соотношения, а динамические переходные процессы могут составлять предмет соответствующего совета в виде предсказаний времени переходного

процесса, времени запаздывания и постоянной времени $\tau_{3АП}$ и T – соответственно (подробнее см. гл. 8 [1]).

В частности, для низа печи управляющие воздействия часто принимаются как «быстрые», в то время как для воздействий сверху дается определение «медленных» со временем запаздывания $\tau_{3АП} = 5 - 6$ ч и постоянными времени в пределах $T = 6 - 12$ ч.

Количественные модели с компенсацией по возмущению нами предлагается использовать в двух вариантах – в виде модели эквивалентного сохранения и модели критериального отклонения.

Модель эквивалентного сохранения включает отклонения от нормы управляющих воздействий, которые обеспечивают сохранение уровня важнейших критериев теплового состояния для верха и низа печи. Такими критериями приняты индексы верха i_B и низа i_H доменной печи (подробнее см. гл. 4 [1]).

В предложенном в работе [1] алгоритме количественных моделей управления с компенсацией по возмущению и по отклонению предлагается для заданных условий работы доменной печи заранее (на основании принятых критериев и полных моделей с учетом особенностей работы печей, которые в данном случае выполняют роль имитационно-оптимизирующего уровня) определять степень воздействия управляющих воздействий на критерии (индексы) теплового состояния верха и низа печи и приводить в модели их дискретное изменение в соотношении с эквивалентными дискретными величинами других управляющих воздействий, необходимых для поддержания критериев состояния на постоянном (заданном) уровне (норма).

Именно такого рода модели на первом этапе и могут служить в качестве моделей реального времени для верхнего уровня управления тепловой работой доменной печи.

Для количественных моделей первого типа (моделей эквивалентного сохранения) подобный алгоритм может быть выражен в виде компенсационного уравнения (компенсация по возмущению), связывающего все отклонения управляющих и возмущающих воздействий и приводящего их к эквивалентному (по воздействию на определенный критерий) значению.

Для моделей второго типа (моделей критериального отклонения) применяется в качестве исходного дискретное отклонение от нуля определяющего индекса или другого определяющего параметра состояния. Модели второго типа обеспечивают

управление доменной печью по отклонению определяющих параметров.

Таким образом, разработка количественных управляющих воздействий на ход доменной плавки предусматривает оценку теплообменных, восстановительных и газодинамических процессов, их стабилизацию или изменение в необходимых пределах [1]. Комплексность воздействия различных параметров на ход доменной печи позволяет решать вопросы экономичности плавки, возможности изменения ее интенсивности и управления протеканием процессов как автономно для верха и низа доменной печи, так и во всем ее объеме.

Исходные положения и характеристики количественных моделей, изложенные выше, легли в основу разработки способа связанного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь [14] (подробнее см. гл. 10 [1]). Преимуществом данного способа управления доменной печью является управление основными энергоносителями – управляющими воздействиями доменной печи в автоматическом режиме без непосредственного участия оператора, что повышает точность и надежность управления, исключает возможность субъективных ошибок. Кроме того, уставки регуляторам соотношений определяются из условий эффективной работы одновременно как верха, так и низа доменной печи. Это в результате приводит к снижению расходов основных энергоносителей – кокса, природного газа (топливных добавок) и кислорода и обеспечивает протекание ровного хода доменной печи. С нашей точки зрения, способ управления доменной печью и алгоритмы, описанные в [1, 14], являются своеобразным предвестником управления сложным объектом – доменной печью не только в режиме советчика, но и с использованием замкнутых контуров управления и контроля.

Опыт построения логико-количественных экспертных систем (ЛКЭС) для управления доменной печью может быть использован для управления такими энерго-экологоэффективными процессами в металлургии, как процессы прямого легирования стали и сплавов. В первую очередь это касается прямого легирования стали ванадием, выплавки ферроникеля из бедных окисленных никелевых руд (соответственно процессы ЛП-В и ЛП-Н, разработки УГТУ – УПИ и других организаций), прямого легирования марганцем (разработки под руководством В.П. Лякишева). Актуальность указанных разработок обусловлена дороговизной кокса, а главное, трудностями реализации получения высоколегированных сталей и сплавов в переделах с

использованием кокса. При этом был учтен опыт, накопленный при создании конструкторов экспертных систем и тренажеров мастера доменной печи и процесса ПЖВ – агрегата РОМЕЛТ на основе логического моделирования и законов нечеткой логики [1]. Результатами исследований стали: моделирование представления знаний в логико-количественных экспертных системах управления доменным и альтернативными бескоксowymi процессами в металлургии [15]; разработка информационного обеспечения, в том числе баз данных, алгоритмического и программного обеспечения ЛКЭС для управления (в режиме советчика) энерго-экологоэф-фективными (в том числе бескоксowymi) процессами [16, 17]; использование когнитивного моделирования и технологий инженерии знаний при разработке логико-количественных экспертных систем [18, 19].

Одним из направлений дальнейшего развития ЛКЭС явилось ее дополнение экспертной системой оценки профессиональной подготовки персонала (разработка АИН совместно с МИСиС под руководством В.Г.Лисиенко при участии А.В.Сучкова) [20]. С этой целью разработана программа и сформирована база данных для оценки профессиональных знаний персонала в области доменного производства. Проведен анализ математических моделей процессов в доменной печи для оценки возможности их использования при выработке рекомендаций для ЛКЭС. Проведен опрос ряда экспертов.

В настоящее время система подготовлена к апробированию применительно к виртуальному объекту – математической модели теплового баланса и газодинамики доменной печи. Планируется проведение тестовых испытаний ЛКЭС с использованием математической модели для доменного производства, в том числе с использованием титаномагнетитовых ванадийсодержащих руд. В целом использование ЛКЭС совместно с математическими моделями технологических объектов обуславливает более широкие возможности по тестированию системы и экономии времени на этапе разработки. В процессе обучения и проверки знаний персонала также предполагается использование тренажеров на базе ЛКЭС.

Результатом описанных выше разработок (систем-советчиков, систем поддержки принятия решений) являлась задача рекомендации лицу, принимающему решения. При этом практически не реализованным оставалось использование детерминированных математических моделей в качестве советчика в реальном программном варианте, что существенно позво-

лило бы расширить возможности экспертной системы: если программа сможет формировать оптимальные рекомендации по управлению во всех ситуациях, станет возможной передача функции принятия решений технике, с сохранением контроля со стороны человека.

На следующем этапе для поддержки принятия решений была разработана программа-советчик мастера доменной печи, использующая детерминированную модель, на основе которой формируются рекомендации в количественной форме по значениям управляющих воздействий для достижения требуемых выходных параметров и параметров состояния [21]. Для использования советчика необходимо: 1) задать требуемые интервалы значений выходных величин – расхода кокса, расхода дутья, температуры колошникового газа, температуры фурменного очага; 2) выбрать управляющие воздействия из набора, в котором на данный момент присутствуют параметры дутья, количество различных вдуваемых в горн углеродсодержащих веществ; 3) задать диапазоны изменения этих параметров, задать количество точек, которое будет просчитываться при моделировании (от этого зависит точность и время вычислений).

Первоначально для создания советчика была использована существующая балансовая модель печи, разработанная в Институте металлургии УрО РАН, в основе которой лежат следующие предпосылки [22]. Теплообмен в доменной печи завершен, т.е. на определенной части высоты существует малый перепад температур между газом и шихтой. В определенной зоне печи на стадии восстановления магнетита (Fe_3O_4) реакция восстановления вюстита (FeO) стремится к термодинамическому равновесию. Здесь реализуется так называемое зональное восстановление, когда восстановление различных оксидов железа совмещается по времени. Решение системы уравнений для нижней зоны, представленной условием термодинамического равновесия, а именно константой равновесия реакции восстановления FeO оксидом углерода, материальным и тепловым балансами, дополненной уравнением теплового баланса для верхней зоны, позволяет рассчитать основные показатели доменной плавки. Определенные таким образом показатели являются предельно достижимыми (минимальными) при данных параметрах шихты и дутья. Использование фактических степеней использования газа позволяет определить фактические показатели доменной плавки. В качестве добавок к дутью могут использоваться, кроме природного газа, мазут, угольная пыль,

восстановительный газ. Имеется возможность анализа работы доменной печи с использованием новых видов сырья, металлизированного и частично восстановленного, а также высокопотенциального тепла.

Результатом работы программы-советчика явились несколько наборов управляющих параметров, каждый из которых может быть использован для достижения нужных параметров плавки. На рис. 1 приведен пример результата, полученного при использовании советчика. Видно, что очень близкие выходные результаты могут быть достигнуты различными наборами входных параметров. Например, следующие наборы дают близкие результаты: 1) расход природного газа 92 м³/т чугуна; температура дутья 1190 °С; содержание кислорода в дутье 21%; расход дутья 1450 м³/т чугуна; 2) расход природного газа 100 м³/т чугуна; температура дутья 1160 °С; содержание кислорода в дутье 24,5%; расход дутья 1300 м³/т чугуна.

Исходя из технических возможностей оборудования печи может быть выбран первый или второй набор из данного примера. В случае, когда возможны оба варианта (или несколько, в более общем случае), мастер может исходить из экономической выгоды (минимизация использования более дорогого сырья).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Пр. газ(м ³ /т)	Т дутья(°С)	CO ₂ в дутье(%)	Дутье(м ³ /т ч.)			Кокс(кг/т ч)	Т фурм. о. Si в чугу(°)	Производ.	Шлак(кг/т ч)	Т коп. газа(°С)			
2	80	1100	21,0	1501			602	1957	0,5	3700	352	311		← Базовый вариант
3	92	1190	21,0	1457			484	1976	0,3	3500	357	309		
4	94	1200	22,2	1387			484	2012	0,3	3500	357	295		
5	96	1180	21,8	1422			484	1982	0,3	3500	357	303		
6	98	1180	23,4	1341			485	2024	0,3	3500	357	287		
7	100	1130	22,3	1428			488	1959	0,3	3500	358	306		
8	100	1160	24,5	1301			488	2039	0,3	3500	358	278		
9														

Рисунок 1 – Пример результата работы программы-советчика

В дальнейшем вышеописанная математическая модель и программа, реализующая эту модель, были усовершенствованы.

Для оценки теплового состояния верхней и нижней зоны доменной печи Б.И. Китаевым и другими представителями уральской школы металлургов (УПИ) были введены безразмерные индексы верха и низа печи. Алгоритмы и программное обеспечение расчета этих индексов было решено состыковать с математической моделью УрО РАН с целью прогнозируемой количественной оценки теплового состояния верха и низа доменной печи.

Согласно теории теплофизики доменного процесса [10], в рамках которой были введены индексы теплового состояния,

весь рабочий объем печи делится на верхнюю и нижнюю тепловые зоны. За условную границу между этими зонами выбраны изотермические поверхности с температурами газа t_0 и шихтовых материалов $t_{ш0}$, которые характеризуют начало заметного развития эндотермической реакции восстановления двуокиси углерода. Значения этих опорных величин определяются конкретными условиями работы печи и при выплавке передельного чугуна с использованием комбинированного дутья лежат обычно в пределах 850-950 °С.

В результате дополнения модели блоками для расчета индексов, стало возможным оценить тепловое состояние печи, в частности, являются ли затраты тепла оптимальными для достижения заданных показателей работы печи. Так как советчик мастера основан на усовершенствованной модели, то индексы можно использовать для формирования рекомендаций. При этом значения индексов являются выходными параметрами в советчике, соответственно можно найти только такие наборы управляющих параметров, которые будут оптимальны с точки зрения затрат тепла и производительности.

Значения индексов, оптимальные по [10]: $i_b = 0,65$; $i_n = 1$. При значении индекса верха, близком к указанному, обеспечивается наилучшая производительность печи, при указанном значении индекса низа – оптимальные затраты тепла в нижней зоне (из [10]).

Аналогично, может быть получено несколько наборов управляющих параметров, соответствующих данным значениям индексов, из которых можно выделить самый подходящий, исходя из текущей производственной ситуации.

Программа-советчик была дополнена индексами верха и низа печи в качестве выходных параметров (рис. 2). Это позволило задавать рекомендуемые в [10] оптимальные значения индексов. Также в программу, реализующую математическую модель, была добавлена возможность построения графиков зависимостей выходной величины от входной. В частности, после расчета индексов верха и низа (см. рис. 2), можно построить соответствующие графики (рис. 3, 4).

Отдельные значения индексов верха и низа печи хорошо согласуются с расчетными и практическими данными в [10], т.е. рассчитанные значения индексов близки к оптимальным. Однако полученные зависимости индексов от производительности и содержания кремния очень мало изменяются, они близки к оптимальным значениям.

Это объясняется принципами, положенными в основу балансовой модели, разработанной в Институте металлургии УРО РАН. В ней определяются предельно достижимые показатели доменной плавки при заданных параметрах шихты и дутья, поскольку используются равновесные степени использования газов CO и H₂. Таким образом, рассчитываемая в ней совокупность показателей является близкой к оптимальной с точки зрения затрат тепла и энергии, что обуславливает также близость индексов низа и верха к оптимальным значениям и их слабое изменение.

Это обстоятельство позволяет управлять процессом плавки с использованием данных об индексах теплового состояния. Используя программу «Советчик мастера доменной печи», можно задать оптимальные значения индексов верха и низа и диапазоны изменения входных параметров, при этом получается результат в виде различных вариантов управляющих параметров, которые позволяют достичь заданных результатов. Затем из полученных наборов можно выделить (ранжировать) самые подходящие, исходя из текущей производственной ситуации.

Входные величины	Базовое значение	Новое значение
Природный газ, м ³ /т чугуна	65	Не меняется
Угольная пыль, кг/т чугуна	0	Не меняется
Основность шлака CaO/SiO ₂ , ед	1,25	Не меняется
Температура дутья, С	916	Диапазон 900 - 1100
Кислород в дутье, %	21	Не меняется
Влага в дутье, г/м ³	7,7	Не меняется
Железо в шихте, %	59,2	Диапазон 50 - 65
Расход дутья, м ³ /т чугуна	1700	Диапазон 1400 - 1700

Выходные величины	Значение
<input checked="" type="checkbox"/> Расход кокса, кг/т чугуна	
<input checked="" type="checkbox"/> Минимизация расхода кокса	
<input type="checkbox"/> Температура фурменного очага, С	
<input type="checkbox"/> Кремний в чугуне, %	0,27
<input type="checkbox"/> Производительность, т/сутки	
<input checked="" type="checkbox"/> Индекс верха	0,65
<input checked="" type="checkbox"/> Индекс низа	1

Режим: Подбор управляющих величин

Рисунок 2 – Советчик мастера доменной печи (главное окно)

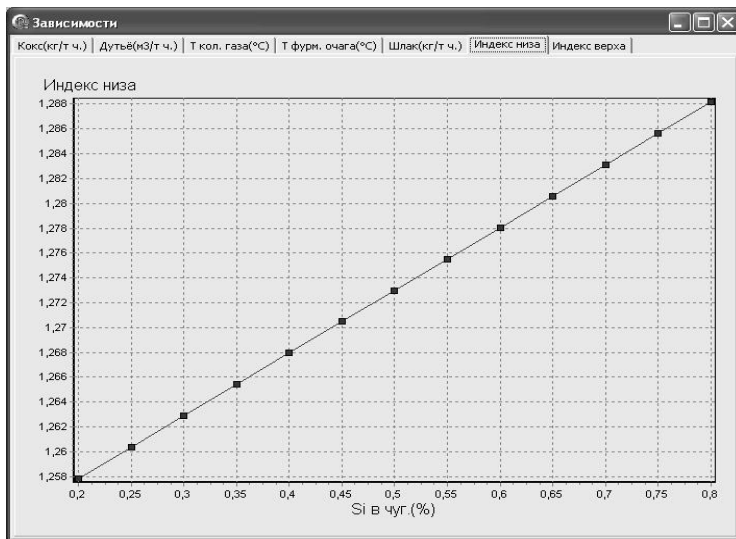


Рисунок 3 – Зависимость индекса низа от содержания кремния в чугуне

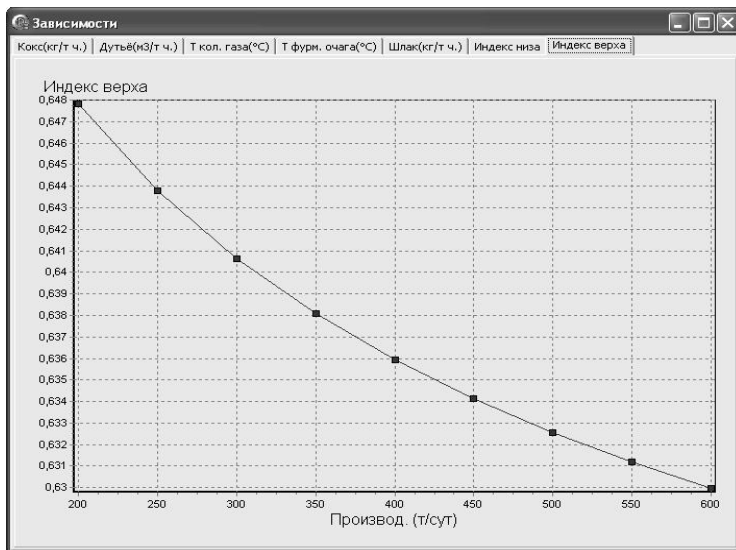


Рисунок 4 – Зависимость индекса верха от производительности печи

Дальнейшее развитие модельной поддержки экспертных систем управления энергонасыщенными объектами связано с внедрением программы «Советчик мастера доменной печи» на доменных печах. Такой опыт уже имеется на примере Чусовского металлургического завода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие трехуровневых АСУ ТП в металлургии (коксовые и бескоксовые процессы): Учебное пособие / В.Г. Лисиенко, Е.Л. Суханов, В.А. Морозова, А.Н. Дмитриев, С.А. Загайнов, А.Е. Пареньков / Под ред. В.Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2006. 328 с.
2. Пат. 2209837 РФ. Способ управления энерготехнологическим агрегатом – доменной печью / В.Г. Лисиенко, В.П. Чистов, А.Е. Пареньков, В.А. Морозова, И.А. Кононенко, Г.Б. Захарова, В.Г. Титов. № 2001129418; Заявл. 31.10.2001; Опубл. 10.08.2003; Бюл. № 22. Приоритет от 31.10.2001.
3. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов / В.М. Глушков. М.: Физматгиз, 1962. 476 с.
4. Компьютерный тренажер для операторов технологических процессов доменного производства / В.П. Чистов, Г.Б. Захарова, И.А. Кононенко, В.Г. Титов // Программные продукты и системы. 2002. № 3. С. 42 – 45.
5. Китаев Б.И. Управление доменным процессом / Б.И. Китаев. Свердловск: УПИ, 1984. 94 с.
6. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Б.Л. Лазарев. М.: Металлургия, 1996. 355 с.
7. Качественная и количественная оценка воздействий на тепловое состояние шахты доменной печи / В.С. Швыдкий, Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Ю.Н. Овчинников, С.В. Бакин, В.Г. Лисиенко // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 8. С. 28 – 32.
8. Китаев Б.И. Международный симпозиум по вдуванию дополнительного топлива в горн доменной печи. Серия 4. Доменное производство / Б.И. Китаев, Ю.Н. Овчинников, Ю.Г. Ярошенко. М.: УНИИ Информации и технико-экономических исследований черной металлургии, 1972. Вып. 5. 24 с.
9. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ, 1995. 243 с.

10. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий. М.: Metallurgia, 1978. 248 с.
11. Мойкин В.И. Динамические характеристики доменных печей по результатам математического моделирования / В.И. Мойкин, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковиков // Вопросы производства чугуна в доменных печах. М.: Metallurgia, 1984. С. 46 – 52; Повышение производительности и экономичности работы тепловых металлургических агрегатов. М.: Metallurgia, 1982. С. 42 – 46; Металлургическая теплотехника: Межвузовский сб. М.: Metallurgia, 1979. С. 39 – 46; // Сталь. 1984. № 4. С. 9 – 14.
12. Ченцов А.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / А.В. Ченцов, Б.А. Чесноков, С.В. Шаврин. М.: Наука, 1991. 92 с.
13. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей / С.А. Загайнов, О.П. Онорин, Л.Ю. Гилева, Д.Н. Волков, Б.С. Тлеугобулов // Сталь. 2000. № 9. С. 12–14.
14. Пат. 2205228 РФ. Способ связанного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь / В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Овчинников, Н.А. Спиринов, В.А. Морозова, Е.Л. Суханов. № 2001121126; Заявл. 26.07.2001; Оpubл. 27.05.2003; Бюл. № 15. Приоритет от 26.07.2001.
15. Морозова В.А. Моделирование представления знаний в логико-количественных экспертных системах управления доменным и альтернативными бескоксowymi процессами в металлургии / В.А. Морозова, В.Г. Лисиенко, А.В. Сучков, А.Е. Пареньков // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2007» в рамках 4^{го} Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007». Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2007. С. 59–62.
16. Лисиенко В.Г. Разработка информационного обеспечения ЛКЭС для управления (в режиме советчика) энергоэкологоэффективными (в том числе бескоксowymi) процессами в металлургии и оценка их энергоэкологоэффективности / В.Г. Лисиенко, Н.В. Соловьева, О.Г. Трофимова, В.А. Морозова // Актуальные проблемы энергетики: Материалы III Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 21 – 23 ноября 2007 г. Екатеринбург: Изд-во «ИРА УТК», 2007. С. 390 – 392.

17. Лисиенко В.Г. Разработка баз данных, алгоритмического и программного обеспечения ЛКЭС для управления (в режиме советчика) энерго-экологоэф-фективными (в том числе бескоксовыми) процессами получения высоколегированных сталей и сплавов / В.Г. Лисиенко, Н.В. Соловьева, О.Г. Трофимова, В.А. Морозова // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании: Сборник тезисов докладов Международной научной конференции. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. С. 285 – 287.
18. Морозова В.А. Использование когнитивного моделирования при разработке логико-количественных экспертных систем / В.А. Морозова, В.Г. Лисиенко, А.В. Сучков // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008» в рамках 5^{го} Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2008». Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2008. С. 75 – 78.
19. Морозова В.А. Использование технологий инженерии знаний при разработке логико-количественных экспертных систем / В.А. Морозова, В.Г. Лисиенко, А.В. Сучков // Информационные системы и технологии (ИСТ–2008): материалы Международной научно-технической конференции. Н. Новгород: НГТУ, 2008. С. 141 – 142.
20. Морозова В.А. Развитие логико-количественных экспертных систем для управления (в режиме советчика) энерго-экологоэф-фективными процессами в металлургии в сочетании с экспертной системой оценки профессиональной подготовки персонала / В.А. Морозова, В.Г. Лисиенко, А.В. Сучков, А.Е. Пареньков // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании. Сборник тезисов докладов Международной научной конференции. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. С. 290 – 292.
21. Сучков А.В. Разработка программы-советчика для мастера доменной печи на основе математической модели печи / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании: Сборник тезисов докладов международной научной конференции. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2008. С. 204 – 205.
22. Математическое моделирование двумерных процессов в доменной печи / Дмитриев А.Н. // Вычислительные методы и программирование. 2004. Т. 5. С. 252 – 267.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДОМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В 60х годах прошлого столетия в период интенсивного внедрения аппаратно-программных комплексов в различных отраслях промышленности, неоднократно постулировались мнения, что, в обозримом будущем, управление доменной плавкой будет осуществляться ЭВМ. Подробный обзор и анализ математических моделей доменного процесса в этот период приведен в работе [1]. В СССР и других странах были известные попытки реализовать автоматическое управление доменной плавкой на основе математических моделей (критериальных отношений), окончившиеся неудачно. На основании результатов этих промышленных опытов у многих практиков доменного производства возникла убежденность в бесполезности использования ЭВМ для анализа и управления доменным процессом. Справедливо заметить, что некоторые опубликованные модели давали повод для подобной убежденности, например, в одной из первых моделей М. Хатано [2] в математическом описании заложены различные скорости опускания шихты по радиусу, но графически сход отображался в виде равномерно опускающихся параллельных слоев в соответствии с практическими исследованиями.

Дальнейшее развитие математических моделей доменного процесса и попытки применения их на практике выявили следующие основные моменты, препятствующие созданию аппаратно-программных комплексов управления доменной плавкой:

- недостаточность имеющихся формальных описаний закономерностей происходящих в доменной печи процессов;
- сложность учета взаимного влияния процессов тепло-массообмена, газодинамических, гидравлических, механических и др.;
- различающиеся на порядки скорости протекания процессов различной физической природы;
- недостаточность информационного обеспечения.

По мере увеличения объема знаний о происходящих процессах и совершенствования их математического описания математические модели становились более полными. Применение визуализации результатов расчетов в виде температурно-тепловых полей, опускающихся слоев шихтовых материалов и полей скоростей поднимающихся газов позволило наглядно отразить динамику происходящих процессов, выявились новые значимые области применения «полных» математических моделей – обучения и гносеологическая. В отечественной практике наиболее известны модели различных школ: МИСиС [3 и др.], Рамма А.Н. [4 и др.], Китаева Б.И. (УГТУ-УПИ), ВНИИМТ [5 и др.], УрО РАН [6, 7 и др.]. Все эти модели в той или иной степени полноты учитывают происходящие в доменной печи процессы, позволяют наглядно представить результаты расчетов и обладают одним общим недостатком – без адаптации под конкретные условия доменной печи не позволяют определить точные количественные значения изменений параметров плавки под действием изменения входных факторов (только основных - более 200). Сложность адаптации заключается как взаимосвязью процессов, так и отсутствием возможности получения информации о ряде параметров. Так, например, в практике ОАО «ЧМК» был случай, когда проведение полного факторного анализа, наблюдения за технологией агломерационного, коксохимического и доменного производств в течении продолжительного периода времени не позволило определить причину увеличения колебаний теплового состояния доменных печей. В итоге выявили, что причиной непрогнозируемых колебаний явилось появление в составе кокса фтора, анализ на содержание которого не предусмотрен стандартной методикой. Трудно контролируемые являются изменения профиля печи. Одновременное изменение нескольких условий доменной плавки делает задачу адаптации «полной» математической модели практически несуществимой.

В отличие от «полных» математических моделей в инженерной практике доменного производства достаточно широко используют модели, которые условно можно назвать «локальными», т.е. рассчитанными на решение одной или нескольких тесно связанных задач, например, в области загрузки и распределения шихты [8], прогноза параметров кокса [9] и др. Как правило, данные модели хорошо адаптируются к условиям конкретных агрегатов и результаты расчетов по ним дают возможность

достаточно надежно количественно определить требуемое воздействие.

Совершенствование ЭВМ, широкое внедрение компьютерных сетей в сочетании с разработкой математических методов и алгоритмов обработки информации обусловили возможность создания информационных систем [10], одной из важнейших составляющих которых является человек. Данные системы, как правило, позволяют специалистам оперативно просматривать и сопоставлять динамику изменения важнейших показателей доменной плавки и принимать обоснованные решения. Возможность представления информации при этом ограничивается только наличием данных (сигналов). Наблюдения на ряде металлургических комбинатов России показывают, что это направление в последние годы развивается наиболее динамично и широко поддерживается практиками доменного производства при участии специалистов ведущих научно исследовательских центров и вузов.

Исходя из вышесказанного, следует, что в области доменного производства наиболее эффективно использование математических моделей в соответствии с поставленной задачей:

- для оперативного и наглядного представления информации в процессе управления ходом доменной плавки – информационных систем, в том числе с режимом «Советник мастера доменной печи»;
- для точных текущих инженерных расчетов/прогнозов - локальных моделей, которые, в свою очередь, могут использоваться при создании «полных» математических моделей;
- для исследования общих закономерностей доменного процесса, поиска оптимальных решений в текущих и перспективных условиях и обучения персонала – «полных» математических моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом. / И.Г. Товаровский, Е.И. Райх, К.К. Шкодин, В.А. Улахович - М.: Металлургия, 1978.— 264 с.
2. Математическая модель доменной печи, предполагающая радиальное распределение газовых потоков, теплопередачи и химических реакций./ Хатано М. и др. // “Тецу то хагане”, J.

- Iron and Steel Inst. Jap.”, 1980, 66, №13, 1898-1907. (Пер. С англ., №КГ-74450, Киев.—1981.—31 с.)
3. Похвистнев А.Н., Жилкин Н.К. /Изв.вузов. Черная металлургия, 1959, № 9, с.29-45.
 4. Рамм А.Н. Бюлл. ЦНИИ ЧМ, 1964, № 11 (487), с.12-20.
 5. Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А., Бабушкин Н.М. Математическое описание явлений тепло- и массообмена в доменной печи // Теплотехника доменного и агломерационного процессов: Тр. ВНИИМТ. —Вып.14. —М.: Металлургия.—1966.—С. 5-19.
 6. Дмитриев А.Н., Шаврин С.В. Двумерная математическая модель доменного процесса // Сталь, 1996, № 12. С.7-13.
 7. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. /А.В.Ченцов, Ю.А.Чесноков, С.В.Шаврин — М.:Наука,1991.-92 с.
 8. Исследование особенностей формирования столба шихтовых материалов при использовании бесконусного загрузочного устройства/С.А. Загайнов, В.А. Ситников, С.В. Филатов, Б.С. Тлегобулов, К.Б. Пыхтеева /Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Междунар. науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009г. Екатеринбург:УГТУ-УПИ, 2009.-510с.
 9. Гуляев В.М., Мучник Д.А. Возможная точность прогноза качества механически обработанного кокса //Кокс и химия, 2005, № 6. С.29-32.
 10. Информационные системы в металлургии /Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С.Швыдкий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин. Учебник для вузов. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ,2001.— 617 с.

УДК 622.234.42.001.573

И. А. Каракоцкая
ГОУ ВПО «Уральский государственный
горный университет»

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Скважинное подземное выщелачивание (СПВ) металлов - новое направление в горном деле, находящееся в настоящее время в стадии становления и интенсивного развития. Поэтому

многие аспекты этого весьма сложного, комплексного направления не получили пока достаточного освещения в литературе. По ряду вопросов отсутствует общепринятая терминология и определения, нет четких различий в целях и задачах исследований для разных стадий изучения, оценки и освоения месторождений. Не существует единых представлений о характере и составе информации, необходимой и достаточной для оценки месторождений и обеспечения их эксплуатации [1].

Основная проблема математического моделирования процесса СПВ заключается в том, что задачи управления ресурсами технологического комплекса решаются в условиях неопределенности горно-геологической информации, обусловленной отсутствием достоверной информации о запасах полезном компоненте (ПК), содержании ПК в месторождении, коэффициенте фильтрации и других факторов, определяющих технико-экономические показатели (ТЭП).

Суммируя современные представления [2] о процессе СПВ металлов, можно констатировать, что математическая модель, дающая достаточно полное описание процесса; должна, по меньшей мере, включать следующие взаимосвязанные составные части.

1. Расчет нестационарного трехмерного фильтрационного потока в пористой среде, фильтрационные свойства которой переменны как в пространстве, так и во времени. Изменение фильтрационных свойств связано с наличием на подвижном передовом фронте кислоты зоны осаждения породообразующих компонентов (в форме гидроксидов железа, алюминия и др.). Кроме того, нестационарность потока может быть связана с тем, что плотность фильтрующегося раствора изменяется в ходе процесса.

2. Расчет миграции кислоты и попутных компонентов с учетом химического взаимодействия между ними.

3. Расчет фильтрационных характеристик породы с учетом распределения переосажденных компонентов.

4. Расчет миграции выщелачиваемого ПК с учетом его переотложения на подвижном геохимическом барьере, возникающем в результате расхода кислоты на реакции с породообразующими минералами [3].

Разработка математической модели процесса СПВ в таком виде чрезвычайно трудоемка. В настоящее время известны лишь частичные решения отдельных задач. Однако применение

такой модели также может быть сопряжено с серьезными трудностями. В случае если исходная неоднородность прорабатываемого, блока породы существенно влияет на ход процесса, то возникает проблема информационного обеспечения модели (степень этого влияния можно было бы оценить расчетами по той же модели для нескольких модельных примеров). Ее использование потребует задания во всем объеме блока начальных распределений проницаемости пород и содержаний компонентов, участвующих в процессе. Современные методы изучения месторождений обычно не позволяют получить эту информацию.

Математические модели СПВ, известные в настоящее время, используют ряд упрощающих предположений, основным из которых является принятие фильтрационного потока стационарным и плановым. В фильтрационном отношении пласт предполагается однородным и изотопным в плане.

Одна из моделей [4] представляет собой чисто вычислительную имитационную процедуру, в которой процесс рассматривается для совокупности малых ячеек, составляющих прорабатываемый блок породы. Авторы [4] используют модель для оценки влияния неравномерности на выходные показатели процесса. Однако полученные ими результаты представляются недостаточно обоснованными, так как при расчетах предполагается, что скорость растворения полезного компонента пропорциональна содержанию его растворимых форм в твердой фазе. Это предположение в общем случае не применимо, а для частных случаев требует специального обоснования. Расчеты по предложенной авторами [4] схеме весьма трудоемки.

Перечисленные предположения позволяют разделить задачу моделирования процесса СПВ на три этапа:

1. расчет линий тока, стационарного планового фильтрационного потока;
2. расчет процесса выщелачивания вдоль каждой линии тока;
3. расчет выходной концентрации, в откачных скважинах как результата смешения растворов приходящих в них по отдельным линиям тока. Такой подход к моделированию процесса подземного выщелачивания является в настоящее время общепринятым.

Этот подход не учитывает факторов неопределенности, обусловленных влиянием погрешностей оценки состояния процесса СПВ на величину ТЭП. Потери возникают в процессе от-

работки месторождения методом СПВ из-за несоответствия фактических параметров продуктивного слоя прогнозируемым значениям и запаздывающей реакции системы управления на отклонения фактической производительности по ПК от планового задания, что приводит, в конечном счете, к уменьшению объема добываемого ПК.

Таким образом, разрешение проблем, связанных с моделированием минерально-ресурсного потенциала месторождения, обрабатываемого методом СПВ, в условиях существенной неопределенности, является основным аспектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грабовников В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов. М., Недра, 1983. - С. 120.;
2. Голубев В.С., Кричивец Г.Н. Динамика геотехнологических процессов.- М.: Недра, 1989. 120 с.: ил.
3. Голубев В.С. Динамика геохимических процессов. М., Недра, 1981 - 178с.
4. Bommer, P.M., Schechter, R.S. Mathematical Modelling of in situ uranium leaching. - J. Soc. Petrol Engng., 1979, v. 19, N 6, p. 393-400

УДК 004.942.: 519.876.5

Кочержинская Ю.В., Прохоров И.Е.

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С развитием компьютерной техники и сетевых технологий появилась возможность создания моделей сложных технологических процессов с целью их более подробного изучения. В частности, прогнозирование результатов изменений отдельных параметров или целого комплекса позволяет существенно снизить возможные убытки. Технологически сложные процессы су-

ществуют в разных областях человеческой деятельности – от сельского хозяйства до космических технологий.

Одной из наиболее актуальных для Уральского региона отраслей является металлургическая промышленность, все процессы в которой проходят либо при высоких температурах, либо в сложных химических условиях.

Моделирование системы базируется на принципах системного подхода: единства, связности, функциональности, развития и проч.[1]. Однако основной проблемой моделирования технологических процессов является слабая формализуемость этапов и большая зависимость от конкретного агрегата, что существенно ограничивает применение модели. В итоге мы имеем дело с ситуацией, когда для обеспечения точности прогноза и модели приходится сужать область применения или жертвовать точностью расчетов ради универсализации модели.

Отдельную проблему составляет наличие в уравнениях, описывающих межмодульные связи эмпирически определяемых значений. Учитывая погрешности опыта и некоторую естественную несогласованность условий опыта и производственных условий, такие коэффициенты на выходе также значительно увеличивают ошибку модели. Частично ошибки моделирования можно нивелировать правильным выбором модели.

Согласно современным представлениям [2], в производстве применяются в основном математические и информационные модели. Для моделирования металлургических процессов актуальны математические (как аналитические, так и стохастические) модели, а при разработке экспертных (особенно базирующихся на нейронных сетях) систем удобно использовать информационные модели.

Кроме того, большую популярность набирают тренажеры, обучающие и следящие системы, построенные на имитационных моделях. Если раньше наиболее наглядно такие модели представляли связи между элементами и модулями системы (опираясь, в частности, на теорию графов), то увеличение процессорной мощности позволило создать наиболее наглядные имитации как агрегатов, так и процессов (см. рисунок). Вот как выглядит имитационная модель сложного технологического процесса [3].

Изначально такие модели предполагают только отображение, визуализацию процесса, однако не всегда они несут только такую роль. В источнике [3] в качестве примера полезности таких моделей приведена следующая история: «Корпорация Whisker R&D Co обратилась к специалистам on3D.ru за создани-

ем трехмерного анимационного ролика, иллюстрирующего процесс работы сложного устройства TopScan. Проектируемый механизм «ноу-хау» предназначается для сканирования поверхности кремниевых пластин, используемых при создании компьютерных процессоров. Интересно, что в процессе работы над роликом были выявлены несоответствия некоторых частей механизма. Это оказалось новостью даже для самих разработчиков устройства. В результате непосредственно в конструкцию устройства был внесен ряд совершенствующих изменений...»



Вопросам исследования математических моделей управления сложными техническими объектами посвящен ряд работ Понтягина Л.С, Зубова В.И., Колмановского В.В., Ройтенберга Я.Н., Чернецкого В.И. и других авторов. Вопросам моделирования работы технологических процессов и аппаратов в промышленности посвящены работы Вьюкова И.Е., Дудникова Е.Е., Ицковича Э.Л., Зорина И.Ф., Петрова В.П., Соркина Л.Р., Цодикова Ю.М., Воронина А.В., Кузнецова В.А., Полякова В. В. и других авторов.[4]

В общем случае любой производственный процесс характеризуется отсутствием полной закономерности в функционировании с наличием множества случайных составляющих: время обработки единицы продукции, длительность безотказной работы агрегатов и механизмов, время простоев и восстановительных работ и так далее. Это приводит к тому, что в постановке задачи моделирования появляется большое количество факторов, которые необходимо учитывать, так как их влияние на результат значительно. Однако при усложнении модели её адекватность начинает резко снижаться. Этому есть несколько причин. Во-первых, чувствительность к одному общему фактору (например, температуре внешней среды) у различных параметров модели может существенно различаться, во-вторых, во многих продолжительных высокотемпературных технологических процессах недостаточно точно известен механизм влияния изменений химического состава на конечный результат; в-третьих, в последние годы произошли существенные изменения как в материальной базе предприятий, так и в их технологическом оснащении. Причем чаще всего у таких изменений какая-либо когерентность не предполагается.

Именно поэтому все большую популярность приобретает мнение, высказанное И.Г. Товаровским, что правильно использовать имеющиеся базовые модели технологических процессов, например, в металлургии, такими корифеями, как Б.И Китаев, А.Н. Похвистнев и др.[2,5,6]

Разработка моделей таких сложных обеспечивающих имитацию их динамических характеристик производственных процессов «вручную», т.е. прямым программированием, нерациональна. Причиной тому большая размерность системы и связность подсистем объекта.

Разработку моделей сложных объектов целесообразно осуществлять с использованием инструментальных средств, позволяющих автоматизировать сам процесс моделирования на некотором классе объектов. Инструментальная система моделирования порождает на выходе некий набор данных, содержащий информацию о структуре моделируемой системы и свойствах отдельных ее элементов. Исполнительная система, работающая в составе вычислительного комплекса, принимает эти данные и обеспечивает выполнение необходимых вычислений состояния объекта с учетом поступающих управляющих воздействий и изменяющихся факторов окружающей среды.

Интерфейс инструментальной системы обеспечивает возможность разработки моделей определенного класса на основе определения топологии взаимосвязей и характеристик элементов подсистемы без программирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://tstu-isman.tstu.ru/pdf>
2. Т28 Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Международ. науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 510 с.
3. <http://www.mir3d.ru/learning/250/>
4. <http://www.bankrabort.com>
5. Похвистнев А.Н., Жилкин Н.К. /Изв.вузов. Черная металлургия, 1959, № 9, с.29-45.
6. Информационные системы в металлургии /Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С.Швыдкий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин. Учебник для вузов. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001.—617 с.

УДК 669.162.2:004.94

Т.В. Майорова, В.Л. Евстигнеев

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА С УЧЕТОМ РАБОТЫ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ГАЗОВ

В настоящее время широкое внедрение вычислительной техники на ОАО «ММК» и использование корпоративных информационных систем (КИС) позволяет применять сложные алгоритмы управления доменным процессом [1], в частности стабилизацией теплового состояния доменной печи.

Цель стабилизации – устранение колебаний хода доменной печи, которые возникают в результате изменения содержания железа в шихте, распределения материалов на колошнике, физико-химических свойств кокса и железорудных материалов.

Зная теплое состояние доменной печи можно определить важнейшие показатели доменного процесса: температуру

чугуна, состав шлака, содержание кремния в чугуне, производительность печи.

Для оценки эффективности стабилизации теплового состояния разработана адаптивная модель. Основой для построения модели являются материальные и тепловые балансы, составленные для реакций восстановления высших оксидов до вюстита, восстановления вюстита до металлического железа, процессов плавления и шлакообразования. В модели учитываются затраты тепла на повышение внутренней энергии образующихся газов с учетом совершаемой работы.

Считая, что газы в доменной печи подчиняются законам для идеального газа [2], на основании первого начала термодинамики для бесконечно малого количества тепла dq запишем:

$$dq = dU + dA,$$

где dU - бесконечно малое изменение внутренней энергии;

dA - бесконечно малая работа.

Если система совершает работу только против внешнего давления можно записать [3]:

$$dA = PdV, \text{ тогда}$$

$$dq = dU + PdV \quad (1)$$

Продифференцировав выражение для определения энтальпии $H = U + PV$:

$$dH = dU + PdV + VdP$$

запишем:

$$dU = dH - PdV - VdP.$$

Подставив dU в выражение (1) получили:

$$dq = dH - VdP.$$

При $V = \text{const}$ $dA = PdV = 0$, тогда уравнение (1) принимает вид:

$$dq = dU.$$

Количество тепла, поглощаемого газом при нагреве от температуры T_1 до T_2 равно:

$$q_V = nC_V(T_2 - T_1),$$

где C_V – изохорная молярная теплоемкость;

n – число молей.

$$dq_V = C_V dT \text{ или } dU = C_V dT.$$

Подставив dU в (1) получим:

$$dq = C_V dT + PdV$$

Работа идеального газа при изменении объема от V_1 до V_2 :

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV,$$

где P – внешнее давление.

При $P = \text{const}$ $A = P(V_2 - V_1)$ или $A = nR(T_2 - T_1)$.

Теплота изобарического нагревания идеального газа от T_1 до T_2 :

$$q_p = C_p (T_2 - T_1),$$

где C_p – изобарическая теплоемкость одного моля при $P = \text{const}$.

Для бесконечно малого $(T_2 - T_1)$:

$$dq_p = C_p dT.$$

С другой стороны, т.к. $dq = dH - VdP$, при $P = \text{const}$:

$$dq_p = dH,$$

где H – энтальпия.

Следовательно, $dH = C_p dT$ или $dq = C_p dT - VdP$.

Из равенства $C_V dT + PdV = C_p dT - VdP$ получим:

$$C_V dT = C_p dT - VdP - PdV \quad (2)$$

Продифференцировав уравнение Клапейрона получим:

$$PdV + VdP = RdT$$

С учетом уравнения Менделеева-Клапейрона: $PV = nRT$ и учитывая $dU = C_V dT$ окончательно запишем для n -молей:

$$Q = nC_p dT - nRdT,$$

где Q – внутренняя энергия.

Тепловой баланс для i -того состояния восстановления железа запишем в виде:

$$\left(\sum_{j=1}^g n_{\text{ex}j} H_{\text{ex}j} - \sum_{k=1}^m n_{\text{вы}k} H_{\text{вы}k} \right) - R \left(\sum_{j=1}^l n_{\text{ex}j}^2 T_{\text{ex}j}^2 - \sum_{k=1}^e n_{\text{вы}k}^2 T_{\text{вы}k}^2 \right) - Q_{\text{ном}i} = 0$$

где $n_{\text{ex}j}$, $n_{\text{вы}k}$, $n_{\text{ex}j}^2$, $n_{\text{вы}k}^2$ – удельное количество веществ и газовых компонентов, моль/моль Fe;

$H_{\text{вх}ji}, H_{\text{вых}ki}$ – энтальпии веществ, участвующих в реакциях,
Дж/моль Fe;

$T_{\text{вх}i}^{\circ}, T_{\text{вых}i}^{\circ}$ – температуры газовых компонентов, К;

$Q_{\text{пот}i}$ – наружные потери тепла в печи, Дж/моль Fe.

Тогда затраты тепла на совершение работы образующимися газами для i -того состояния восстановления железа:

$$A_i = -R \left(\sum_{j=1}^l n_{\text{вх}ji}^{\circ} T_{\text{вх}ji}^{\circ} - \sum_{k=1}^e n_{\text{вых}ki}^{\circ} T_{\text{вых}ki}^{\circ} \right). \quad (3)$$

На основе материального баланса кислорода рассчитывается коэффициент k_{CO}° , характеризующий степень использования восстановительного потенциала газа CO и количество n_{CO}° , моль/моль Fe:

$$k_{CO}^{\circ} = (1,057 + n_{H_2O}^{\text{ЭК}} + n_{CO_2}^{\text{ЭК}} + n_{CO}^{\text{ЭК}} - 3n_{Fe_2O_3}^{\text{III}} - 4n_{Fe_3O_4}^{\text{III}} - n_{H_2O}^{\text{III}}) / (2n_{CO}^{\circ} - 0,5)$$

$$n_{CO}^{\circ} = \frac{1,057n_{FeO}^{\circ} - 1,05n_{FeO}^{\text{ЭК}} + n_{CO}^{\text{ЭК}}}{(1 + 2k_{CO}^{\circ})},$$

где $n_{Fe_2O_3}^{\text{III}}, n_{Fe_3O_4}^{\text{III}}, n_{H_2O}^{\text{III}}, n_{H_2O}^{\text{ЭК}}, n_{CO_2}^{\text{ЭК}}, n_{CO}^{\text{ЭК}}$ – количество компонентов в шихте и колошниковом газе, моль/моль Fe;

$n_{FeO}^{\circ}, n_{FeO}^{\text{ЭК}}$ – количество образовавшегося вюстита и вюстита в первичном шлаке, моль/моль Fe;

$n_{CO}^{\text{ЭК}}$ – количество монооксида углерода.

На основе материальных балансов кислорода, углерода и водорода для реакций шлакообразования рассчитывается количество $n_{CO}^{\text{ЭК}}, n_C^{\text{ЭК}}$ и количество H_2 , поступающего с влагой дутья и в составе природного газа $n_{H_2}^{\text{ЭК}}$, моль/моль Fe:

$$n_{CO}^{\text{ЭК}} = 1,05(n_{FeO}^{\text{ЭК}} - n_{FeO}^{\text{III}}) + n_{Mn}^{\text{ч}} + 2n_{Si}^{\text{ч}} + 2n_{O_2}^{\text{д}} + 2n_{O_2} + n_{H_2O}^{\text{д}} + n_{H_2O}^{\text{нар}};$$

$$n_C^{\text{ЭК}} = n_C^{\circ} + n_{CO}^{\text{ЭК}} - n_{CO}^{\circ} (1 + k_{CO}^{\circ}).$$

$$n_{H_2}^{\text{ЭК}} = n_{H_2O}^{\text{д}} + 2n_{CH_4}^{\text{нр.з.}} + 3n_{C_2H_6}^{\text{нр.з.}} + 4n_{C_3H_8}^{\text{нр.з.}} + n_{H_2O}^{\text{нр.з.}}.$$

На основе теплового баланса, с учетом уравнения (3) рассчитываются затраты тепла на совершение работы образующимися газами для реакций восстановления вюстита $A_{жс}$ и шлакообразования $A_{шл}$, Дж/моль Fe:

$$A_{жс} = R(n_1 T_1' - n_2 T_2'), \quad A_{шл} = R(n_2 T_2' - n_\delta T_\delta'),$$

где T_1', T_2', T_δ' – температуры газовых компонентов, К;

n_1, n_2, n_δ – удельное количество газовых компонентов, моль/моль Fe:

$$n_1 = n_{CO}^6 (1 + k_{CO}^6) + n_{H_2}^6 + n_{H_2O}^6 + n_{N_2}^\delta,$$

$$n_2 = n_{CO}^{жс} + n_{H_2}^{жс} + n_{N_2}^\delta,$$

$$n_\delta = n_{N_2}^\delta + n_{O_2}^\delta + n_{H_2O}^\delta + n_{CH_4}^{np.z.} + n_{C_2H_6}^{np.z.} + n_{C_3H_8}^{np.z.}.$$

На основе теплового баланса для процессов плавления и шлакообразования:

$$\begin{aligned} & n_{Fe}^{жс} (H_{Fe}^{T_2} - H_{FeO}^{T_2}) + H_{FeO}^{T_2} + n_{SiO_2}^{шл} (H_{SiO_2}^{T_2} - H_{SiO_2}^{шл}) + n_{Si}^ч (H_{SiO_2}^{шл} - H_{Si}^ч) + \\ & + n_{MnO}^{шл} (H_{MnO}^{T_2} - H_{MnO}^{шл}) + n_{Mn}^ч (H_{MnO}^{шл} - H_{Mn}^ч) + n_C^{жс} H_C^{T_2} + n_{CaO}^{шл} (H_{CaO}^{T_2} - H_{CaO}^{шл}) + \\ & + n_{MgO}^{шл} (H_{MgO}^{T_2} - H_{MgO}^{шл}) + n_{Al_2O_3}^{шл} (H_{Al_2O_3}^{T_2} - H_{Al_2O_3}^{шл}) + n_{CH_4}^{np.z.} H_{CH_4}^{np.z.} + n_{C_2H_6}^{np.z.} H_{C_2H_6}^{np.z.} + \\ & + n_{C_3H_8}^{np.z.} H_{C_3H_8}^{np.z.} + n_{O_2}^\delta H_{O_2}^\delta + n_{O_2}^{\delta об} H_{O_2}^{\delta об} + n_{N_2}^\delta (H_{N_2}^\delta - H_{N_2}^{T_2}) + n_{H_2O}^\delta H_{H_2O}^\delta + \\ & + n_{H_2O}^{нар} H_{H_2O}^{нар} - H_{Fe}^ч - n_C^ч H_C^ч - n_{CO}^{жс} H_{CO}^{T_2} - n_{H_2}^{жс} H_{H_2}^{T_2} + A_{шл} - q_{пот}^{шл} - q_{горн} = 0, \end{aligned}$$

пределяется показатель теплового состояния:

$$\begin{aligned} \theta = & n_{Fe}^{жс} (H_{Fe}^{T_2} - H_{FeO}^{T_2}) + H_{FeO}^{T_2} + n_{SiO_2}^{шл} (H_{SiO_2}^{T_2} - H_{SiO_2}^{шл}) + n_{MnO}^{шл} (H_{MnO}^{T_2} - H_{MnO}^{шл}) + \\ & + n_{Mn}^ч (H_{MnO}^{шл} - H_{Mn}^ч) + n_C^{жс} H_C^{T_2} + n_{CaO}^{шл} (H_{CaO}^{T_2} - H_{CaO}^{шл}) + n_{MgO}^{шл} (H_{MgO}^{T_2} - H_{MgO}^{шл}) + \\ & + n_{Al_2O_3}^{шл} (H_{Al_2O_3}^{T_2} - H_{Al_2O_3}^{шл}) + n_{CH_4}^{np.z.} H_{CH_4}^{np.z.} + n_{C_2H_6}^{np.z.} H_{C_2H_6}^{np.z.} + n_{C_3H_8}^{np.z.} H_{C_3H_8}^{np.z.} + n_{O_2}^\delta H_{O_2}^\delta + \\ & + n_{O_2}^{\delta об} H_{O_2}^{\delta об} + n_{N_2}^\delta (H_{N_2}^\delta - H_{N_2}^{T_2}) + n_{H_2O}^\delta H_{H_2O}^\delta + n_{H_2O}^{нар} H_{H_2O}^{нар} - n_{CO}^{жс} H_{CO}^{T_2} - n_{H_2}^{жс} H_{H_2}^{T_2} + \\ & + A_{шл} - q_{пот}^{шл} - q_{горн} = 0. \end{aligned}$$

Адаптация математической модели проводится по критерию:

$$F(\Delta T_1, \Delta T_2) = C_1 D_\theta + C_2 D_{Пр} \rightarrow \min$$

где $D_\theta, D_{Пр}$ – соответственно дисперсии показателя теплового состояния и производительности.

К выбранным параметрам адаптации относятся: температурные границы T_1, T_2 ; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – разница между температурой газовой среды и средней температурой шихты, участвующих реакциях; область допустимых значений параметров адаптации: $T_1 = (750-950)^\circ\text{C}$, $T_2 = (1150-1250)^\circ\text{C}$, $\Delta T_1 = (20-200)^\circ\text{C}$, $\Delta T_2 = (40-300)^\circ\text{C}$.

Если возникает несоответствие между фактическим и расчетным значением параметра k_{CO}^e , то проводится адаптация параметра T_1 . Если расчетное значение производительности не соответствует найденному по автокорреляционной функции и содержание кремния в чугуна на выпуске не соответствует прогнозируемому, то адаптируется параметр T_2 .

Адаптация математической модели проводится по методу Розенброка.

Для проверки адекватности модели расчета теплового состояния проведена оценка влияния содержания железа в шихте, изменения расхода природного газа и концентрации кислорода в дутье на показатель теплового состояния.

Адекватность подтверждается еще тем, что выявленная зависимость содержания кремния в чугуна от общих затрат тепла для параметров: содержание железа в шихте 59,26-59,86%, рудная нагрузка 4,02-4,04, концентрация кислорода в дутье 25-25,4% соответствует практическим данным.

Полученное семейство линий показывает зависимость содержания кремния в чугуна от общих затрат тепла (рис. 1).

Для выбора управляющего воздействия надо определить, в какой части пространства работает доменная печь. По фактическому значению содержания кремния в чугуна, с помощью модели расчета теплового состояния определяются затраты тепла, минимально необходимые для восстановления железа.

Например, для режима работы доменной печи с рудной нагрузкой $N=4,02$, при содержании железа в шихте 59,56%, фактическом содержании кремния в чугуна 0,62% (рис. 1), снижение содержания кремния на 0,06% позволит снизить затраты тепла на его восстановление при прочих заданных параметрах.

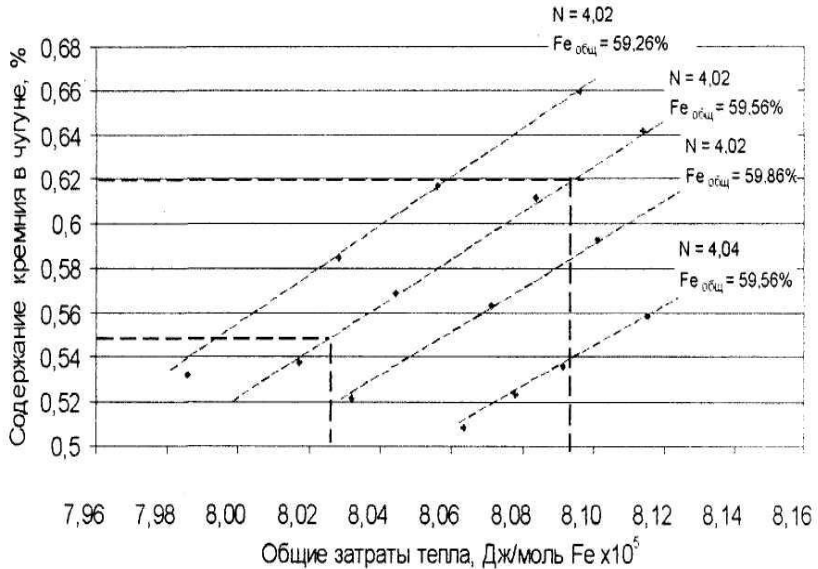


Рис. 1. Зависимость содержания кремния в чугунах от общих затрат тепла в доменном процессе

В частности, можно было бы уменьшить расход кокса на 0,6%, но для реализации такого управляющего воздействия нужно повысить точность дозирования по сравнению с существующей (1,25%) на порядок.

Технические средства для повышения точности дозирования имеются. Выпускаются средства измерения массы с электронными преобразователями общей погрешностью менее 0,1%. Дополнительную погрешность вносят существующие алгоритмы дозирования, в которых зачастую не учитываются такие показатели как запаздывание и время неконтролируемого перемещения дозируемых веществ.

Высокоточные математические модели технологических процессов требуют совершенствования алгоритмов дозирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компьютерные методы моделирования доменного процесса/Под ред. Н. А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.

2. Цымбал В. П. Математическое моделирование металлургических процессов. М.: Металлургия, 1986. – 240 с.
3. Андрущенко А. И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М.: «Высшая школа», 1975. – 264 с.

УДК 681.5.01+004.421

Логунова О.С., Арестов В.С., Логунов С.М.
ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛАВНОГО ПОСТА УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Введение

В настоящее время около 60 % отливаемых непрерывным литьем заготовок разливается на слябовых машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Основными производителями непрерывнолитых слябов в мире являются Япония, США, КНР, Германия, Корея и Россия. На долю этих стран приходится более двух третей мирового объема производства слябов. Сейчас в мире насчитывается чуть более 500 слябовых МНЛЗ с общим числом ручьев свыше 700 шт.

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в докризисной экономике входил в первую двадцатку металлургических предприятий мира и не отстает от мирового технологического прогресса. На сегодняшний день это предприятие практически полностью перешло на производство слябов при помощи машин непрерывного литья заготовок.

В настоящее время является актуальной проблема разработки алгоритмов для имитационного моделирования технологических систем. Такие системы включаются в состав автоматизированных систем управления (АСУ) и широко используются для мониторинга технологического процесса (ТП) и обучения персонала.

Создание программного комплекса, моделирующего работу МНЛЗ, позволит сократить временные и материальные затраты при обучении будущих специалистов – операторов МНЛЗ на рабочем месте, проводить тестирования и испытания

МНЛЗ с использованием имитационной модели технологических ситуаций, в том числе и аварийных.

Постановка задачи имитационного моделирования

Используя исходные данные, характеризующие конструкционные особенности МНЛЗ и показатели приборов АСУ ТП, необходимо разработать алгоритмы для программного обеспечения имитационной модели МНЛЗ, состоящей из следующих частей:

- имитационная модель главного поста управления машины непрерывного литья заготовок;
- имитационная модель технологических процессов непрерывной разливки стали;
- модель кристаллизации, для определения толщины затвердевшей оболочки («корочки») заготовки, находящейся в МНЛЗ;
- модель для определения расхода стали машины непрерывно литья заготовок.

Для имитационного моделирования были выбраны конструкционные параметры МНЛЗ № 2, функционирующей 2 кислородно-конвертерном цехе ОАО «ММК». Используемые значения приведены в табл.

Так же в качестве исходных данных использовались таблицы расхода воды и воздуха на зоны вторичного охлаждения слитка. Данные таблиц по технологической инструкции позволяют определять программу охлаждения заготовки для различных групп марок разливаемой стали, сечения слитка и температуры подачи стали на поворотный стенд МНЛЗ.

Алгоритмы имитационной модели главного поста управления (ГПУ) машины непрерывного литья заготовок

Имитационная модель ГПУ МНЛЗ содержит большое количество алгоритмов, охватывающих весь комплекс «Оператор – Клиент – Сервер – МНЛЗ – Сталь».

Программное обеспечение главного поста управления МНЛЗ предназначено для контроля и мониторинга текущего состояния МНЛЗ, её параметров, а так же для обработки и занесения в базу данных информации по плавке, находящейся процессе разливки.

Все алгоритмы программного комплекса ГПУ можно разделить на группы, согласно схеме приведенной на рисунке 1.

На рисунке 2 приведена общая схема работы имитационной модели МНЛЗ, реализованная на основе алгоритмов, приведенных на рисунке 1. Согласно схеме классификации вы-

делены две основные части: серверная и клиентская. Для каждой из частей реализованных все алгоритмы расчетов и обработки запросов, а также способы вывода информации по результатам работы каждого алгоритма.

Одной из основных задач имитационного моделирования состояния МНЛЗ является задача выбора методов расчета в зависимости от режима работы определенного узла или механизма. Режим работы определяет выполняемые и допустимые операции. На рисунке 3 приведен пример алгоритма, в котором определяется метод расчета прироста длины слитка в зависимости от технологического состояния, в котором на данный момент времени работает выбранный ручей МНЛЗ.

Таблица

Значения исходных данных, выбранных для имитационного моделирования

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Параметры МНЛЗ	
Количество ручьев, <i>шт</i>	4
Количество кристаллизаторов, <i>шт</i>	2
Количество мест под сталеразливочные ковши, <i>шт</i>	2
Количество промежуточных ковшей, <i>шт</i>	2
Максимальная скорость вытягивания заготовки, <i>м/мин</i>	1,7
Параметры ручья	
Металлургическая длина, <i>м</i>	28
Длина до места отделения затравки, <i>м</i>	30
Длина до машины газовой резки (МГР), <i>м</i>	51
Количество коллекторов на ручей, <i>шт</i>	16
Технологические параметры	
Уровень наполнения кристаллизатора, <i>мм</i>	100
Расстояние до установки головки затравки, <i>мм</i>	600
Расстояние до зеркала при запуске МНЛЗ, <i>мм</i>	170

На рисунке 3 введены обозначения: KO_i – код текущей операции; KO_{i-1} – код предыдущей операции; НК – операция наполнения кристаллизатора; НВ – операция начала вытягивания; Δt_i – прирост заготовки за текущий интервал момент времени,

мм; Δt_{i-1} – прирост заготовки за предыдущий интервал момент времени, мм.



Рисунок 1 – Классификация алгоритмов имитационной модели ГПУ

Процедуры, указанные на рисунке 3, имеют следующее назначение:

- Процедура 1 – расчет прироста заготовки за начальный интервал времени;
- Процедура 2 – пересчет прироста заготовки за выбранный интервал времени;
- Процедура 3 – пересчет прироста заготовки на предыдущей итерации;
- Процедура 4 – пересчет прироста заготовки за выбранный интервал времени с учетом удаления от уровня металла в кристаллизаторе;
- Процедура 5 – пересчет прироста заготовки за выбранный интервал времени без учета удаления от уровня металла в кристаллизаторе.

При изменении параметров механизмов МНЛЗ или процесса в ручном режиме необходимо привести фактическое значение этого параметра в соответствии с новым значением. Поэтому для всех подобных ситуаций действует алгоритм регулирования фактического значения параметра. Обобщенная схема такого алгоритма изображена на рисунке 4.

Для мониторинга расхода металла в МНЛЗ необходимо выполнять расчет массы металла на всех технологических эта-

пах от сталеразливочного ковша до конца ЗВО. На рис. 5 изображен один из таких алгоритмов – алгоритм расчета массы металла в кристаллизаторе.

На рисунке 4 введены обозначения: A_{Φ} – фактическое значение параметра механизма МНЛЗ или процесса непрерывной разливки стали; A_3 – новое заданное значение параметра механизма МНЛЗ или процесса непрерывной разливки стали; h – шаг изменения выбранного параметра.

На рисунке 5 введены обозначения: CA – показатель состояния агрегата: 1 – агрегат работает, 0 – агрегат не работает; CC – показатель выхода заготовки из кристаллизатора: 1 – заготовка вышла за пределы кристаллизатора, 0 – заготовка не вышла за пределы кристаллизатора.

Основная расчетная формула для процедур 1 и 2 имеют вид:

$M = (H - L) \cdot M_0,$	(1)	$M = (H_0 - L) \cdot M_0,$	(2)
--------------------------	-----	----------------------------	-----

где M – масса металла, находящегося в кристаллизаторе, кг; H – высота кристаллизатора, м; L – удаление уровня металла от верха кристаллизатора, м; H_0 – удаление начала слитка от верха кристаллизатора, м; M_0 – масса погонного метра металла, кг, определяемая по формуле:

$$M_0 = \rho_{Me} \cdot a \cdot b \cdot c,$$

где ρ_{Me} – плотность металла в интервале температур 1540 ÷ 1560 °С, кг/м³; $a=0,25$ – толщина заготовки, м; b – ширина заготовки, принимающая значения из [0,8; 2,5], м; $c=1$ – длина одного погонного метра, м.

Наличие всех алгоритмов, приведенных на рисунке 1, позволило спроектировать и разработать программную реализацию имитационной модели.

Принципы построения программного обеспечения имитационной модели

1. Принцип функциональности модулей. Программный комплекс, моделирующий ГПУ МНЛЗ, состоит из 2-х основных

частей: программы-сервера и программы-клиента. В свою очередь эти части разделены на модули, реализующие отдельные функциональные алгоритмы. Программа сервер выполняет моделирование всех процессов МНЛЗ, а так же за формирование и ведение протоколов изменений работы МНЛЗ и оператора (логирование). Программа-клиент выполняет формирование запросов пользователя к программе-серверу и вывод информации на экран. Функциональная модель серверной части представлена на рисунке 6. Функциональная модель построена при *целеполагании* «смоделировать работу МНЛЗ при разливке стали» с точки зрения разработчика программного обеспечения.

Запросы на изменения параметров МНЛЗ формируются клиентской части программного комплекса на основе запросов пользователя. Организация и обработка запроса возлагается на один из модулей серверной части. Примерами запросов клиентской части являются: изменение скорости вытягивания на выбранном ручье, изменение частоты качания кристаллизатора, изменение расходов воды в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения, изменение режимов работы ручьев, кристаллизаторов, всего агрегата в целом.

Например: запрос оператора – изменить частоту качания кристаллизатора №1 на 120 клиентом будет передан как запрос изменить заданную частоту качания кристаллизатора №1 на 120.

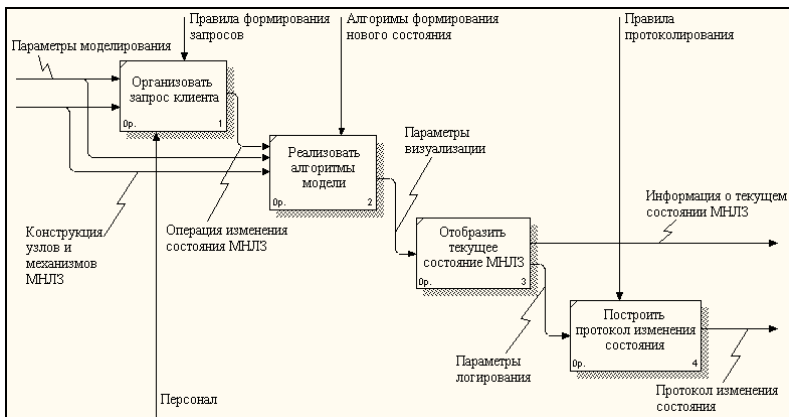


Рис. 6. Функциональная модель серверной части программного обеспечения имитационной модели

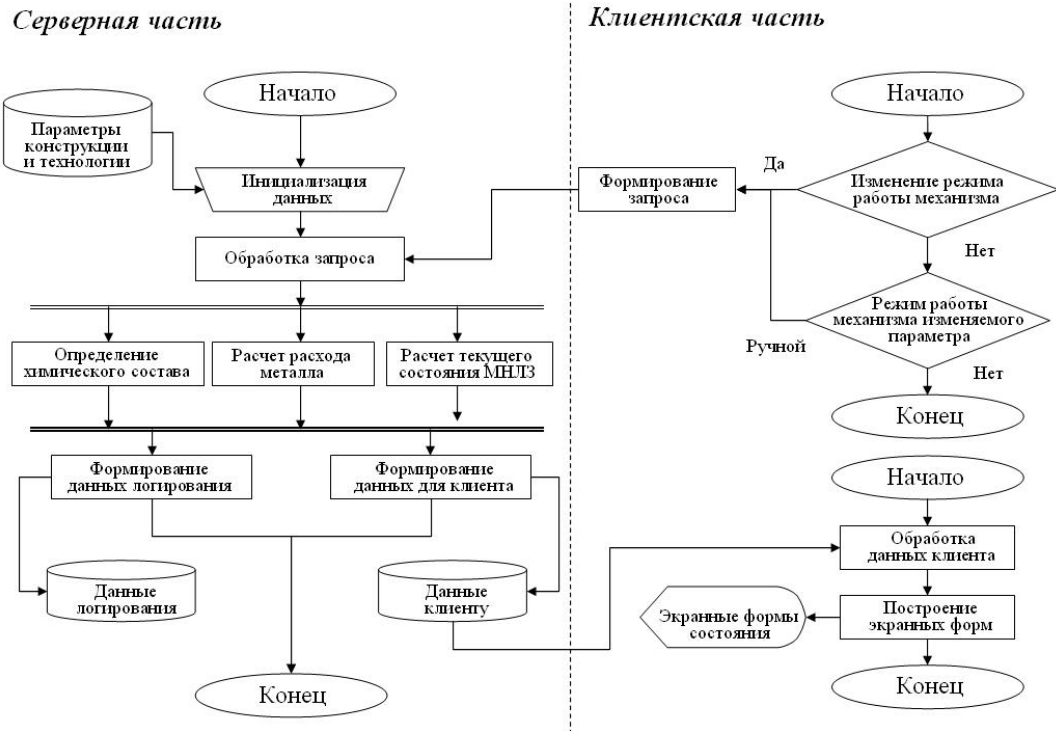


Рис. 2. Схема функционирования имитационной модели ГПУ МНЛЗ

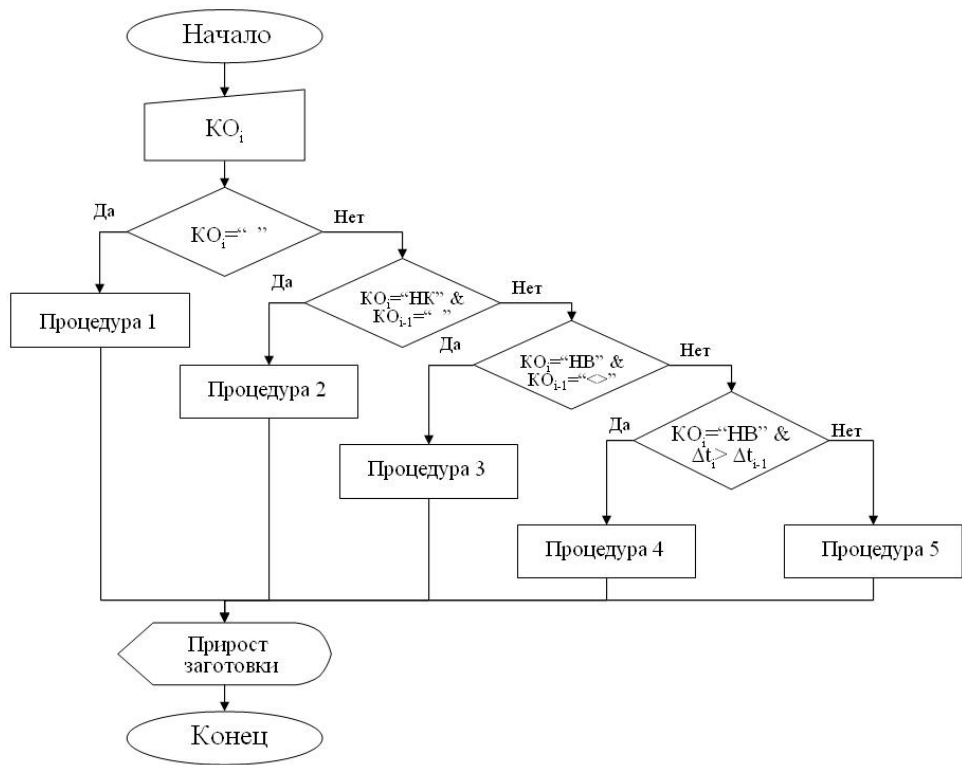
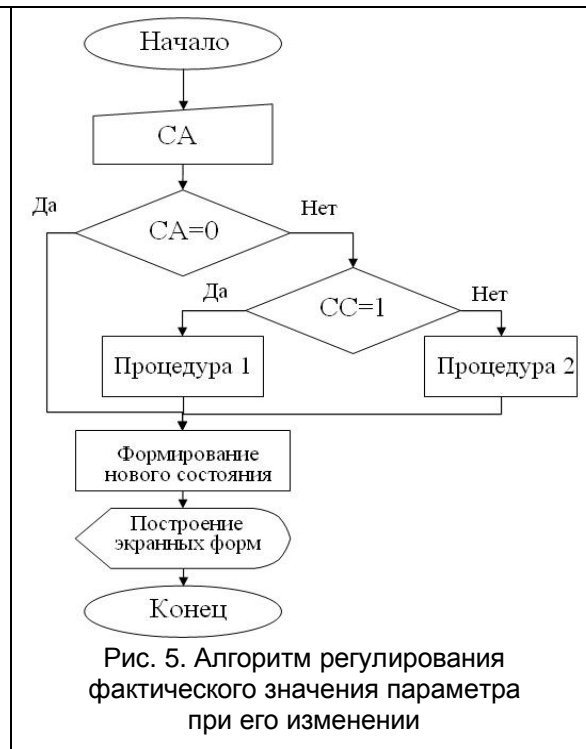
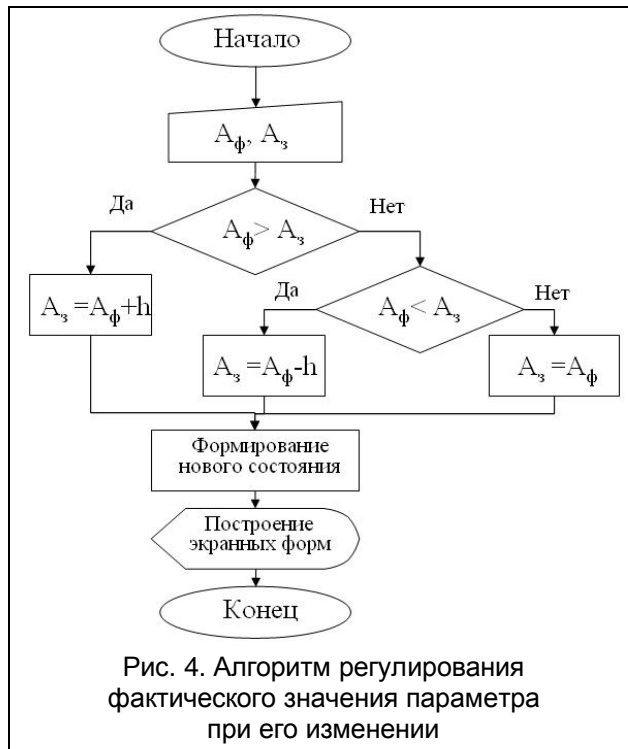


Рис. 3. Блок-схема определения длины заготовки в процессе разливки



2. Принцип протоколирования. В ходе работы программного комплекса ведется запись изменений, сделанных оператором (клиентом) – логирование работы МНЛЗ.

3. Принцип интерактивности. При разработке программного комплекса был определен диалог на основе меню, позволяющего в интерактивном режиме изменять параметры технологического процесса и выбирать формы для отображения его состояния. Схема главного меню программного обеспечения отображена на рисунке 7.

Главное меню состоит из 5 основных пунктов.

1. *Главное меню*, позволяющее передавать управление между постами управления МНЛЗ и содержащее подпункты:

- 1.1. Технология ПУ 1 – главный пуль управления.
- 1.2. Технология ПУ 2 – пульт управления машиной газовой резки.
- 1.3. Авторизация.

2. *Готовность*, позволяющее отобразить на экране состояние готовности к работе всех систем МНЛЗ.

3. *Управление*, позволяющее переключать экранные страницы мониторинга ручьев:

- 3.1. Электронная страница ручья 5.
- 3.2. Электронная страница ручья 6.

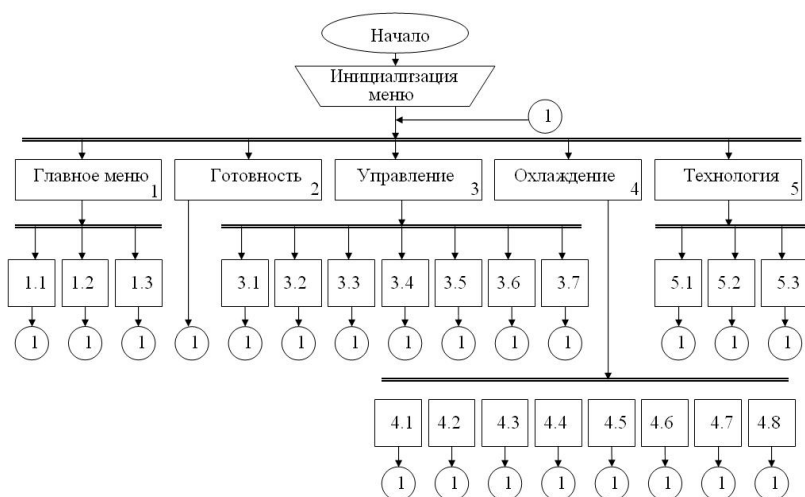


Рис. 7. Функциональная схема главного меню программного продукта (ГПУ)

- 3.3. Электронная страница ручья 7.
- 3.4. Электронная страница ручья 8.
- 3.5. Электронная страница ручья 5, 6.
- 3.6. Электронная страница ручья 7, 8.
- 3.7. Электронная страница всех ручьев.
4. *Охлаждение*, позволяющее переключать экранные страницы мониторинга систем охлаждения МНЛЗ и заготовки:
 - 4.1. Электронная страница охлаждения кристаллизатора.
 - 4.2. Электронная страница общих подводов охлаждения.
 - 4.3. Электронная страница зон вторичного охлаждения ручьев 5 и 6.
 - 4.4. Электронная страница зон вторичного охлаждения ручьев 7 и 8.
 - 4.5. Электронная страница для регулирования вторичного охлаждения 5 и 6 ручьев.
 - 4.6. Электронная страница для регулирования вторичного охлаждения 7 и 8 ручьев.
 - 4.7. Электронная страница охлаждения опор.
 - 4.8. Электронная страница готовности всего охлаждения.
5. *Технология*, позволяющая контролировать основные параметры плавки:
 - 5.1. Электронная страница результатов химического анализа.
 - 5.2. Электронная страница состояния текущей (следующей) плавки.
 - 5.3. Электронная страница базовых таблиц охлаждения.

4. Принцип ментальности. Электронные страницы программного средства организованы на основе ментальной модели. Ментальная модель позволила использовать метафоры узлов и механизмов реального агрегата для их отображения на общих схемах. На рисунке 8 показан пример рабочего окна при управлении разливкой на ГПУ МНЛЗ.

Имитационная модель ГПУ МНЛЗ так же в точности копирует интерфейс программного обеспечения ГПУ МНЛЗ и позволяет представить пользователю всю информацию, которую получает оператор.

Недостатком ментальной модели является отсутствие отображения теплового состояния металла в сталеразливочном и промежуточных ковшах, а также при нахождении в зонах вторичного охлаждения.

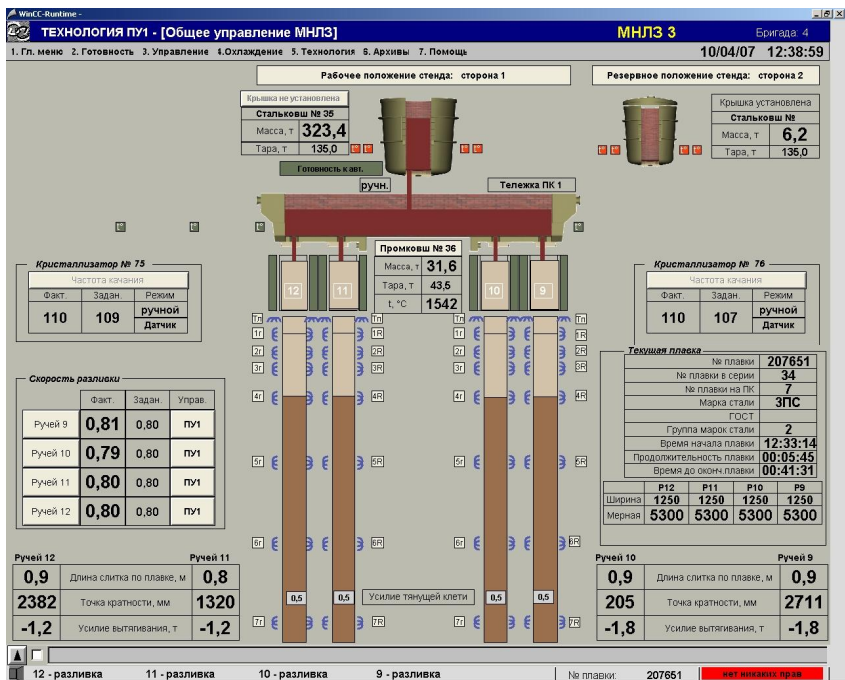


Рис. 8. Пример рабочего окна программного комплекса ГПУ МНЛЗ

Заключение

При проектировании и разработке имитационной модели ГПУ МНЛЗ выполнено построение имитационных моделей главного поста управления МНЛЗ, технологических процессов непрерывной разливки стали, затвердевания заготовки в условиях МНЛЗ.

Разработанные алгоритмы и принципы построения программного комплекса позволили создать надежную имитационную модель ГПУ МНЛЗ.

Перспективным направлением развития проекта является синтез ГПУ с математическими моделями для описания теплового состояния расплава в сталеразливочном и промежуточных ковшах, описания процессов затвердевания заготовок в МНЛЗ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОДУШЕК ОПОРНЫХ ВАЛКОВ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ КВАРТО

Для уменьшения продольной разнотолщинности проката наряду с технологическими мероприятиями распространение получили системы автоматического регулирования толщины и натяжения полосы. Для правильного формирования сигналов управления исполнительными механизмами, следует определить аналитические зависимости воздействий каждого канала управления и основных возмущений на толщину и натяжение полосы, т.е. математическую модель прокатной клетки. Математические модели прокатной листовой клетки приведены в работах [1,2]. Передаточные коэффициенты, входящие в математическую модель, зависят от коэффициентов податливости отдельных элементов клетки – станины, подушек, нажимных устройств, опорных и рабочих валков в месте их контакта. Под коэффициентом податливости элемента клетки понимается деформация (mm) этого элемента от приложенной единичной силы ($1H$). Определение деформации отдельных элементов клетки достаточно полно изложено в работе [1]. В этой работе подушка опорного валка представлена в виде пластины прямоугольной формы.

Определим, далее, податливость только одного элемента клетки – подушки опорного валка, приняв новую расчётную модель, которая более объективно отражает реальную форму рассчитываемого элемента.

Подушка верхнего опорного валка изображена на рис.1. Опорный валок воспринимает усилие прокатки P и усилие распора подушек рабочих валков P_p и через цапфу и смазочный слой передаёт суммарное усилие $P_1=P+P_p$ на внутреннюю поверхность втулки-вкладыша, которая смонтирована в подушку. Кроме этого, подушка воспринимает усилие распора P_o опорных валков. Обозначим недеформированное состояние элемента символом “звёздочка”. Тогда уравнение деформации элемента l (см. рис. 1) примет вид

$$l = l^* - \varphi_1(P_1) - \varphi_2(P_o) - \phi(P_1); \quad (1)$$

здесь φ_1 – функция деформации элемента l от суммарного усилия P_1 , φ_2 – функция деформации элемента l от распора опор-

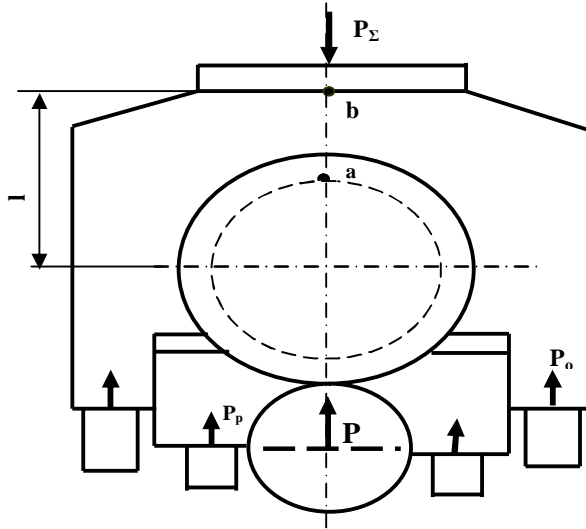


Рис. 1. Схема нагружения подушки опорного вала

ных валков, ψ - функция деформации элемента l , вызванная деформацией подшипников опорного вала.

Обозначим через k_i коэффициенты линеаризации функции деформации φ_i , а через c - функции ψ . Тогда линеаризованное уравнение (1) можно записать так

$$\Delta l = -k_1 \cdot \Delta P_1 - k_2 \cdot \Delta P_o - c \cdot \Delta P_1, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 - коэффициенты податливости подушки опорного вала. За величину Δl примем деформацию отрезка ab на рис.1. Точка b расположена на внутренней поверхности втулки-вкладыша подшипника жидкостного трения. Таким образом, у подушек имеется два коэффициента податливости:

$$k_1 = \left| \frac{\partial \varphi_1}{\partial P_1} \right| \approx \left| \frac{\Delta l_{ab}}{\Delta P_1} \right| \text{ и } k_2 = \left| \frac{\partial \varphi_2}{\partial P_o} \right| \approx \left| \frac{\Delta l_{ab}}{\Delta P_o} \right|. \quad (3)$$

Чтобы найти эти коэффициенты примем далее следующее допущение: подушка в направлении оси перпендикулярной плоскости чертежа рис. 1 имеет значительную длину, внешние силы, приложенные нормально к боковой поверхности подушки, равномерно распределены по её длине и статически эквивалентны нулю (см. рис. 2). При таких допущениях, подушка находится в состоянии плоской деформации.

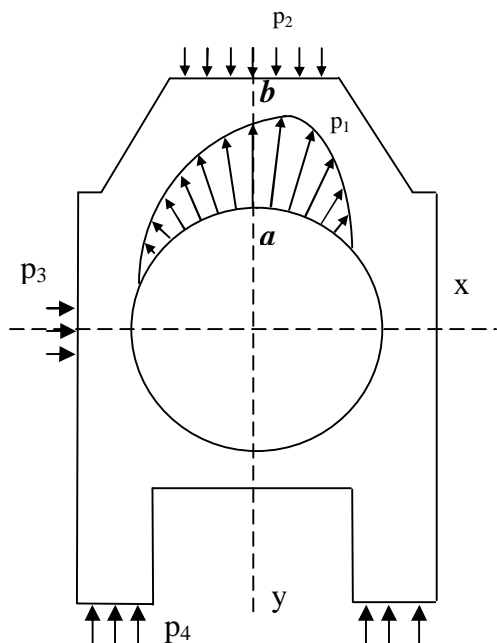


Рис. 2. Внешние контактные напряжения, приводящие подушку в состояние плоской деформации

Это позволяет вместо всей области, занятой подушкой, ограничиться рассмотрением её элемента, выделенного двумя поперечными сечениями, расстояние между которыми равно единице (1mm.). Наиболее точно принятой схеме нагружения подушки соответствует внешнее контактное напряжение p_1 – давление цапфы опорного вала через смазочный слой на втулку-вкладыш. Наименее точно p_4 – давление распора от гидроцилиндров опорного вала. Однако давление распора прикладывается далеко от отрезка ab , деформация которого будет определяться, и это позволяет применить

принцип Сен-Венана.

Напряжение p_1 хорошо аппроксимируется аналитическими выражениями [3]:

$$p_{1[\phi=0-2\alpha_2]}(\phi) = \frac{p_{1max} \cdot \phi}{2\alpha_2}, \quad p_{1[\phi=0-(\alpha_1-\alpha_2)]}(\phi) = 3 \cdot q \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2 - \phi) ;$$

параметр q далее определён. В силу непрерывности $p_1(\phi)$ значение для p_{1max} должно быть таким $p_{1max} = 3q \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)$.

Определим коэффициент k_1 . Оставим в схеме нагружения внешние напряжения p_1, p_2, p_3 . Эпюра контактного давления для тяжело нагруженных ПЖТ, значения углов ϕ^*, α_1 и α_2 приведены в [3]. В расчётах для них были приняты следующие значения $\phi^* = 13^\circ, \alpha_1 = 72^\circ$ и $\alpha_2 = 6^\circ$. Геометрические размеры подушки взяты из атласа [4] для стана 2500 холодной прокатки.

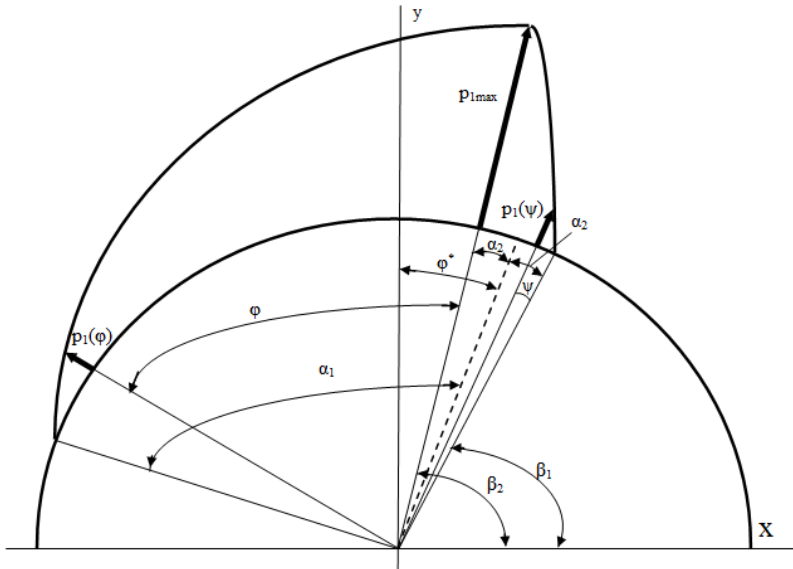


Рис. 3. Эпюра контактных напряжений $p_1(\phi)$ и её геометрические параметры

Вертикальная проекция гидродинамического давления

$$P_y = P_y^1 + P_y^2, \text{ где } P_y^1 = \int_0^{2\alpha_2} p_1(\phi) \cdot \sin(\beta_1 + \phi) R \cdot d\phi \text{ и}$$

$$P_y^2 = \int_0^{\alpha_1 - \alpha_2} 3qR \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2 - \phi) \sin(\beta_2 + \phi) d\phi.$$

Из уравнения $P_y=1$ находим значение параметра q .

Расчёт напряженно-деформированного состояния подушки произведём методом граничного элемента. Применительно к решению плоских задач линейной теории упругости в работе [5], метод граничных элементов доведён до готовых компьютерных программ. Границы тела, вернее, границы сечения тела плоскостью, в указанной работе предложено аппроксимировать отрезками прямых линий. Для каждого отрезка прямой нужно указать координаты начала ($x_{нач}$, $y_{нач}$), координаты конца ($x_{кон}$, $y_{кон}$), а также эквивалентные нормальные (σ) и касательное (τ) напряжения, которые как внешние силы действуют на новую границу тела. Можно в качестве граничных условий использовать смещения, либо смешанные условия, т.е. для каждого

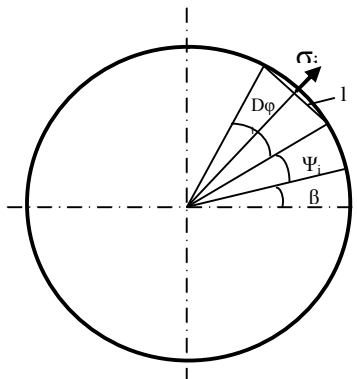


Рис. 4. Определение нормального напряжения на

отрезках прямых, которые вписанные в эти дуги, равны нулю. Разделим дугу, которая видна под углом $\beta_2 \div \beta_1$ точками на $n=20$ равных частей. Через центр окружности и указанные точки проведём лучи, которые пройдут под углом $\theta_{i(i=0 \div n)} = \beta_1 + \psi_i$. Определим вертикальную проекцию гидродинамического давления на единицу длины подушки:

$$P_{yi} = \int_{\beta_1 + \phi_i}^{\beta_1 + \phi_{i+1}} p_1(\phi) R \sin(\phi) d\phi.$$

Соединим ранее определённые точки отрезками прямых линий. К каждому отрезку приложим (см. рис. 4) нормальное σ_{icp} напряжение. Проекция на вертикальную ось усилия, создаваемого напряжением σ_{icp} на своём отрезке прямой, равна

$$\tilde{P}_{yi} = \sigma_{icp} l_i \sin\left(\beta_1 + \phi_i + \frac{D\phi_i}{2}\right), \text{ где } l_i = 2R \sin\left(\frac{D\phi_i}{2}\right) \text{ и } D\phi_i -$$

угол, под которым отрезок прямой виден из центра вала. Проекция P_{yi} от напряжений на дуге и проекция \tilde{P}_{yi} от напряжения на отрезке должны совпадать. Откуда получаем выражение для вычисления нормального напряжения на отрезке:

$$\sigma_{icp} = \frac{P_{yi}}{l_i \sin\left(\beta_1 + \phi_i + \frac{D\phi_i}{2}\right)}.$$

отрезка, расположенного на границе тела, надо задать вектор $[X_{нач} \ Y_{нач} \ X_{кон} \ Y_{кон} \ k \ \tau/v \ \sigma/u]$, где k – параметр, определяющий вид граничного условия: можно взять τ и σ , а можно v и u – смещения. Граничные условия можно смешивать: взять τ и u или v и σ . Внутреннюю окружность подушки с помощью прямых линий, проведённых из центра под углом $0, \beta_1, \beta_2, \beta_2 - \alpha_2 + \alpha_1$, разобьём на 4 дуги. Дуги $0 \leq \psi \leq \beta_1$ и $\beta_2 - \alpha_2 + \alpha_1 \leq \psi \leq 2\pi$ ненагружены. Поэтому нормальные и касательные на-

Это напряжение на отрезке l_i создаёт усилие, горизонтальная проекция которого равна $P_{xi} = \sigma_{icp} l_i \cos(\beta_1 + \phi_i + \frac{D\phi_i}{2})$.

Дугу $\beta_2 - \alpha_2 \leq \varphi \leq \beta_2 - \alpha_2 + \alpha_1$ разбиваем на $m=60$ равных

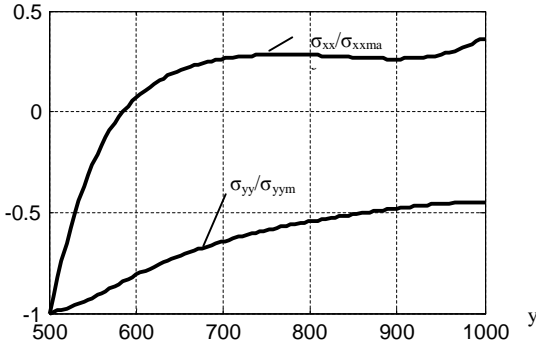


Рис. 5. Изменение напряжений σ_{xx} , σ_{yy} на отрезке ab при силовом воздействии от опорного вала

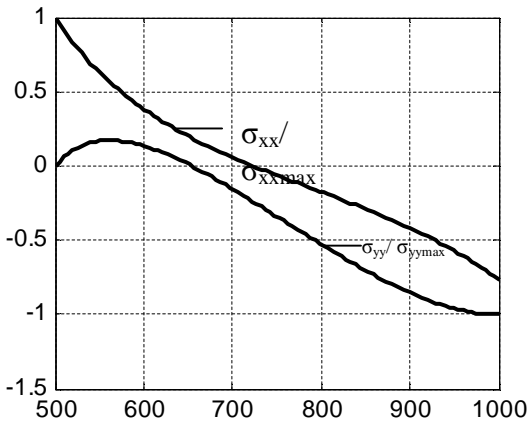


Рис. 6. Изменение напряжений σ_{xx} , σ_{yy} на отрезке ab при силовом воздействии от гидроцилиндра

частей и заменяем каждый участок дуги хордой – отрезком прямой. Для каждого отрезка, по описанной методике, определяем σ_{cp} и P_{xi} . Суммируем все горизонтальные проекции P_{xi} . Получим составляющую P_x вектора внешней нагрузки, приходящуюся на единицу длины подушки. Для компенсации этой составляющей, с торца подушки приложено дополнительное распределённое усилие p_3 (см. рис. 2).

Внешний контур подушки состоит из отрезков прямых линий и нагружен внешними напряжениями p_2 и p_3 . Эквивалентные нормальные напряжения на отрезках разбиения контура просто совпадают с внешними напряжениями.

Результаты расчёта напряжений на линии ab подушки при модуле Юнга $E = 2 \cdot 10^5 \text{ H/mm}^2$ и коэффициенте Пуассона

$\mu=0.3$ приведены на рис. 5. Метод граничных элементов позволяет определить не только напряжения внутри тела но и смещения точек на границе и внутри тела. Однако для многосвязных тел, а подушка – двухсвязное тело, метод не даёт абсолютных смещений, а даёт смещения точек с дополнительным конечным смещением всех его точек как жёсткого целого. Поэтому, определим перемещение точки **b** относительно **a** интегрированием выражения для деформации ε_{yy} , которое для состояния плоской деформации выражается через напряжения σ_{yy} и σ_{xx} :

$$\Delta l_{ab} = \frac{1 - \mu^2}{E} \int_{y_a}^{y_b} (\sigma_{yy} - \frac{\mu}{\mu - 1} \sigma_{xx}) dy .$$

Численное интегрирование дало $|\Delta l_{ab}| = k_1' = 4.447 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$.

Результаты расчёта напряжений на линии **ab** подушки при силовом воздействии нажимного вина и гидроцилиндров распора (напряжения p_2, p_4) приведены на рис. 6. Численное интегрирование дало $|\Delta l_{ab}| = k_2' = 1.044 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$. Коэффици-

енты k_1', k_2' не являются коэффициентами податливости, т. к. они определены исходя из нагрузки в **1Н** на **1мм**. длины подушки, а коэффициент податливости определяется как деформация от полной нагрузки в 1Н. Поэтому, чтобы получить коэффициенты податливости k_1, k_2 нужно значения коэффициентов k_1', k_2' разделить на длину подушки в качестве которой можно взять, например, диаметр месдозы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меерович И.М., Герцев А.И., Горелик В.С., Классен Э.Я. Повышение точности листового проката. –М.: Металлургия, 1969. -269с.
2. Осмоловский И.Ф, Кузнецов Б.И., Голубь А.П. и др. Модель прокатной клетки как объекта управления и косвенного измерения двухканальной системы // Изв. вузов. Чёрная металлургия, 1981, №2. с. 62-66.
3. Тодер И.А., Кудрявцев Н.А., Рязанцев А.А. и др. Гидродинамические опоры прокатных валков.–М.:Металлургия,1968.-399с.
4. Королёв А.А. Прокатные станы и оборудование (Атлас). –М: Металлургия, 1981. -208с.
5. Крауч С., Старфилд А. Метод граничных элементов в механике твёрдого тела. –М.: Мир, 1887. -328с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ФОРМЫ НА ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ¹

Введение

Цветные изображения объектов нашли широкое применение в различных областях деятельности человека, в том числе и металлургической промышленности. В цветном изображении каждая точка описывается тремя цветовыми координатами. Наиболее распространены цветовые координаты формата RGB (Red, Green, Blue). RGB – это система, в которой каждый цвет распадается на три составляющие: красную, зеленую и синюю. Несмотря на широкую распространенность цветных изображений, у них есть множество недостатков: шумы, низкая контрастность, различное восприятие глазом человека разных цветов и т.п. Все указанные недостатки вносят существенные трудности при работе его обработке и распознавании.

В настоящее время популярными стали программы анализаторы, с помощью которых выполняется выделение отдельных объектов на изображении. Большинство программ-анализаторов стоятся на основе известных шаблонов: распознавание текста, чисел. Наиболее сложными считаются задачи, которые требуют распознавания объектов нерегулярной формы и случайны местом положения. Задача такого вида возникает при распознавании дефектов по цветной фотографии на образце, например, темплете от непрерывно-литой заготовки.

Постановка задачи исследования

В работе рассматривается задача оценки качества непрерывно-литой заготовки по цветной фотографии темплета. Показателями эффективности распознавания изображения принято считать: скорость распознавания и достоверность сегментации.

¹ Научные исследования выполняются при финансовой поддержке программы «У.М.Н.И.К.»

Достоверность сегментации снижается за счет существующих проблем:

- 1) наличие «шумов» – помех, возникающих, как правило, в процессе фотографирования, из-за недостатков светочувствительной части областей захвата фотоаппарата. Шумы достаточно сильно влияют на достоверность распознавания изображения;
- 2) поиск и выделение непрерывных объектов. Неравномерная освещенность объекта и оптические возможности фотоаппарата позволяют получить изображения с различной яркостью;
- 3) распознавания найденных дефектов, которые являются объектами нерегулярной формы и случайного положения. Дефекты, которые формируются при затвердевании непрерывно-литой заготовки, могут находиться в любой точке сечения или объема, и иметь непредсказуемую форму.

Указанные проблемы приводят к тому, что для распознавания таких изображений не возможно применять методы, основывающиеся на сравнении изображении с эталонными. Кроме того, помимо факта установления наличия дефекта выполняется их классификация согласно ОСТ 14-1-235-91.

Учитывая необходимость автоматизации распознавания и оценки фотографии темплета в системе оценки качества непрерывно-литой заготовки, была поставлена цель научного исследования: синтеза специального математического обеспечения пакетов прикладных программ и типового модуля оценки качества, обеспечивающего подсистему автоматизированной систему управления (АСУ) непрерывной разливки стали.

В качестве объекта исследования были выбраны машины непрерывного литья заготовок радиального типа, функционирующие условиях электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Предметом исследования является математическое и программное обеспечение второго уровня АСУ непрерывной разливки стали.

В ЭСПЦ выпускаются заготовки, сечение которых составляет 100×100 мм, 150×150 мм и 150×170 мм. Предполагается, что заготовка имеет прямоугольное сечение. В результате оценки после предварительной обработки (фрезеровки, шлифования и травления) темплет фотографируется и изображение после сжатия и преобразования в формат *pgn* (см. рис. в электронном виде) размещается в Хранилище. Авторами работы предлагает-

ся перед выполнением сжатия изображения выполнять его автоматизированное распознавание, снижающее влияние человеческого фактора на формирование оценки качества.

Для достижения цели были выделены задачи для решения:

- 1) определение и обоснование допущений для математического описания цветной фотографии темплета;
- 2) построение математического описания цветной фотографии темплета;
- 3) определение методов и разработка алгоритмов для шумоподавления и повышения контрастности цветного изображения;
- 4) определение методов и разработка алгоритмов для сегментации изображения с выделением непрерывных объектов нерегулярной формы и случайным местом расположения;
- 5) построение классификационной таблицы для дефектов заготовки;
- 6) разработка программной реализации эргатического анализатора для оценки внутренних дефектов заготовки.

Допущения для математического описания цветного изображения темплета непрерывно-литой заготовки

Для математического описания изображения примем следующие допущения, которые не изменяют семантической и физической сущности изучаемого объекта:

- 1) цветное изображение имеет растровое представление;
- 2) изображение имеет прямоугольную форму и для него вводится система координат, приведенная на рис. 1а, и единичный отрезок составляет один пиксель;
- 3) изображение ориентировано согласно правилу: верхняя граница изображения совпадает с сечением грани заготовки, расположенной со стороны малого радиуса машины непрерывного литья заготовок (рис. 1а);
- 4) изображение цветной фотографии совмещается со схемой расположения внутренних дефектов заготовки (рис. 1а);
- 5) на изображении вводится прямоугольная сетка с шагом Δh для разбиения фотографии на области с равномерной яркостью.

На рисунке 1 введены обозначения: Δh – шаг разбиения изображения на фрагменты; $ABFE$ (1) – область активного образования точечной неоднородности со стороны малого радиуса машины непрерывного литья заготовок; $MNOP$ (2) – область

формирования осевых дефектов (трещин и пористости); $GIKL / MNOP$ (3) – область формирования трещин, перпендикулярных граням заготовки; $ABCD / GIKL$ (4) – область формирования газовых пузырей при ведении разливки открытой струей.

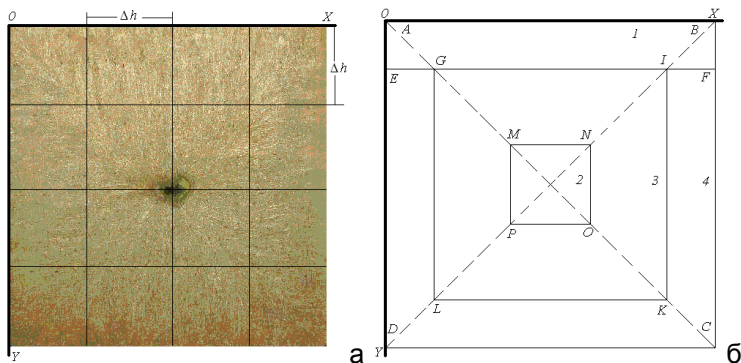


Рис. 1. Геометрическое представление изображения согласно введенным допущениям для цветной фотографии темплета

Математическое описание цветного изображения и критерии сегментации

Математическая модель цветного изображения содержит:

1) аналитическое описание границ областей изображения:

- область точечной неоднородности $ABFE$:
$$\begin{cases} 0 \leq x \leq b, \\ 0 \leq y \leq 0,16a; \end{cases}$$

- область осевых дефектов $MNOP$:
$$\begin{cases} 0,4b \leq x \leq 0,6b, \\ 0,4a \leq y \leq 0,6a; \end{cases}$$

- область трещин, перпендикулярных грани заготовки $GIKL - MNOP$, где $GIKL$:

$$\begin{cases} 0,2b \leq x \leq 0,8b, \\ 0,2a \leq y \leq 0,8a; \end{cases}$$

- область газовых пузырей $ABCD - (ABFE \cup MNOP)$, где a – высота заготовки, мм; b – ширина заготовки, мм;

2) аналитическое описание цветовой матрицы изображения:

$$f(x, y) = \frac{c(x, y)}{c_{max}}$$

где $f(x, y)$ – значение относительного цвета в точке с координатами (x, y) ; $c(x, y)$ – цифровой код цвета в точке с координатами (x, y) ; c_{max} – максимальный код цвета на изображении;

3) критерии однородности области нерегулярной формы:

$$|f(x, y) - f(x + 1, y)| < G;$$

$$|f(x, y) - f(x, y + 1)| < G,$$

где G – константа ограничения, определяемая эмпирическим путем.

4) выражения для определения характеристики изображения:

- критерий распознаваемости изображения: $f(x, y) < Q$;

- критерий контрастности изображения: $\max_{\substack{x \in [0, a] \\ y \in [0, b]}} \{f(x, y) - Q\} < G_{кр}$,

где Q – значение отношения Штреля; $G_{кр}$ – критическое значение разности между значением относительного цвета точки и отношением Штреля, при котором возможно выделение однородной области;

5) выражение для шумоподавляющей маски на изображении:

$$f'(x_0, y_0) = \sum_{x=x_0-1}^{x_0+1} \sum_{y=y_0-1}^{y_0} f(x, y) \cdot H(x, y)$$

где $f'(x_0, y_0)$ – функция относительного цвета после шумоподавления в точке с координатами (x_0, y_0) ; H – массив весовых коэффициентов, который может принимать один из возможных видов:

$$H = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} \text{ или } H = \frac{1}{10} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \text{ или } H = \frac{1}{9} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

6) выражение для бинаризации изображения:

- предварительное инвертирование изображения:

$$I(x, y) = \begin{cases} 1 - f'(x, y) & \text{при } Q - f'(x, y) > h, \\ 1 - Q & \text{для остальных случаев;} \end{cases}$$

- бинаризация изображения:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } I(x, y) > 1 - Q, \\ 0 & \text{для остальных случаев.} \end{cases}$$

Классификационные признаки

Распознавание цветного изображения темплета подразумевает не только его сегментацию, но определение принадлежности выделенных объектов нерегулярной формы к определенному виду дефектов сплошности и их балльную оценку согласно ОСТ 14 –1 – 235 – 91. Анализ экспериментальной базы данных изображений и содержания отраслевого стандарта позволили выполнить построение классификационной таблицы для оценки выделенных объектов нерегулярной формы на изображении темплета.

В качестве классификационных признаков определены виды внутренних дефектов, согласно ОСТ 14 –1 – 235 – 91 и анализу экспериментальных. В качестве характеристик признака выделены: место расположения области на изображении; геометрические характеристики объекта: длина, ширина, отношение длины объекта к его ширине, площадь максимального дефекта и относительные площадь и длина объектов, принадлежащих одной области разбиения изображения. Неформализованное описание классификационных признаков и характеристик приведено в табл. 1.

Таблица 1

Система неформализованного описания классификационных признаков внутренних дефектов непрерывно-литой заготовки по ОСТ 14 –1 – 235 – 91

Вид дефекта	Описание проявления дефекта на серном отпечатке или травленном темплете для заданного балла			
	Балл 1	Балл 2	Балл 3	Балл 4
Полоски и трещины по сечению	Единичные слегка намечающиеся полоски длиной до 5 % от толщины заготовки	Единичные или групповые (до двух групп) тонкие полоски длиной до 8 % толщины заготовки	Ликвационные полоски и трещины шириной ≈ 1 мм, длиной до 10 % (единичные до 15 % толщины заготовки)	Отдельные или групповые полоски и трещины шириной ≥ 1 мм, длиной более 10 % толщины заготовки
Осевые полоски и трещины	Слегка намечающиеся извилистые полоски в зоне длиной до 5 % от толщины заготовки	Полоски шириной до 0,5 мм в зоне длиной до 8 % от толщины заготовки	Извилистые полоски и трещины в зоне шириной ≈ 1 мм, длиной до 10 % (единичные до 15 %) от толщины заготовки	Извилистые полоски и трещины в зоне шириной ≥ 1 мм, длиной более 10 % от толщины заготовки
по углам	Слегка намечающиеся полоски дли-	Полоски шириной до 0,5 мм в зоне длиной до	Ликвационные полоски и трещины в зоне	Извилистые полоски и трещины в зоне

Вид дефекта	Описание проявления дефекта на серном отпечатке или травленном темплете для заданного балла			
	Балл 1	Балл 2	Балл 3	Балл 4
	ной до 5 % от толщины заготовки на 1 – 2 углах	8 % от толщины заготовки на 1 – 2 углах	шириной ≈ 1 мм, длиной до 10 % от толщины заготовки на 1 – 3 углах	шириной ≥ 1 мм, длиной более 10 % от толщины заготовки на 1 – 4 углах
Краевое точечное загрязнение	Единичные мелкие точки – включения диаметром до 1 мм	Повышенное количество точек – включений (отдельные диаметром более 1 мм) с ориентацией в виде «дорожки» протяженностью в пределах $\frac{1}{4}$ периметра темплетта	Много точек – включений, в том числе диаметром более 1 мм в виде «дорожки» протяженностью в пределах $\frac{1}{4}$ периметра темплетта	Много точек – включений, а также отдельных скоплений «дорожки» протяженностью в пределах периметра темплетта; возможно частичное распределение дефекта по сечению

Для классификации объектов нерегулярной формы на изображении предлагается к использованию классификационная табл. 2, в которой вводятся формализованные характеристики объектов.

В табл. 2 введены обозначения: КТЗ (ТН) – краевая точечная загрязненность (точечная неоднородность); ОТ – осевые трещины; ТПГ – трещины, перпендикулярные граням заготовки, УТ – угловые трещины; ГП – газовые пузыри; a – ширина максимального дефекта, мм; b – длина максимального дефекта, мм; Обл. – номер области, которой принадлежит дефект по рисунку 2б; S – площадь всех дефектов, мм²; $S_{отн}$ – процентное отношение площади всех дефектов к общей площади темплетта, %; $a_{отн}$ – процентное отношение ширины всех дефектов к ширине темплетта, %; $b_{отн}$ – процентное отношение длины всех дефектов к длине темплетта, %; S_{max} – площадь максимального дефекта, %; n – количество дефектов выбранного вида, шт.

Таблица 2

Классификационная таблица объектов нерегулярной формы на цветном изображении темплета

Вид де- фекта	Характеристики изображения											Балл
	a, мм	b, мм	Обл.	S, мм ²	S _{отн} , %	a _{отн} , %	b _{отн} , %	S _{max} , мм ²	$\frac{a}{b}$	$\frac{b}{a}$	n, шт	
КТЗ (ТН)	< 1	< 1	1, 4			< 5	< 5	<1	≈ 1	≈ 1	<10	0
	< 1	< 1	1, 4			< 10	<10	<1	≈ 1	≈ 1	<20	1
	> 1	> 1	1, 4			≈ 25	≈ 25	>1	≈ 1	≈ 1	<30	2
	> 1	> 1	1, 4			≈ 25	≈ 25	>1	≈ 1	≈ 1	<40	3
	> 1	> 1	1, 4			> 30	> 30	>1	≈ 1	≈ 1	≥40	4
ОТ	< 0,5	< 5	2	<10	<1	< 5	< 5	<3	≈ 1	≈ 1	<2	0
	< 0,5	< 10	2	<30	<3	≈ 5	≈ 5	<5	≈ 1	≈ 1	<5	1
	≈ 0,5	< 10	2	<70	<7	≈ 8	≈ 8	<6	≈ 1	≈ 1	<10	2
	≈ 1	< 10	2	<400	<40	>10	>10	<15	≈ 1	≈ 1	<25	3
	>1	≥ 10	2	≥400	≥40	>15	>15	≥15	≈ 1	≈ 1	≥25	4
ТПГ	< 0,5	< 5	3	<10	<1	< 5	< 5	<3	> 2	> 2	<3	0
	< 0,5	< 10	3	<30	<3	≈ 5	≈ 5	<5	> 2	> 2	<5	1
	≈ 0,5	< 10	3	<70	<7	≈ 8	≈ 8	<6	> 2	> 2	<10	2
	≈ 1	< 10	3	<400	<40	>10	>10	<15	> 2	> 2	<25	3
	>1	≥ 10	3	≥400	≥40	>15	>15	≥15	> 2	> 2	≥25	4
ГП	> 3	> 3	1, 4			< 5	< 5	<25	> 1,5	> 1,5	0	0
	> 3	> 3	1, 4			< 10	<10	<100	> 1,5	> 1,5	<3	1
	> 3	> 3	1, 4			≈ 25	≈ 25	<625	> 1,5	> 1,5	<10	2
	> 3	> 3	1, 4			≈ 25	≈ 25	<625	> 1,5	> 1,5	<20	3
	> 3	> 3	1, 4			> 30	> 30	>900	> 1,5	> 1,5	≥20	4

Заключение

В работе выполнен математический анализ изображений серных отпечатков с низкой контрастностью и объектами нерегулярной формы, включающий получение изображения в электронной форме, удаление шумов, сегментацию изображения и классификацию объектов, разработку эргатической подсистемы управления качеством непрерывно-литой заготовки по серному отпечатку темплета.

Предложены математическая модель и критерии распознавания объектов, характеризующих дефекты заготовки, на фоне изображения серного отпечатка с низкой контрастностью. Модель и критерии, в отличие от известных, учитывают нерегулярность и случайность расположения объектов, низкую контрастность изображения, что позволяет автоматизировать процесс получения экспертной информации, отвечающей требованиям отраслевого стандарта.

УДК 669.18..046.55

**А.И.Блохин, Е.А.Хренов,
Н.М.Баженов, А.И.Сергеев**

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАСКИСЛЕНИЯ СТАЛИ В АГРЕГАТЕ ПЕЧЬ-КОВШ

За основу расчета массы раскислителей принята методика, предложенная ранее при раскислении стали в ковше для двухванной сталеплавильной печи [1].

Исследования проводились для трех наиболее часто выплавляемых марок стали в кислородно-конвертерном цехе ОАО «ММК»: 09Г2С; 20СП; 08Ю. Для полного представления хода плавки и для получения новых коэффициентов, уменьшающих ошибку расчетов, было проанализировано более двадцати паспортов плавок для каждой марки стали. По этим данным была рассчитана теоретическая масса ферросплавов $G_{R_{теор}}$, которая сравнивалась с реально вводимым количеством ферросплавов. Средняя ошибка между теоретически рассчитанной массой ферросплавов $G_{R_{теор}}$ и практически вводимой G_R сводится к ми-

нимому за счет дополнительных коэффициентов идентификации, которые имеют разные значения для разных марок стали.

Были выполнены расчеты массы ферросилиция для марок стали 09Г2С и 20СП и расчет массы ферромарганца для стали марки 08Ю. Эти расчеты показали, что существует отклонение результатов расчетов от реально засыпанного количества ферросплавов (G_R). Анализ полученных результатов показал, что эта ошибка зависит от температуры перегрева металла над линией Ликвидус. С помощью метода наименьших квадратов была получена функциональная зависимость между ошибкой расчетов и перегревом металла над линией Ликвидус (Δt):

$$\Delta G = K_3 + K_4 \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Коэффициенты линии регрессии K_3 и K_4 , рассчитанные для трех указанных марок стали, приведены в таблице 1.

Уравнение расчета количества раскислителей с учетом поправочных коэффициентов имеет вид:

$$G_R = \frac{G_n (R_{зад} - R_{ост}) \cdot 100}{(100 - (K_1 + K_2 \cdot \Delta t)) M_R} - (K_3 + K_4 \cdot \Delta t), \quad (2)$$

где G_n - масса плавки, т;
 $R_{зад}$, $R_{ост}$ - содержание элемента-раскислителя в стали, соответственно заданное и остаточное, %;
 K_1 , K_2 - коэффициенты идентификации;
 Δt - перегрев над линией ликвидус, °С;
 M_R - содержание элемента-раскислителя в присаживаемом раскислителе, %.

Таблица 1 – Значение коэффициентов уравненной линии регрессии для различных марок стали

Марка стали	K_3	K_4	Примечание
09Г2С	0,0661	-0,0006	для [Si]
20сп	0,0875	-0,0008	для [Si]
08Ю	0,0632	-0,0012	для [Mn]

При расчете количества ферросплавов по формуле (2), средняя ошибка расчетов практически равна нулю, что говорит о

возможности применения данной формулы в реальных условиях.

Алгоритм решения рассматриваемой задачи должен обеспечить расчет и графическое представление результатов рассчитанного количества ферросплавов, необходимых для раскисления и легирования металла в агрегате печь-ковш.

Основное рабочее окно содержит список всех основных параметров, необходимых для дальнейшей работы и приведено на рисунке 1.

Текущий химический состав стали:										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N ₂	
0,0972	0,683	1,5	0,025	0,025	0,3	0,3	0,3	0,035	0,008	

Желаемые параметры массовых долей элементов в готовой стали:										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N ₂	
0,1	0,7	1,5	0,025	0,025	0,3	0,3	0,3	0,035	0,008	

Рис.1 – Окно рабочей программы расчета раскислителей

Расчет требуемого количества ферросплава производится по следующей схеме:

- выбираем марку стали которую необходимо обработать на УПК:

а) если программа работает в ручном режиме, то заполнение данных о текущем химическом составе производится технологом-оператором;

б) если программа работает в автоматическом режиме, то заполнение данных о текущем химическом составе производится автоматически с сервера ИВЦ ККЦ;

- сверяем данные добавляемого ферросплава с базой данных ферросплавов и запоминаем основную его характеристику (MR - процентное содержание легирующего элемента в ферросплаве), если данная характеристика не совпадает с ре-

альным значением, то имеется возможность его ручного изменения;

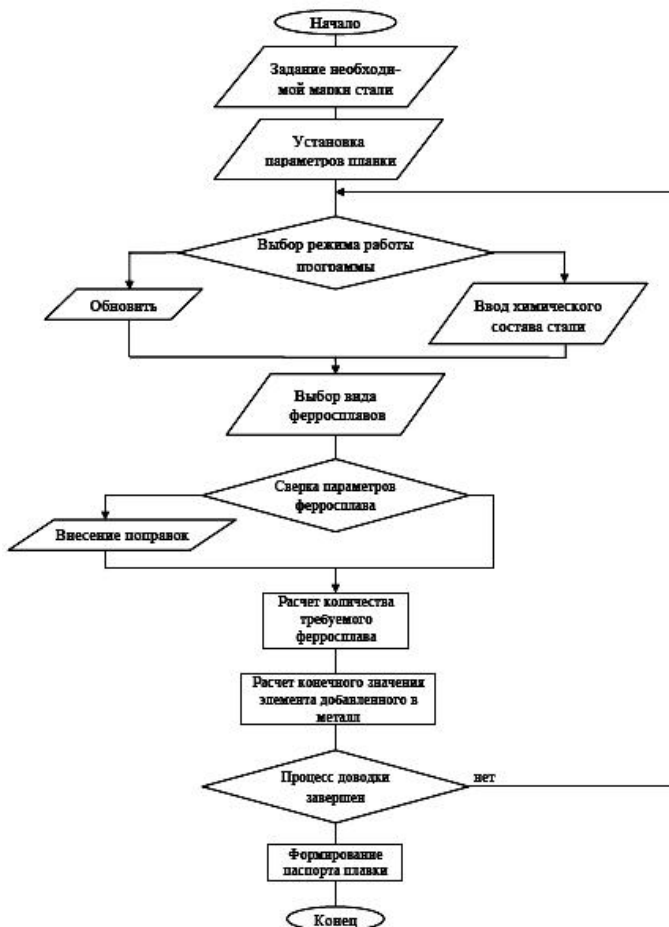


Рис.2 – Блок-схема алгоритма расчета массы присаживаемого ферросплава

- сверяем параметры расплава и запоминаем основные его характеристики (G_n - масса металла, т; R_z - процентное содержание элемента в готовом металле, %; R_o - процентное содержание элемента перед раскислением–легированием);

- по формуле (2) рассчитываем $G_{\text{Ртеор}}$ - искомый вес ферросплава, кг;

- запоминание результатов в базе данных;

- вывод информации на экран.

Кнопка «Обновить» необходима для обновления химического состава после повторной пробы металла. Кнопка «Загрузить» служит для обмена данными с рабочей машиной WinCC1.

Блок – схема задачи представлена на рисунке 2.

При внедрении системы автоматического расчета массы раскислителей в зависимости от параметров стали перед раскислением повышается точность определения массы добавляемого ферросплава и уменьшается удельный расход раскислителей на тонну слябов.

БЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блохин А.И., Баженов Н.М., Сергеев А.И., Сарычев А.Ф. Управление процессом раскисления стали в двухванном сталеплавильном агрегате. //Автоматизация технологических и производственных процессов. Сб. научных тр. – Магнитогорск МГТУ, 2006. – с. 72-76.

УДК 621.745.35

И.М. Ячиков

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ВАННЕ РАСПЛАВА ДППТ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ И ОТКЛЮЧЕНИИ ТОКА ДУГИ

Футеровка подины электродуговых печей испытывает резкие колебания температуры (600 - 1800 °С/ч при высоком абсолютном уровне их значений), механические удары, разъедающее химическое воздействия жидкого металла и шлака, большие тепловые нагрузки (200 кВт/м² и более) [1]. Кроме этого, в дуговой печи постоянного тока (ДППТ) главной причиной повышенного износа футеровки в районе подового электрода является интенсивное движение металла, возникающее под действием объемных электромагнитных сил [2]. Электровихревые течения «вымывают» футеровку в

области подового электрода, что приводит к более частым ее ремонтам и может служить причиной прорыва металла через подину.

В работе [3] посредством математического моделирования электровихревых течений (ЭВТ) в ванне ДППТ показано, что при установившемся течении вблизи подового электрода в меридиональной плоскости находится быстровращающийся вихрь, который определяет высокие скорости расплава вблизи подины (рис. 1, а). В ДППТ, имеющей два подовых электрода, возникает течение и в горизонтальной плоскости. Анализ азимутальной составляющей объемных электромагнитных сил, проведенный в работе [4], показывает, что над поверхностью подовых электродов образуется два вихря (рис. 1, б).

Для печи с одним подовым электродом воздействовать на ЭВТ без отключения тока дуги довольно сложно. При двух электродах такая возможность появляется. На ДППТ ОАО «Курганмашзавод» «сброс» вихрей осуществляется посредством периодического поочередного снижения токов I_1 и I_2 через подовые электроды (рис. 1, в). Необходимо отметить, что на практике период включения и выключения токов с целью подавления вихрей в районе подовых электродов подбирается эмпирически, так как неизвестен характер и динамика ЭВТ при изменении токов в данных печах.

Целью данной работы является изучение формирования переходных электровихревых течений при включении тока и при его отключении.

Для расчета ЭВТ в ванне ДППТ использовалась компьютерная программа, рассмотренная в работе [3]. В качестве объекта моделирования была выбрана трехтонная сталеплавильная ДППТ стандартной конфигурации, имеющая следующие параметры: радиус ванны на уровне поверхности расплава и подины $R_e=840$ мм и $r_e=500$ мм соответственно; высоты - $h_e=340$ мм, угол ее откосов - $\varphi_0=45^\circ$, радиус подового электрода - 100 мм. Проведены расчеты при электропроводимости расплава - $\sigma=6 \cdot 10^5$ (Ом·м)⁻¹, его плотности $\gamma=7000$ кг/м³ и динамической вязкости $\eta=0,006$ Па·с.

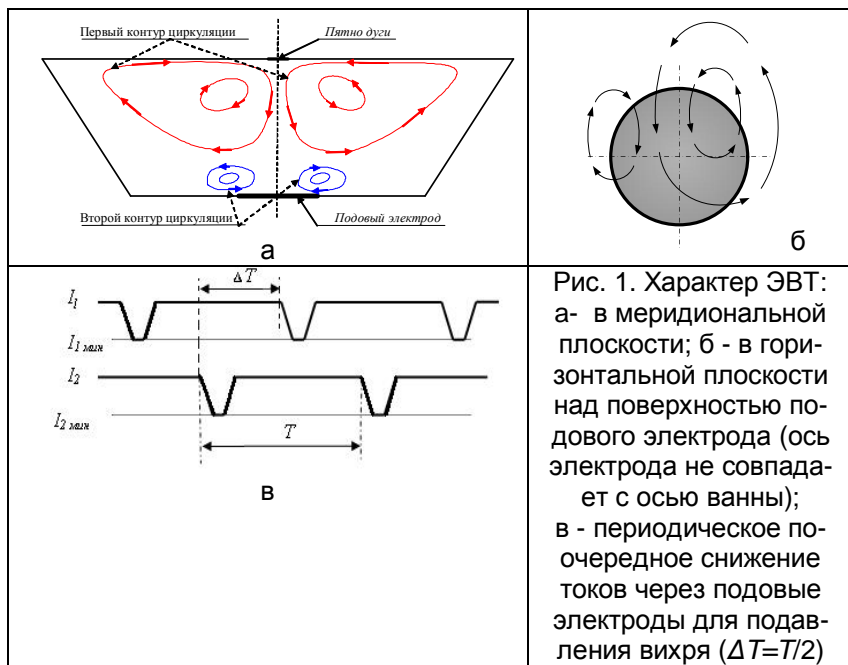


Рис. 1. Характер ЭВТ: а - в меридиональной плоскости; б - в горизонтальной плоскости над поверхностью подового электрода (ось электрода не совпадает с осью ванны); в - периодическое очередное снижение токов через подовые электроды для подавления вихря ($\Delta T = T/2$)

После подачи тока через ванну расплава начинают развиваться ЭВТ, причем считаем, что в начальный момент времени жидкость неподвижна. Посредством компьютерного моделирования получено, что течение устанавливается (с точностью до 1 %) за 2 - 4 секунды, причем, чем больше ток, тем это время меньше. На рис. 2 показано распределение горизонтальной составляющей скорости по радиусу ванны в разные моменты времени после включения тока (1 кА). Видно, что на поверхности ванны (рис. 2, в) интенсивное течение расплава начинается в области близкой к ее оси на расстоянии от нее равном 2 - 3 радиуса пятна дуги. Далее в активное движение вовлекается центральная область ванны радиусом около $R_0/4$.

Интересно поведение расплава вблизи подового электрода (рис. 2, а, б): в начальные моменты времени течение направлено к оси ванны, скорость расплава увеличивается, достигает максимума, далее постепенно направление скорости меняется на противоположное. При этом установившаяся скорость становится на порядок выше. Связано это с наличием двух вихрей циркуляции: более мощного формируемого вблизи пятна дуги и

более слабого - вблизи подового электрода.

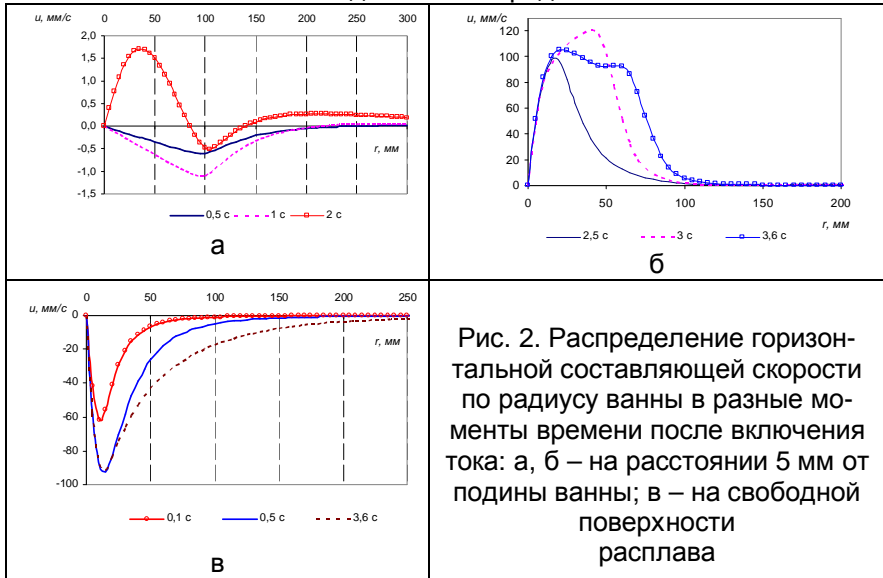


Рис. 2. Распределение горизонтальной составляющей скорости по радиусу ванны в разные моменты времени после включения тока: а, б – на расстоянии 5 мм от подины ванны; в – на свободной поверхности расплава

Если далее убрать источник объемных электромагнитных сил, выключив ток, то расплав по инерции продолжает движение. Естественно, что под действием сил вязкости оно постепенно затухает: через 10 секунд после выключения тока скорости падают примерно в 20 раз, а через минуту ее движение почти полностью прекращается (с относительной точностью $5 \cdot 10^{-3}$). На рис. 3 показано распределение горизонтальной составляющей скорости по радиусу ванны в разные моменты времени после выключения тока вблизи подины ванны и на ее поверхности. Видно как с течением времени экстремальные значения скоростей уменьшаются и удаляются от центра ванны, причем скорость расплава, вблизи подины замедляется за первые 10 секунд в пять раз, а за 25 секунд в десять раз (рис. 4).

Если известна скорость жидкости W_0 в момент τ_0 выключения тока, то затухание скорости $W(\tau)$ с течением времени хорошо описывается следующим регрессионным уравнением:

$$W(\tau - \tau_0) = aW_0(\tau - \tau_0)^{-b},$$

где a, b — константы.

Результаты моделирования течения расплава в различные моменты времени после выключения тока представлены в

виде диаграмм функции тока на рис. 5. Видно, что характер движения, в общем, не меняет своей структуры. С течением времени ось основного вихря смещается в сторону боковой стенки ванны, причем диффузия завихренности скорости происходит следующим образом: более закрученные области жидкости отдают за счет вязкости свою энергию менее закрученным областям, и лишь после этого все движение расплава в ванне плавно успокаивается.

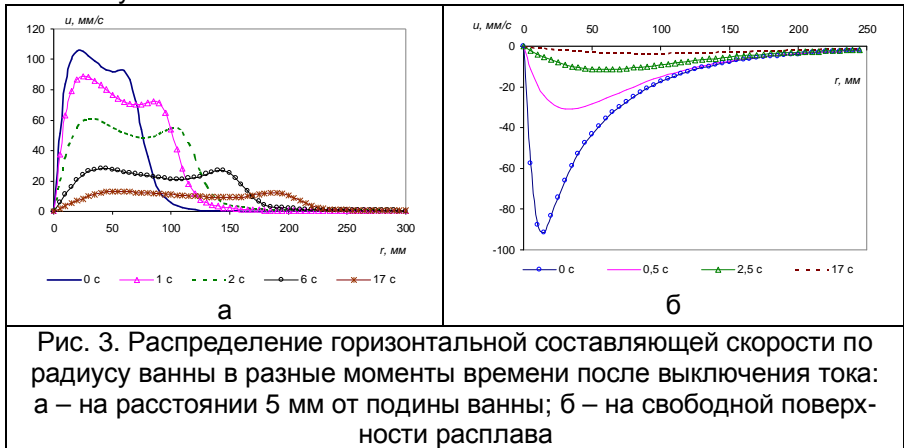


Рис. 3. Распределение горизонтальной составляющей скорости по радиусу ванны в разные моменты времени после выключения тока: а – на расстоянии 5 мм от подины ванны; б – на свободной поверхности расплава

При разной геометрии ванны ДПТТ и свойствах расплава важно установить подобие переходных процессов с учетом того, что объемные электромагнитные силы пространственно неоднородны. Сделаем это с помощью вводимого ниже коэффициента подобия k .

Характерное время τ_0 установления ЭВТ не является величиной, определяющей течение. В работе [5] показано, что оно может зависеть от силы тока, геометрических размеров ванны и свойств расплава. Рассмотрим уравнение переноса импульса с учетом электромагнитных сил

$$\gamma \left[\frac{\partial \vec{W}}{\partial \tau} + (\vec{W} \text{ grad}) \vec{W} \right] = -\text{grad } P - \gamma \vec{g} + \eta \nabla^2 \vec{W} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

и оценим его нестационарный и электромагнитный члены

$$\gamma \frac{\partial W}{\partial \tau} \sim \gamma \frac{W_0}{\tau_0} \frac{\partial W^*}{\partial \tau^*},$$

$$\vec{J} \times \vec{B} \sim \frac{I_0}{L_0^2} \cdot \frac{I_0 \mu_0}{L_0} \vec{J}^* \times \vec{B}^* = \frac{I_0^2 \mu_0}{L_0^3} \vec{J}^* \times \vec{B}^*,$$

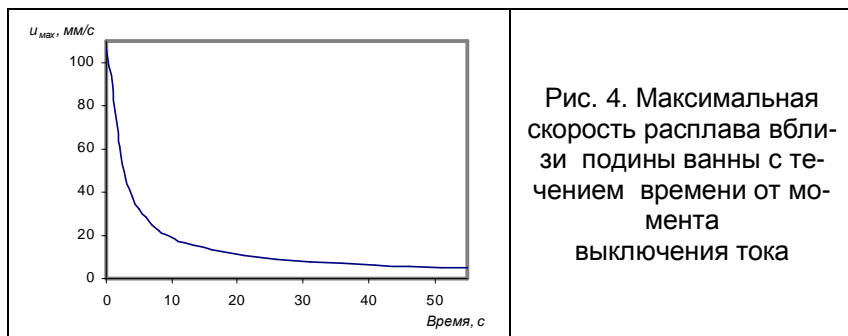


Рис. 4. Максимальная скорость расплава вблизи подины ванны с течением времени от момента выключения тока

где L_0 , W_0 , I_0 - характерные параметры (размер, скорость и ток соответственно); индекс «*» относится к безразмерным величинам. При подобии процессов, связанных с изменением скорости жидкости под действием только электромагнитных сил, должно

выполняться равенство $\gamma \frac{W_0}{\tau_0} = \frac{I_0^2 \mu_0}{L_0^3}$. Полагая $\tau_0 = L_0/W_0$, получим

$$\tau_0 = \frac{L_0^2}{I_0} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_0}}. \quad (2)$$

Правомерность этой оценки подтверждает и компьютерное моделирование, из которого установлено, что время выхода на стационарный режим течения увеличивается с увеличением глубины h_g и диаметра ванны D_g и уменьшением тока дуги.

Рассчитав или определив экспериментально характерное время переходного процесса τ_0 в модельной ванне, можно определить коэффициент подобия:

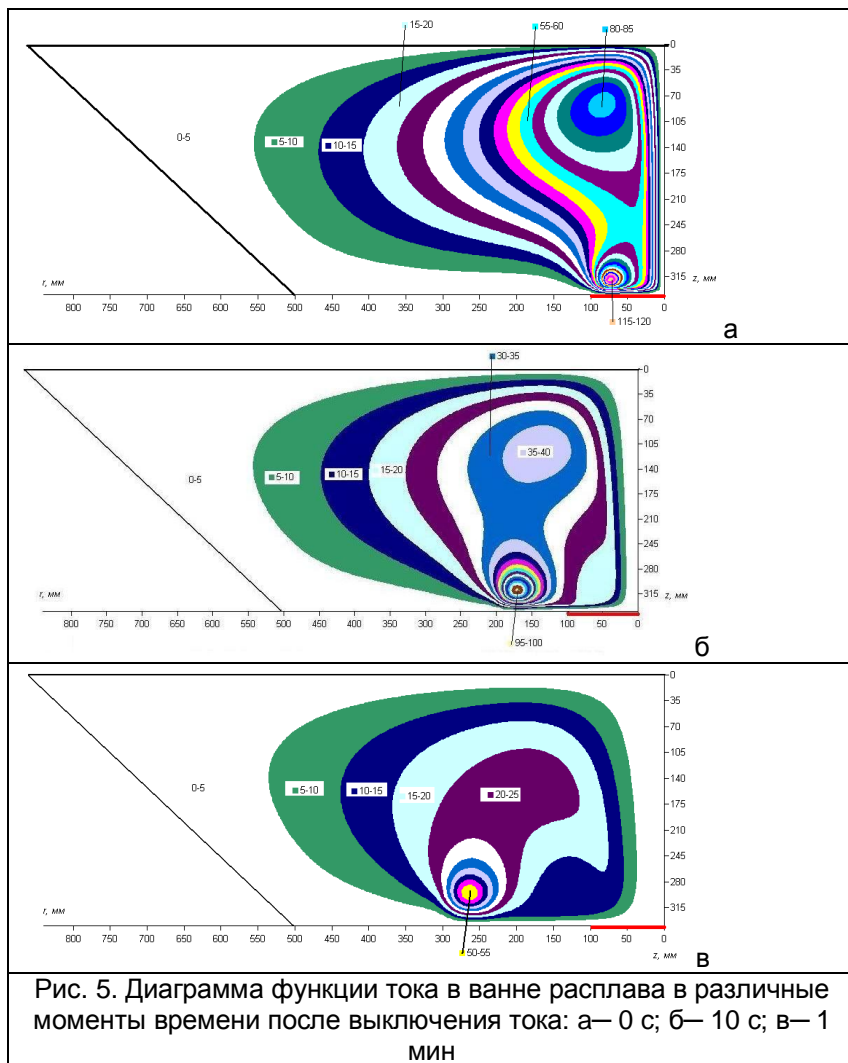
$$k = \frac{\tau_0 \cdot I_0}{L_0^2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\gamma}}, \quad (3)$$

где в качестве характерного тока выступает ток дуги ($I_0 = I_d$), а условный характерный размер ванны L_0 можно определить как

$$L_0 = \sqrt[3]{D_g^2 h_g}. \quad (4)$$

Коэффициент k характеризует геометрию ванны и условия токоподвода. Определив его, можно оценить время переходных процессов и при других геометрических и технологических условиях как

$$\tau = k \frac{L^2}{I} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_0}}. \quad (5)$$



Выводы. Таким образом, с помощью компьютерного моделирования проанализировано образование и движение вихрей в районе подового электрода при включении и отключении тока дуги. Получено, что для 3 т сталеплавильной печи после подачи тока время установления течения расплава составляет 2 – 4 с, а после выключения тока порядка 10 с. Определено подобие переходных процессов и характерное время установ-

ления электровихревых течений (2). Время всех переходных процессов с участием ЭВТ растет с увеличением характерного размера ванны и уменьшением тока (5). Данные результаты могут быть использованы для выбора параметров управления токами через подовые электроды для «сброса» вихрей, как в действующих, так и в реконструируемых и новых дуговых печах постоянного тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оборудование и проектирование электросталеплавильных цехов/ Л.Е. Никольский, И.Ю. Зинуров. М.: Metallurgia, 1993. – 272 с.
2. Моделирование электровихревых течений в ванне электродуговой печи постоянного тока/ И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. - 231 с.
3. Ячиков И.М. Моделирование электровихревых течений в ванне расплава дуговой печи постоянного тока //Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2009, №1. - С. 42 - 48.
4. Ячиков И.М., Манагаров В.Н. Моделирование объемных электромагнитных сил в ванне расплава ДППТ// Вестник Самарского государственного университета. –2008, №6 (65). - С. 330 - 340.
5. Дементьев С.Б., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П. и др. К вопросу о формировании электровихревых течений при многоэлектродном токоподводе// Магнитная гидродинамика. – 1988, № 4. – С. 121 - 125.

УДК 669.162

И.Г. Корнилова, Р.Р. Абдрахманов

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

Сушка представляет собой процесс обезвоживания продуктов обогащения, основанный на испарении содержащейся в них влаги в окружающую среду при нагревании сушеного продукта. При сушке происходит тепло- и влагообмен между поверхностью сушеного материала и средой.

Сушильные барабаны работают на природном газе. Применение твердого топлива сильно осложняет процесс сушки. Поэтому наиболее желательным с позиции автоматизации процесса сушки является жидкое или газообразное топливо.

С позиции регулирования сушильный барабан должен рассматриваться как весьма инерционный объект с большой емкостью. Кроме того, регулирование процесса осложняется тем, что внутри барабана параметры процесса сушки и свойства концентрата не только изменяются во времени, но и зависят от расположения в рабочем пространстве сушилки. Это так называемый объект с распределенными параметрами.

Для сушильного барабана целесообразен, видимо, принцип регулирования по основным возмущениям. Однако на практике сушильные агрегаты с сушильными барабанами обычно работают в режиме дистанционного регулирования.

Режим сушки оценивается главным образом по следующим параметрам: производительность сушилки, начальная и конечная влажность концентрата, расход газа и воздуха на его сжигание, температура дымовых газов на входе в барабан и на выходе из него.

Поддержание температуры в рабочем пространстве сушильного барабана на оптимальном уровне способствует экономичности работы сушильного барабана, что в свою очередь прямо влияет на себестоимость выпускаемой продукции,

уменьшение вредных выбросов в атмосферу и повышению качества медно-цинкового концентрата.

Автоматическое регулирование технологических процессов при сушке концентратов предназначено для получения максимальной производительности сушильного барабана при соблюдении заданной величины влажности сухого концентрата и минимальном удельном расходе топлива и электроэнергии, расходуемых на 1 т готового продукта. Эти показатели в той или иной мере могут быть достигнуты несколькими способами в зависимости от наличия необходимых технических средств контроля и регулирования, а также от компоновочных технологических решений.

Экспериментальным путем установлено, что температура теплоносителя в отдельных точках вдоль оси барабана находится в определенной зависимости с абсолютной влажностью концентрата в этих точках. Однако ввиду большого времени запаздывания температура теплоносителя на выходе из сушильного барабана полностью не отражает состояние параметра влажности концентрата.

Регулирующее воздействие по температуре нужно брать в такой точке барабана, где запаздывание сигнала будет самым незначительным при условии, что эта температура будет снята в точке, где начинается зона подсушки концентрата. Можно считать, местом установки термопары для этой цели является точка, удаленная от начала барабана на $20 \div 25\%$ его длины. Количество кека, вводимого в барабан, и влажность кека может меняться. Поэтому термопара, установленная в барабане в точке перед зоной подсушки, будет фиксировать изменение температуры теплоносителя с наименьшим временем запаздывания.

В настоящее время в промышленности используются различные способы автоматического управления процессом сжигания топлива, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, но все они основаны на качестве сжигания топлива.

Количество сжигаемого топлива определяется не только производительностью сушильного барабана, но и в значительной степени способами его сжигания. Сюда относятся, в частности, изменение теплоты сгорания топлива в зависимости от его состава, импульсное сжигание.

Решить поставленную задачу можно с помощью применения системы экстремального регулирования.

Для оптимизации управления инерционными с запаздыванием технологических процессов наиболее приемлемыми спо-

собами поиска экстремума являются методы с запоминанием экстремума выходного параметра или запоминанием экстремума производных (обычно первых) выходного контролируемого параметра и остановкой ИМ в момент достижения экстремума скорости.

Ориентированная на применение свободно программируемого микропроцессорного контроллера система оптимизации управления тепловым режимом в рабочем пространстве сушильного барабана включает в себя три взаимосвязанных контура управления:

- контур стабилизации заданного текущего значения ведущего температурного параметра управляемого процесса;
- контур оптимизации управления процессом сжигания топлива в пространстве сушильного барабана;
- контур оптимизации управления газодинамическим режимом (давлением) в пространстве сушильного барабана, являющейся ведомым по отношению к двум ранее названным контурам.

Отличительной особенностью рассматриваемой здесь системы оптимизации является ее ориентация на программную реализацию в пределах одного микропроцессорного программируемого контроллера.

В реальных производственных условиях текущее положение и вид статической характеристики инерционного с запаздыванием оптимизируемого процесса, как правило, не определен. Поэтому САО анализирует только текущий отклик оптимизируемого процесса на предыдущее управляющее входное воздействие, определяя последующее управляющее воздействие в соответствии с принятым оптимизирующим алгоритмом управления для достижения и поддержания оптимального теплового режима.

Система автоматического контроля и управления тепловым режимом сушильной печи обеспечивает решение следующих задач:

- обеспечение условий для эффективного сжигания топлива с целью получения максимально возможного усвоения тепла материалом.
- регулирование температуры рабочего пространства печи на предельно допустимом (по условиям огнеупорности материала) значении температуры (900°C).

Упрощенная структурно-функциональная схема системы оптимизации управления тепловым режимом в рабочем про-

странстве сушильного барабана с целью минимизации удельного расхода топлива приведена на рисунке.

В качестве контролируемого температурного параметра оптимизируемого процесса используется температура греющей среды (факела) на входе сушильного барабана, измеряемая термоэлектрическим датчиком температуры (термопарой).

Температура в рабочем пространстве сушильного барабана измеряется датчиком температуры ДТ. На выходе ДТ формируется сигнал $t_T(\tau)$, пропорциональный текущему значению контролируемого температурного параметра. Этот сигнал одновременно подается на вход элемента сравнения ЭС и на вход дифференцирующего устройства ДУ.

На выходе элемента сравнения ЭС формируется сигнал рассогласования $\varepsilon(\tau) = t_{зАд}(\tau) - t_T(\tau)$, подаваемый на вход ПИ-регулятора контура стабилизации.

На выходе дифференцирующего устройства ДУ формируется сигнал производной $\frac{dt_T(\tau)}{d\tau} = dt_T(\tau)$, который подается на

вход оптимизирующего алгоритма управления контура оптимизации управления процесса сжигания топлива.

На выходе ПИ-регулятора формируется сигнал для управления исполнительным механизмом ИМ₁, перемещающим регулируемую заслонку (клапан) топлива РЗТ для изменения текущего расхода топлива.

На выходе ОАУ формируются управляющая функция $U_2(\tau)$ и переключающая функция $\sigma_2(\tau)$ для управления исполнительным механизмом ИМ₂, который перемещает вал регулирующей заслонки воздуха РЗВ.

Таким образом, для управления процессом сжигания топлива теплогенератора используется:

- один входной информационный канал – текущее значение контролируемого температурного параметра $t_T(\tau)$ и его производная;

- два выходных управляющих канала, где осуществляется управляющее воздействие на технологический процесс с использованием двух исполнительных механизмов постоянной скорости: ИМ₁ – для регулирования расхода топлива; ИМ₂ – для регулирования расхода воздуха.

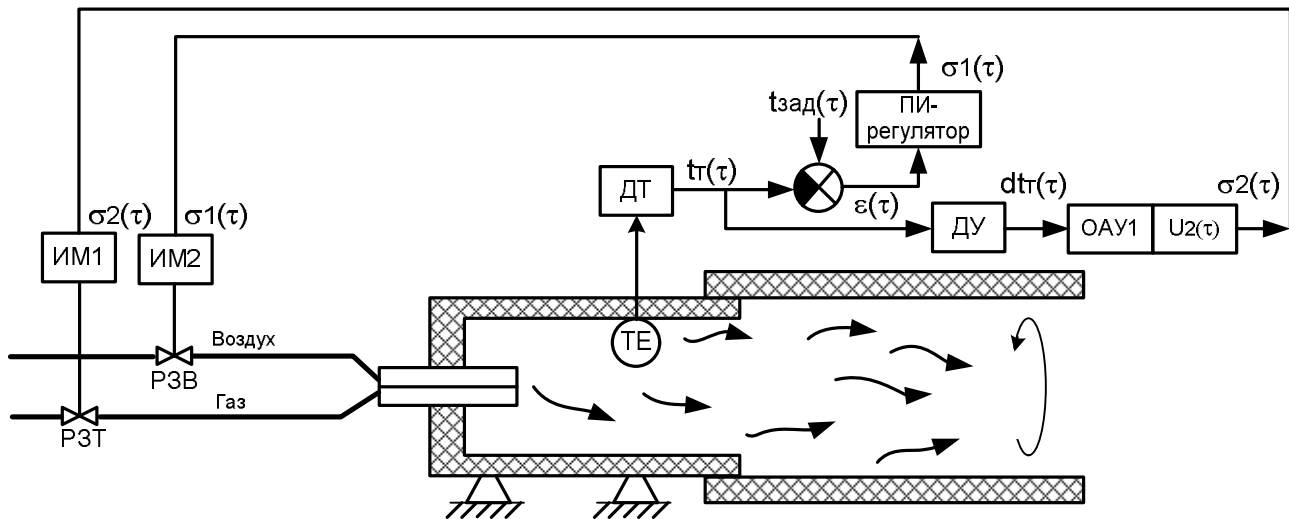


Рис. Структурно-функциональная схема системы оптимизации управления тепловым режимом в рабочем пространстве сушильного барабана

РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЕМ ГОРЕЛОК БАШЕННОЙ ПЕЧИ АНГЦ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ РАДИАНТНЫХ ТРУБ

В настоящее время одной из главных проблем АНГЦ является выход из строя дорогостоящих радиантных труб. Для решения данной проблемы необходимо обнаружить и устранить причину прогара труб, однако, на практике не удаётся выявить какую – либо конкретную причину, поскольку выход из строя труб не поддается математическому описанию и носит хаотический характер. С целью выяснения причины и поиска решения данной проблемы был произведен анализ данных о режиме работы и выходе из строя радиантных труб за аналогичные периоды 2007 и 2008 годов.

В результате анализа данных было выявлено четыре основных фактора, оказывающих влияние на продолжительность срока службы труб:

- загруженность горелок;
- частота переключений горелок;
- скопление кокса на внутренней поверхности трубы;
- прочие не учтенные факторы.

По результатам статистической обработки данных было определено, в каком процентном соотношении данные факторы влияют на продолжительность срока службы труб: порядка 32% влияния оказывает загруженность горелок, около 53% - частота переключений и значительно меньшее влияние оказывают два других фактора.

Однако если рассмотреть те же данные в абсолютных величинах, то можно отметить, что число вышедших из строя труб в 2008 году возросло на 71% с 38 до 65 труб по сравнению с 2007. Этот факт объясняется сменой поставщика труб с Итальянской фирмы Термокаст на Подмосковную фирму Перол. При этом срок службы труб сократился с 2-3 лет до 2-3 месяцев. Это позволяет сделать вывод, что качество самих труб играет определяющую роль в проблеме выхода радиантных труб из строя.

Также немаловажным и требующим особого внимания, является тот факт, что чаще всего разрывы происходят на ниж-

ней части трубы. Это объясняется тем, что нижняя часть трубы подвергается большей тепловой нагрузке из-за интенсивного нагрева от нижерасположенных труб.

Было установлено, что 63,2% отказавших труб располагались над постоянно включенными горелками, что могло привести к перегреву нижней части трубы и её прогару.

Также было выявлено, что горелки, отказавшие по причине перегрузки, являлись в основном горелками первого шага управления, а трубы вышедшие из строя из-за переключений относились ко второму и третьему шагам.

Из всего сказанного следует вывод, что существующая система не способна обеспечить оптимальное управление горелками.

В связи с этим была разработана система, которая будет обеспечивать, во-первых, исключение ситуаций, когда одновременно включены рядом расположенные по высоте горелки. Во-вторых, максимально равномерную загрузку горелок.

С этой целью было разработано две таблицы распределения включенных горелок по шагам управления.

Таблица 1 – Распределение включения горелок по шагам управления «таблица 1»

Зона	Шаг	Горелка																						
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	1																							
	2																							
	3																							
2	1																							
	2																							
	3																							
3	1																							
	2																							
	3																							
4	1																							
	2																							
	3																							
5	1																							
	2																							
	3																							
6	1																							
	2																							
	3																							
7	1																							
	2																							
	3																							
8	1																							
	2																							
9	1																							
	2																							

Таблица 2 – Распределение включения горелок по шагам управления «таблица 2»

Зона	Шаг	Горелка																						
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	2						■			■		■		■		■		■		■		■		■
	3																							
2	1	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	2		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	
	3																							
3	1	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	2		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	
	3																							
4	1	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	2		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	
	3																							
5	1	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	2		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	
	3																							
6	1		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	
	2	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	3																							
7	1																							
	2	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	3																							
8	1	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	2		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	
9	1	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■
	2		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■	

В отличие от существующей системы управления предусмотрено две таблицы, распределения включения горелок по шагам управления в которых является, по сути «зеркальным отражением» друг друга. Таким образом, горелки, которые очень редко включаются по «таблице 1», т.е. относятся ко второму и третьему шагам управления, являются постоянно задействованными в «таблице 2», включаясь на первом шаге управления, и наоборот.

Предлагаемая стратегия управления позволяет уменьшить влияние включенных снизу горелок, т.к. стремиться исключать ситуации, когда одновременно включены горелки расположенные друг над другом, что наглядно показано на рисунке 1.

Кроме того, данная система предусматривает переключение с одной таблицы на другую с периодичностью в 10 минут, стремясь обеспечить равномерную загрузку горелок, как по времени работы, так и по числу переключений.

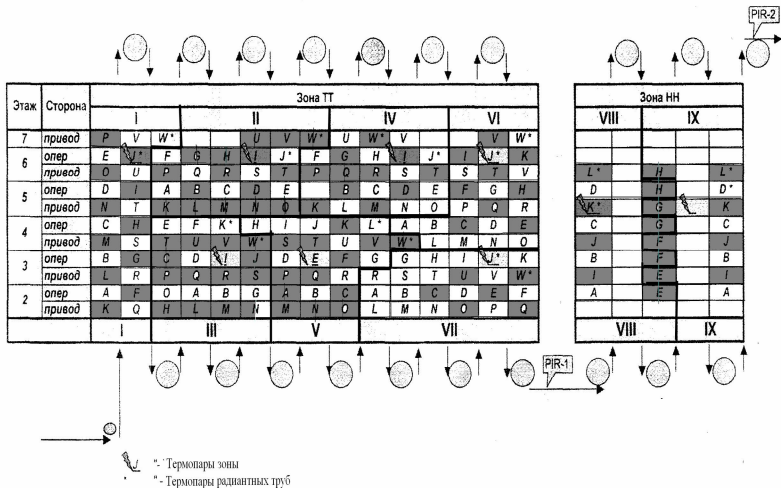


Рисунок 1 – Расположение включенных горелок на первом шаге управления по «таблице 1»

Такое управление позволит более равномерно загружать горелки, обеспечивая выравнивание времени работы горелок и числа их включения, а также предотвратит охлаждение труб, что позволит увеличить срок службы дорогостоящих радиантных труб и уменьшить количество вышедших из строя горелок.

УДК 669.162.2.012

В.В. Гребеникова, Рябчикова Е.С.

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ПЕРИОДОВ ДУТЬЯ ДЛЯ ГРУППЫ БЛОКОВ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Повышение температуры нагрева дутья для доменных печей является эффективным способом снижения расхода такого дефицитного энергоносителя, как скиповый кокс. Эффект от повышения температуры дутья с ее ростом снижается. Температуры дутья на ММК находятся в диапазоне от 1100 до 1250 °С. При этом дополнительные 100 °С нагрева дутья дают экономию

кокса порядка 2,5 %, что оправдывает дальнейшее совершенствование режимов работы доменных воздушонагревателей [1].

Другим способом повысить эффективность работы блока доменных воздушонагревателей является выбор рациональных длительностей периодов дутья аппаратов. На “ММК”, как правило, поддерживают одинаковые длительности периодов дутья, несмотря на то что возможности и характеристики аппаратов различаются и температура которую может обеспечить каждый аппарат к моменту окончания дутьевого периода, когда смеситель полностью закрыт, так же различна. На рис. 1 приведены зависимости температуры горячего дутья от времени дутья при последовательной работе воздушонагревателей № 33, 34, 36 доменного цеха ОАО «ММК». Нагрев проводился до выхода на ограничение по температуре дыма. Видно, что температура горячего дутья снижается до величины 1180 °С через 48,5 мин работы аппарата № 36, 51,5 мин – для № 33 и через 57 мин для №34.

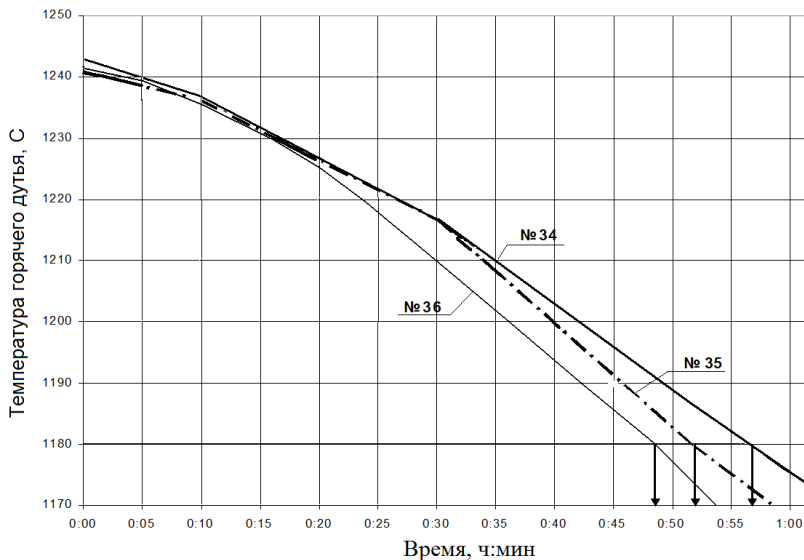


Рис. 1. Зависимости температуры горячего дутья от времени при последовательной работе воздушонагревателей № 33, 34, 36 доменного цеха ОАО «ММК»

Приближенно, без учета времени нагрева аппаратов, предполагая, что нагрев ведется до выхода на ограничение по температуре дыма (расход топлива таков, что всегда обеспечивает это условие), решить задачу подбора длительностей периодов дутья аппаратов блока на основе данных характеристик достаточно просто. Задавшись полным периодом работы блока, например 180 минут, подберем такие длительности периодов дутья при которых температуры дутья в момент полного закрытия смесителя равны. То есть применительно к заданным характеристикам все аппараты в блоке в момент окончания периода дутья должны обеспечивать одинаковую температуру нагрева и сумма этих периодов должна быть равна 180 минутам.

Данная простая поисковая задача может быть решена с использованием мастера поиска решений Excel. На рис. 48 показан диалог мастера поиска решений, сконфигурированного для определения длительностей периодов дутья. В ячейках C18-C20 заданы длительности периодов дутья (для начала поиска любые). В ячейке C21 рассчитана сумма периодов дутья. В ячейках D18-D18 по зависимостям приведенным на рис. 1 рассчитаны температуры нагрева к концу периодов дутья для длительностей, указанных в C18-C20.

В качестве цели поиска указываем равенство суммы периодов дутья 180 минутам. Поиск осуществляется подбором значений ячеек C18-C20, где указаны длительности периодов дутья. К ограничениям отнесено условие равенства температур нагрева дутья ($D18 = D19 = D20$).

Найденные длительности периодов дутья и температуры нагрева показаны в таблице 1. Блок № 1 является блоком воздухонагревателей печи № 10 ОАО «ММК». Так как по другим воздухонагревателям «ММК» нет экспериментальных зависимостей с использованием модели [1] для ряда блоков были рассчитаны теоретические зависимости температуры нагрева дутья от длительности периодов дутья для квазистационарных режимов работы и по ним проведены аналогичные расчеты.

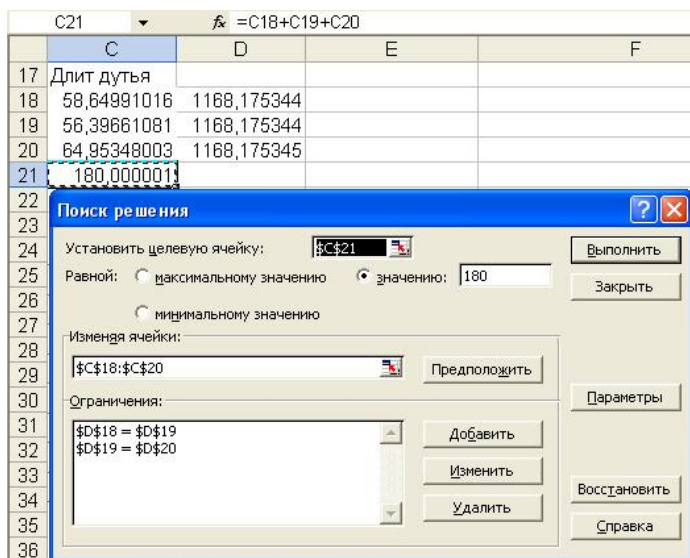


Рис. 2. Диалог мастера поиска решений, сконфигурированного для определения длительностей периодов дутья

Из таблицы видно, что рациональные значения длительностей периодов дутья аппаратов в блоках отличаются.

Однако, как правило, на крупных металлургических предприятиях, в том числе и на “ММК” поддерживают одинаковые длительности периодов дутья, несмотря на то, что возможности и характеристики аппаратов различаются и температура, которую может обеспечить каждый аппарат к моменту окончания дутьевого периода, когда смеситель полностью закрыт, так же различна.

Таблица 1
Найденные длительности периодов дутья и температуры нагрева дутья

№ Блока	Длительность периода дутья, мин				Т _{дутья}
	Возд. 1	Возд. 2	Возд. 3	Возд. 4	
1	58,6	56,4	64,9	-	1168,2
2	34,8	34,8	55,2	55,2	1196,6
3	34,6	32,3	47,1	66,0	1165,0
4	67,5	73,8	38,7	-	1158,9
5	53,9	68,7	57,5	-	1109,7

Обычно это связано с тем, что с целью ограничения колебаний давления доменного газа в сети газопроводов предприятия составляется и поддерживается жесткий временной график переключения воздухонагревателей разных блоков. За счет такого графика стремятся избежать наложения периодов переключений аппаратов.

Необходимо решить задачу координации переключений аппаратов разных блоков при различных длительностях периодов дутья воздухонагревателей. В качестве цели определим - поиск смещения режимных карт блоков с второго по пятый по отношению к первому блоку. То есть требуется найти временные интервалы между, например, моментом начала дутья первого аппарата первого блока и первыми аппаратами второго, третьего, четвертого и пятого блоков.

Задавшись первоначально нулевыми смещениями построим таблицу 2 моментов начала переключений воздухонагревателей с учетом принятой длительности переключения с нагрева на дутье равной пяти минутам, а с дутья на нагрев – семи минутам.

Таблица 2

Моменты начала переключений				
	Перекл.1	Перекл.2	Перекл.3	Перекл.4
Блок1	55,6	108	175,00	-
Блок2	29,81	64,62	119,81	175
Блок3	29,55	61,84	108,99	175
Блок4	62,52	136,31	175	-
Блок5	48,86	117,51	175,00	-

Учитывая заданный полный период 180 минут возможный диапазон смещения режимных карт блоков по отношению к первому составляет от -180 до +180. Поскольку приведенная выше таблица, реализованная в Excel в процессе подбора смещений будет динамически изменяться, необходимо предотвратить возможный выход значений времен до моментов переключений за диапазон 0-180. То есть, например, значение периода времени до переключения 190 минут соответствует моменту 10 минут. Пример реализации данного условия в Excel для первого аппарата второго блока:

=ЕСЛИ(\$C\$18-\$B\$20+\$B\$45>180;(\$C\$18-\$B\$20+\$B\$45)-180;ЕСЛИ(\$C\$18-\$B\$20+\$B\$45<0;180+(\$C\$18-\$B\$20+\$B\$45);\$C\$18-\$B\$20+\$B\$45))

Здесь \$C\$18 длительность периода дутья первого воздухонагревателя второго блока, \$B\$20 – время переключения с дутья на нагрев, \$B\$45 – смещение режимной карты второго блока по отношению к первому.

Далее сформировали таблицу в excel, где рассчитали временные интервалы между всеми возможными переключениями разных блоков (см. табл. 3).

Приняли в качестве критерия минимизацию суммы квадратов обратных значений временных интервалов меньших, чем сумма времен перекидки (5+7) и с помощью мастера поиска решений excel рассчитали временные сдвиги режимной карты каждого блока по отношению к первому блоку. Пример расчета одной из суммируемых величин:

=ЕСЛИ((D72*D72)>(\$B\$19+\$B\$20)*(\$B\$19+\$B\$20);0;1/(D72*D72+1))

Здесь D72 – интервал между двумя переключениями, \$B\$19 и \$B\$20 – длительности переключений. В формуле $1/(D72*D72+1)$ единица суммируется, так как возможен нулевой интервал между переключениями.

Результаты поиска приведены на рис 3. Значение критерия перед поиском 11,68. После поиска 0,226. Полностью избежать наложения переключений не удалось (так как значение критерия больше нуля), однако простой расчет может показать, что это в данном случае и невозможно, так как при длительности полного периода 180 минут общая сумма интервалов переключений составляет 204 минуты ($3*3*(5+7)+2*4*(5+7)$).

Данный метод, основанный на анализе дутьевых характеристик аппаратов, является достаточно точным. Предполагается, что характеристики рис. 1 получены при нагреве аппаратов до выхода на ограничение по температуре дыма.

Все возможные временные сдвиги между переключениями в разных блоках

	П1- П1	П1- П2	П1-П3	П1- П4	П2- П1	П2- П2	П2-П3	П2- П4	П3-П1	П3- П2	П3- П3	П3- П4	П4- П1	П4- П2	П4- П3	П4- П4
Блок1/Блок2	23,8	-11,0	-66,2	121,4	80,2	45,4	-9,8	-65,0	145,2	110,4	55,2	0,0	-	-	-	-
Блок2/Блок3	0,3	-32,0	-79,2	145,2	35,1	2,8	-44,4	-110,4	90,3	58,0	10,8	55,2	145,4	113,2	66,0	0,0
Блок3/Блок4	33,0	106,8	-145,4	-	-0,7	74,5	-113,2	-	46,5	-27,3	66,0	-	112,5	38,7	0,0	-
Блок4/Блок5	13,7	-55,0	-112,5	-	87,4	18,8	-38,7	-	126,1	57,5	0,0	-	-	-	-	-
Блок1/Блок3	24,1	-8,2	-55,3	-	80,5	48,2	1,1	-	145,4	113,2	66,0	-	-	-	-	-
Блок2/Блок4	32,7	106,5	-145,2	-	2,1	71,7	-110,4	-	57,3	-16,5	55,2	-	112,5	38,7	0,0	-
Блок3/Блок5	19,3	-88,0	-145,4	-	13,0	55,7	-113,2	-	60,1	-8,5	66,0	-	126,1	57,5	0,0	-
Блок1/Блок4	-8,9	-82,7	-121,4	-	47,5	26,3	-65,0	-	112,5	38,7	0,0	-	-	-	-	-
Блок2/Блок5	19,1	-87,7	-145,2	-	15,8	52,9	-110,4	-	70,9	2,3	55,2	-	126,1	57,5	0,0	-
Блок1/Блок5	4,8	-63,9	-121,4	-	61,2	-7,5	-65,0	-	126,1	57,5	0,0	-	-	-	-	-

*Здесь, например, П1-П1 в строке Блок2/Блок3 это сдвиг во времени между первыми переключениями в блоках два и три.

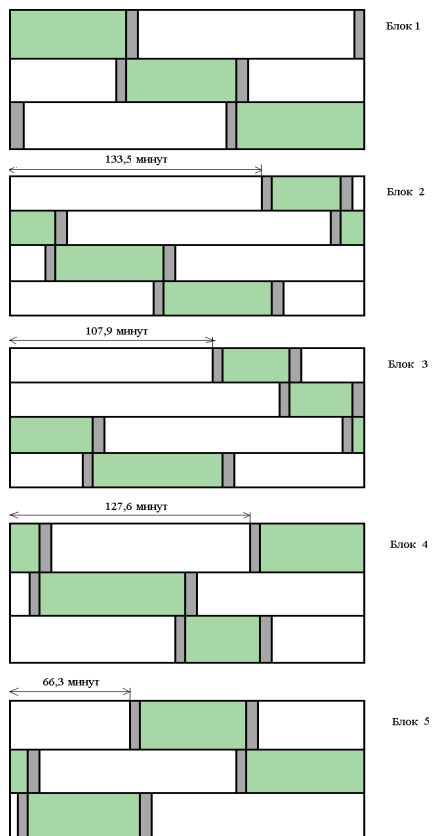


Рис. 3. Найденные временные сдвиги между режимными картами разных блоков (светлым показаны периоды нагрева)

Изменение длительности периода нагрева сказывается на требуемом расходе топлива и прогреве по толщине кирпича насадки. Последнее однако не оказывает значительного принципиального воздействия на температуру нагрева. Если увеличение расхода топлива на блок происходит одновременно с сокращением длительности полного периода, то оно окупается увеличением температуры нагрева дутья вплоть до сверх коротких периодов. Если увеличение расхода топлива связано с изменением периодов дутья при постоянной длительности полного периода, то, по сути дела, оно является просто следствием перераспределения топлива между воздухонагревателями и эффект повышения температуры нагрева объясняется четким выполнением условия – в конце периода дутья смеситель полностью закрыт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкляр Ф.Р., Малкин В.М. Доменные воздухонагреватели (конструкция, теория, режимы работы). – М.:Металлургия, 1982. – 176 с.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ДЕФЕКТНОЙ
ПРОДУКЦИИ АГРЕГАТОМ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО
ЦИНКОВАНИЯ ОАО «ММК» С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОЙ
МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛА**

На АНГЦ-1 ОАО «ММК» осуществляется полный техно-
логический цикл, необходимый для производства горячеоцинко-
ванного листа. Его проектная производительность – 500 тыс.
тонн в год горячеоцинкованного проката толщиной от 0,4 до 2,0
мм и шириной 1000 – 1650 мм разнообразного назначения.

При фактической годовой производительности агрегата
460 тыс. тонн в год, 7,2 тыс. тонн готовой продукции пришлось
на некондиционную, что составляет 1.6% от всей производимой
продукции. Распределение некондиционной продукции по вы-
бранным четырем типам дефектов, не связанных с механиче-
ской обработкой листа, показано на рис. 1.

Возникновение приведенных на рис. 1 дефектов наибо-
лее вероятно связано с температурным режимом протяжной пе-
чи и скоростью перемещения полосы по агрегату.

Согласно технологии температура полосы перед ванной
должна составлять 460°С, а в зоне выдержки температура поло-
сы должна поддерживаться на уровне 720 °С (для большинства
типов полос). Существующая система управления допускает
значительные колебания температуры полосы и скорости ей
обработки, что в конечном итоге приводит к выпуску неконди-
ционной продукции. Данные отклонения характерны для обработки
полос толщиной более 1,0 мм, где существующая система ав-
томатического управления показывает неудовлетворительные
результаты, и оператор вынужден вмешиваться в процесс
управления, основываясь на собственном опыте. Часто это при-
водит к необходимости снижения скорости полосы и отклонени-
ям от регламентированного режима.

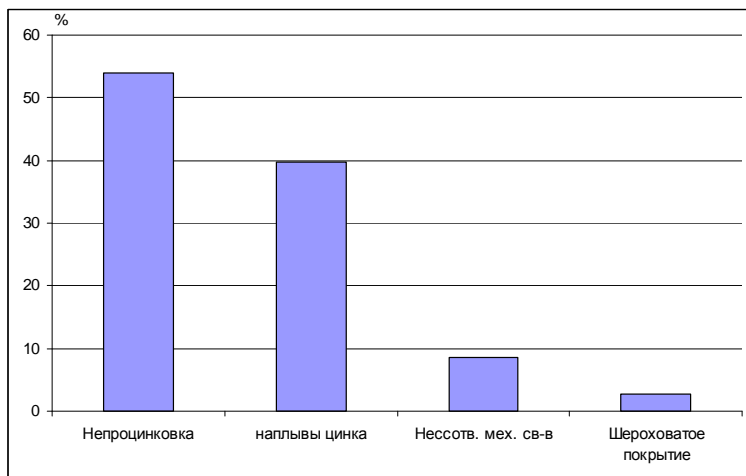


Рис. 1. Распределение некондиционной продукции по типам дефектов

Чтобы избежать колебаний температуры задание ПИД-регуляторам в зонах отделения нагрева изменяют постепенно, не более чем на 5 градусов за один раз, после завершения переходного процесса задание изменяется ещё на 5 градусов. Это приводит к затягиванию переходных процессов, и не позволят полностью избавиться от колебаний температуры. При таком управлении температурным режимом быстро изменить температуру оказывается невозможно.

Для повышения качества переходных процессов предлагается применить ПИД-регулятор, использующий принцип разомкнутого управления, структура которого показана на рис. 2.

Здесь регулятор R спроектирован как в системе с классическим ПИД-регулятором, а передаточные функции блоков M_u и M_y выбираются так, чтобы улучшить реакцию системы на входное воздействие. M_u соответствует обратной, а M_y прямой модели процесса.

Принцип действия системы состоит в том, что изменение сигнала задания $r(t)$ поступает на вход объекта управления U через блок M_u , минуя цепь обратной связи. Передаточная функция M_u подбирается таким образом, чтобы выходной сигнал системы $y(t)$ в точности соответствовал входному $y(t)=r(t)$. Поскольку в реальной системе при наличии внешних возмущений или изменении уставки $e(t) \neq 0$, то во время переходного процесса

вступает в действие ПИД-регулятор, который пытается свести возникшую ошибку к нулю [1].

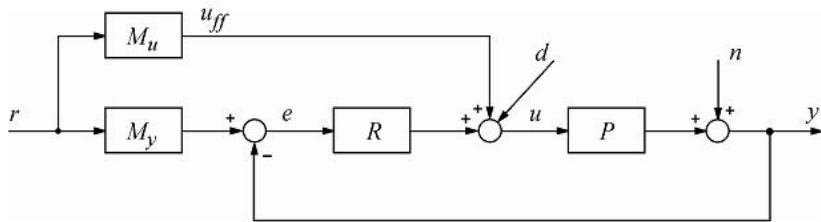


Рис. 2. Структура ПИД-регулятора, использующего принцип разомкнутого управления

Поскольку в системе, показанной на рис. 2, ошибка на низких частотах и в установившемся режиме равна нулю благодаря интегральной составляющей в ПИД-регуляторе R , высокую точность компенсации ошибки с помощью прямой связи достаточно обеспечить только на высоких частотах. Это облегчает задачу синтеза передаточной функции M_u .

В качестве M_u может использоваться как статистическая, например обратная нейросетевая модель процесса нагрева полосы, так и обратный коэффициент передачи объекта, приближенный подбор которого уже позволяет улучшить качество переходных процессов. В M_y возможно использование прямой модели объекта, в качестве которой достаточно использования инерционного звена первого порядка.

Изменение параметров настройки ПИД-регулятора в системе с использованием принципа разомкнутого управления оказывает слабое влияние на вид переходного процесса по заданию. Цель регулятора в данном контуре реакция на прочие возмущения и устранения невязок, связанных с неточностью модели объекта.

Кроме изменения структуры локальных контуров регулирования температуры в зонах нагрева к существующей системе визуализации процесса предлагается добавить дополнительный модуль, который позволит прогнозировать и предупреждать оператора о возможности получения некондиционной продукции в результате обработки полосы при продолжении им управления

в рамках текущих значений температурно-скоростных параметров полосы печи.

Для решения задачи разработано две нейросетевые модели. Первая модель позволяет прогнозировать на фиксированный временной интервал температуру в отдельной зоне блока нагрева, основываясь на данных о текущих температурах в зонах и расходе топлива на каждую зону.

Вторая модель, основываясь на данных о температурах в зонах и скорости движения полосы в печи, делает заключение о возможности возникновения некондиционной продукции. На вход сети могут подаваться как текущие данные процесса – в этом случае система просто констатирует вероятное возникновение брака, так и прогнозные данные, предоставленные первой моделью. Предлагаемые изменения в информационной системе визуализации технологического процесса представлены в виде структурной схемы на рисунке 3.

На вход второй модели подаются средние, минимальные и максимальные значения температур в каждой зоне агрегата за период 10 мин, предшествующих проведению расчёта, скорость и толщина полосы. Выходом нейросети является относительный показатель. Если он принимает значение, близкое к единице, значит при сохранении текущих параметров обработки полосы (распределение расходов газа по зонам, скорость движения и толщина обрабатываемой полосы) с большой вероятностью конечная продукция будет иметь дефекты. Это позволит улучшить и облегчить контроль качества готовой продукции. Настройка модели проводилась с использованием обучающей выборке по данным о рулонах с дефектами и информацией о температурно-скоростных режимах их обработки в агрегате.

На вход первой модели поступают текущие значения температур в каждой из зон печи, текущие значения расходов топлива в каждую зону, текущая скорость движения полосы в печи и данные о толщине обрабатываемой полосы. Выходами этой нейронной сети будут прогнозируемые на некоторое время вперёд значения температур в каждой зоне печи. С помощью такой нейросети можно подобрать такие варианты распределения температур по зонам нагрева печи, при сохранении на выходе необходимой по технологии температуры полосы, которые обеспечат отсутствие дефектов полосы, связанных с температурным режимом в печи. Эта нейросетевая модель может быть использована непосредственно для оперативного управления нагревом полосы, т.е. подобранные значения температур могут

использоваться в качестве температурных уставок в каждой из зон управления, а нижний уровень управления при этом останется неизменным.

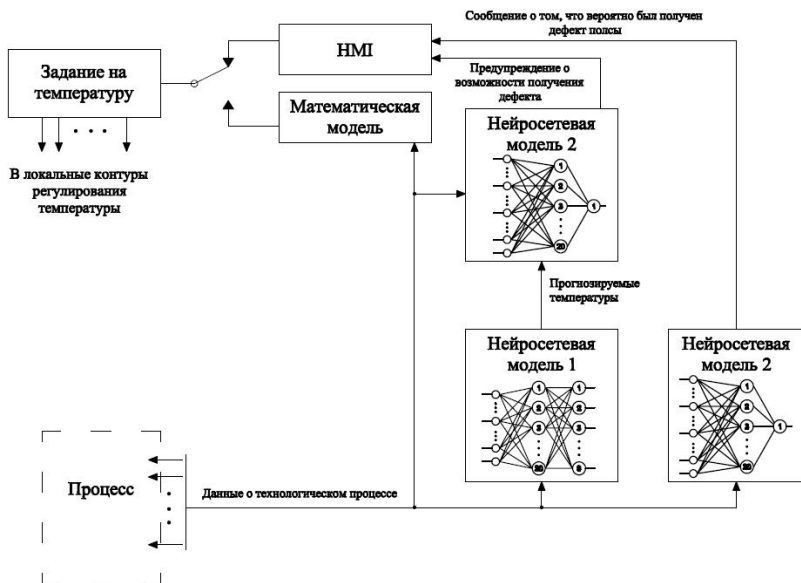


Рисунок 3 – Предлагаемые изменения в системе информационного обеспечения технологического процесса

Таким образом, рассмотренные модели, разрабатываемые на базе искусственных нейронных сетей, дают возможность прогнозировать вероятность производства дефектной продукции на некоторое время вперед и заранее изменять режим нагрева полосы, чтобы избежать этого.

Результаты тестирования модели 1 на примере зоны 2 представлены на рисунке. 3.

Отклонение результатов работы модели от действительных температур в печи, при прогнозе на срок 1-2 минуты вперед в целом удовлетворительно. Так как расход топлива непрерывно изменяется, это усложняет задачу прогнозирования температуры. Так же с увеличением времени прогнозирования точность прогноза снижается.

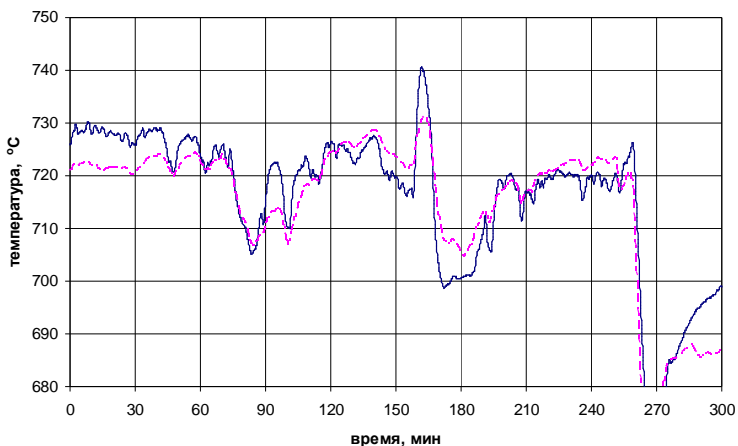


Рисунок 3 – Результат тестирования нейронной сети для зоны нагрева №1

На рисунке 4 показан результат моделирования процесса прогнозирования возникновения дефектов полосы.

Прерывистой линией показано значение на выходе нейросети. Прямоугольниками на графике отмечены обрабатываемые в данный момент полосы. Высокие прямоугольники означают, что позже на этой полосе был обнаружен дефект оцинковки – непроцинковка. Как видно пики на графике выходного значения нейросети, прогнозирующей непроцинковку, соответствуют действительному возникновению дефектов.

Точность прогнозирования непроцинковки для тестовой выборки составила 96%. Однако, при последующей проверке на значительном массиве данных получены “ложные” срабатывания в 73%, предсказывающие возникновение некондиционной продукции в то время, как рулон прошел контроль.

Для других видов дефектов, менее зависящих от температурного режима в печи, точность прогнозирования оказывается ниже, например, для дефекта «наплывы цинка» – 76%. Таким образом, возможно прогнозировать появление условий, приводящих к возможности возникновения некондиционной продукции, и своевременно предупреждать оператора об этом. По статистике, среди всех дефектных полос, полосы с дефектами, связанными с температурным и скоростным режимом полосы в печи, без механических повреждений составляют почти 50%.

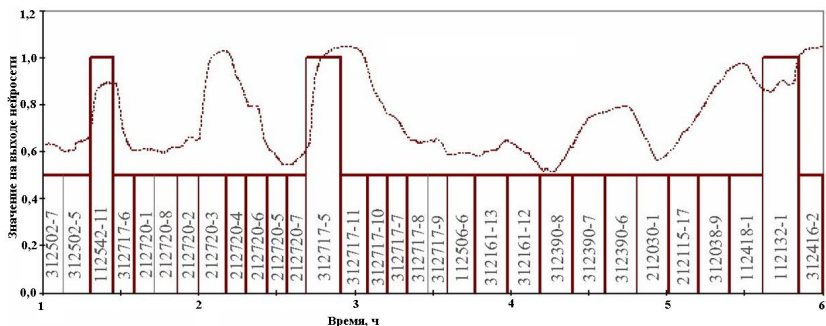


Рисунок 4 – Графики изменения значения на выходе нейросети и факта обнаружения дефекта полосы

Предлагаемые мероприятия должны уменьшить вмешательство оператора в процесс управления, а в тех случаях, когда это все же необходимо, своевременно предупредить его о том, что текущий режим может привести к возникновению дефектов полосы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисенко В. ПИД-регуляторы. Принципы построения и модификации / «СТА». – 2006 г. – №4, стр. 66-74.

УДК 621.365.2

**Андреев С.М., Гребенникова В.В.,
Мухина Е.Ю., Мельникова О.И.**

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

РАСЧЁТ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ПО ТЕПЛОВОМУ СОСТОЯНИЮ ГРЕЮЩЕЙ СРЕДЫ

Методом расчета уставок температур является метод сведения вариационных задач к методам программирования.

Задачи на экстремум функционалов в которые входит время в виде аргументов, называются вариационными задачами, а решение – вариационным исчислением.

Пусть состояние объекта или системы описывается вектором состояний. Изменение вектора x во времени в пространстве состояний изображается траекторией $x(t)$, рис. 1.

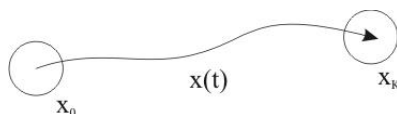


Рис. 1. Изменение вектора x в пространстве состояний

Для перевода системы из одного состояния в другое или с одной траектории на другую к нему прикладывается вектор управления:

$$\bar{U} = (U_1, U_2, \dots, U_m). \quad (1)$$

На состояние и вектор управления могут накладываться различного рода ограничения и условия. Граничные (краевые) условия определяют значения векторов начального состояния и конечного состояния. Граничные условия могут задаваться различными способами, но в любом случае они определяют принадлежность векторов $x(t_0)$ и $x(t_k)$ к множествам заданных x_0 и x_k .

Критерий оптимальности.

Краевые условия определяют основную цель управления, которой можно добиться разными способами, иначе говоря, существует бесконечное количество вариантов перехода из одного состояния в другое. Если речь идет об оптимальном управлении то требуется выбрать только одну траекторию, которая доставляет экстремум некоторому функционалу. Такой функционал называется критерием оптимальности (показателем качества или целевой функцией).

Теорема об оптимальности: из всего множества траекторий $x(t)$, существует только одна, доставляющая экстремум критерию оптимальности.

В задачах оптимального управления, когда объект описывается СДУ первого порядка, в общем случае функционал может быть записан:

$$I = I(x(t), U(t), \dot{x}(t), \dot{U}(t), x(t_0), x(t_k), t_0, t_k, t). \quad (2)$$

В конкретных задачах количество переменных будет меньше. В дальнейшем, для определенности будем считать, что требуется минимизировать функционал.

В реальных задачах динамической оптимизации выбор критерия оптимальности является сложной задачей. В некото-

рых случаях выражение критерия I получается слишком сложным. В этом случае критерии упрощают, причем таким образом, чтобы полученное упрощенное решение мало отличалось от решения полной задачи. Такое решение будет очень близко к оптимальному и его называют субоптимальным (квазиоптимальным) решением.

Уравнение объекта.

В задачу с краевыми условиями и критерием оптимальности также необходимо включить ограничения накладываемые на переменные процессы $x(t)$ и на управляющее воздействие $U(t)$. Эти ограничения задаются в виде СДУ:

$$F_i[x(t), U(t), \dot{x}(t), \dot{U}(t), t] = 0; i = 1..n. \quad (3)$$

В ограничения включаются уравнения объекта и функция управления. Функция искомого оптимального управления не включается.

В отличие от решений задач обычного моделирования, решением динамических задач является траектория изменения вектора. В задачах оптимального управления предполагается, что объект описывается СДУ первого порядка, поэтому любую СДУ описывающую объект сводят к системе обыкновенных ДУ первого порядка за счет введения дополнительных переменных:

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = U. \quad (4)$$

Введем дополнительные переменные:

$$x_1 = x, \quad x_2 = \dot{x}, \quad x_3 = \ddot{x} \dots x_n = \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}}.$$

Подставим их в уравнение и получим систему обыкновенных ДУ:

$$\begin{cases} x_n = \frac{1}{a_0} (U - a_1 x_n - a_2 x_{n-1} - \dots - a_n x_1) \\ \dot{x}_1 = x_2 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \end{cases}. \quad (5)$$

Переменные x_1, x_2, \dots, x_n часто называют фазовыми координатами системы.

Иногда в число фазовых координат включают специальную переменную $x_0(t)$, которая характеризует текущее значение функционала I .

Ограничения.

На управление $U(t)$ и фазовые координаты $x(t)$ могут быть наложены ограничения в виде алгебраических уравнений, в том числе и константа. В общей постановке задачи эти ограничения задаются в виде условия принадлежности векторов $x(t)$ и $U(t)$ к некоторым заданным множествам $x(t) \in X$, $U(t) \in U_t$. В частном случае эти ограничения записываются:

$$\begin{cases} i=1 \dots l \\ j=1 \dots r \end{cases} \begin{cases} \varphi_i[x(t), U(t), t] = 0 \\ g_j[x(t), U(t), t] \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Метод сведения вариационных задач к задачам нелинейного программирования.

Одним из способов сведения является способ, при котором функцию управления представляют в виде дискрет, т. е. на заданных промежутках функцию представляют константой.

$$U_i = U(t_{i-1} < t < t_i) = \text{const.} \quad (7)$$

В этом случае вид решения представляет собой ступенчатую кривую, представленную на рис. 2, которая является субоптимальным решением.

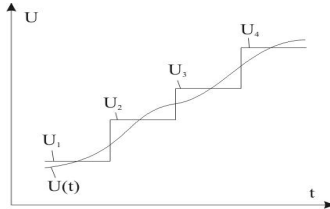


Рис.3. Ступенчатая кривая близкая к оптимальному решению задачи нагрева.

Критерий оптимальности в этом случае представляется в виде функционала многих переменных:

$$I = I(U_1, U_2, \dots, U_n) \quad (8)$$

Наиболее подходящим способом решения такой задачи является применение методов прямого поиска минимума функции.

Алгоритм решения вариационной задачи как задачи нелинейного программирования численным методом:

- представим СДУ разностным аналогом;
- заданный диапазон времени разбиваем на участки. На каждом участке управление и управляющее воздействие представляет собой постоянную величину;

- составляем функционал, минимум которого требуется найти.

Реализация расчета температурных уставок вариационным методом.

Требуется так изменять температуру печи $t_{гс}$, чтобы за время $t_{кон}$ металлическая заготовка нагрелась с начальной температуры t^0 до заданной конечной t^K . При этом расход топлива на нагрев должен быть минимальным.

Исходные данные:

Время нагрева	$T^K = 250$ мин;
Начальная температура	$t^H = 0$ °С;
Конечная температура центра	$t_1^K = 1220$ °С;
Конечная температура поверхности	$t_2^K = 1270$ °С;
Коэффициент функционала	$k_1 = 10^{-5}$;
Число участков	$N = 5$;
Постоянные времена	$T_0 = 65$ мин; $T_1 = 80$ мин; $T_2 = 30$ мин;
Шаг	$h = 1$ мин.

Нагрев тела описывается дифференциальным уравнением третьего порядка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dt_{гс}}{d\tau} = \frac{1}{T_0}(U - t_{гс}) \\ \frac{dt_{пов}}{d\tau} = \frac{1}{T_1}(t_{гс} - t_{пов}) \\ \frac{dt_{цен}}{d\tau} = \frac{1}{T_2}(t_{пов} - t_{цен}) \end{array} \right. , \quad (9)$$

где $U = k_1 \cdot V_{топл}$.

Критерий оптимальности:

$$I = \int_0^{тк} k_1 U^2 d\tau \longrightarrow \min , \quad (10)$$

где $k_1 U^2$ – расход топлива.

Согласно приведенному в теоретическом введении алгоритму представим СДУ объекта разностным аналогом:

$$\begin{cases} t_{гс} = \frac{1}{T_0} (U - t_{гс_пред}) + t_{гс_пред} \\ t_{п} = \frac{1}{T_1} (t_{гс} - t_{п_пред}) + t_{п_пред} \\ t_{ц} = \frac{1}{T_2} (t_{п} - t_{ц_пред}) + t_{ц_пред} \end{cases}, \quad (11)$$

Составим функционал как разностный аналог непрерывного интеграла. Правый конец траектории является закрепленным, т. е. в задачу входят ограничения в явном виде. Поэтому в функционал следует добавить ограничения. Воспользуемся методом штрафных функций.

$$I = k_1 \left(\sum_{i=0}^{n1} U_1^2 + \sum_{i=n1}^{n2} U_2^2 + \sum_{i=n2}^{n3} U_3^2 + \sum_{i=n3}^{n4} U_4^2 + \sum_{i=n4}^{n5} U_5^2 \right) + k_2 (t_{кон.ц} - t_1^K)^2 + k_2 (t_{кон.п} - t_2^K)^2 \longrightarrow \min, \quad (12)$$

где $n_i = i \cdot T^K / (h \cdot N)$.

Примем $k_2=15$.

Из всех четырех методов решения задач многомерной оптимизации лучший результат получается при использовании метода Хука-Дживса, а худший результат оказался у метода координатного спуска. Основываясь на том, что для данной задачи наиболее подходят методы прямого поиска экстремум функции, для решения поставленной задачи был выбран метод конфигураций Хука-Дживса. В данном методе производится исследование окрестности точки (циклически изменяя переменные). После того, как найдено приемлемое направление (направление уменьшения значения функции), в этом направлении производится движение при постепенно увеличивающемся шаге - (устанавливается конфигурация или тренд поиска). Это продолжается до тех пор, пока поиск в этом направлении уменьшает значение целевой функции. Если в этом направлении не удаётся найти точку с меньшим значением функции $f(x)$, размер шага уменьшается. Если и при этом не происходит уменьшение значения целевой функции, предпринимается новое обследование окрестности точки.

Результаты работы этого алгоритма приведены на рис. 3.

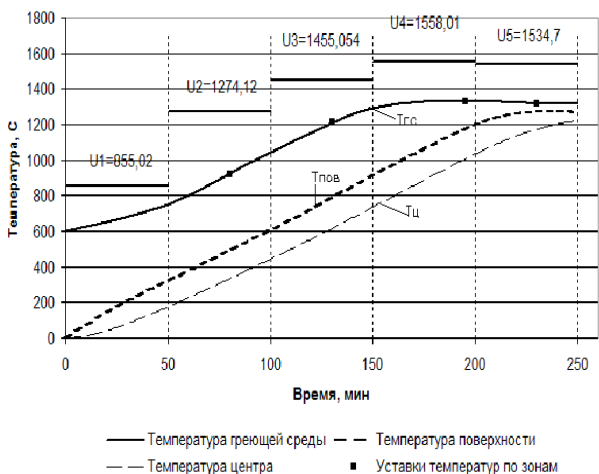


Рис.3. График нагрева заготовки до заданной температуры.

Уставки температур: 1 зона - 920 °C, 3 зона - 1215 °C, 5 зона - 1330 °C, 7 зона - 1320°C.

Изучая полученный в результате решения задачи график видно, что интенсивный нагрев тела должен производиться на конечном участке нагрева, так как данная особенность управления позволяет уменьшить расход топлива на поддержания температуры, тем самым уменьшая расход топлива на нагрев тела в целом.

Библиографический список

- 1 Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных термических печей: Учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004.- С. 400;
- 2 Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Способ расчета распределения тепловых нагрузок по зонам методической печи с целью снижения удельных затрат топлива на нагрев: Приложение математических и экономических технических исследований: Сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – вып.1. – С.110-115;

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ВАКУУМИРОВАНИЯ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО ТИПА

В настоящее время этап внепечной обработки становится основной частью технологического процесса выплавки сталей многих марок и классов с высокими потребительскими свойствами. Технологическая операция вакуумирования в процессе внепечной обработки позволяет провести дегазацию, раскисление и доводку стали по химическому составу и температуре, что позволяет расширить возможности сталеплавильных агрегатов, в частности кислородных конвертеров по сортаменту выплавляемого металла.

Наиболее эффективными агрегатами по вакуумированию стали являются агрегаты циркуляционного вакуумирования в которых энергия, необходимая для циркуляции жидкого металла, обеспечивается за счет под подъемной силы, действующей при температурном расширении транспортирующего газа (аргона) и частично газов растворенных в металле, которые начинают выделяться уже в верхней части всасывающего патрубка.

Продолжительность процесса вакуумирования стали циркуляционным способом обычно ограничивается из-за снижения температуры обрабатываемого металла. Поэтому важно проводить процесс вакуумирования в таком режиме, который обеспечивал бы наибольшую дегазацию металла за минимальное время, т.е. обеспечивал максимально возможную производительность установки.

Количество выделяющихся при вакуумировании (экстрагируемых из расплава) газов в основном определяется скоростью циркуляции металла (расходом металла через вакуум-камеру) и высотой слоя жидкого металла в вакуумной камере. Скорость циркулирующей массы металла через вакуум-камеру зависит от газонасыщенности стали и определяется расходом транспортирующего газа и геометрическими размерами самой камеры, всасывающего и сливного патрубков.

Зависимости расхода металла через вакуум-камеру и расхода отходящих из вакуум-камеры газов от расхода транспортирующего газа (аргона) неоднозначны и имеют экстремальный вид [1].

Величина расхода экстрагируемых газов в газоотводящем канале характеризует эффективность процесса дегазации. Изменение расхода удаляемых из вакуум-камеры газов от величины расхода аргона [1] в процессе вакуумирования при толщине слоя металла в вакуум-камере 0,2-0,3 м представлена на рис. 1.

Представленные зависимости имеют экстремальный вид и могут быть использованы для оптимизации управления процессом циркуляционного вакуумирования. Максимумы расхода отходящих газов при оптимальном значении расхода транспортирующего газа по ходу процесса вакуумирования снижаются по величине и одновременно смещаются в направлении увеличения расхода транспортирующего газа (аргона).

Оптимизацию режима управления процессом циркуляционного вакуумирования при наличии непрерывно изменяющейся экспериментальной зависимости показателя эффективности процесса дегазации от расхода транспортирующего газа путем непрерывного определения и поддержания оптимального текущего значения расхода аргона можно осуществить за счет использования систем автоматической оптимизации (CAO), [2].

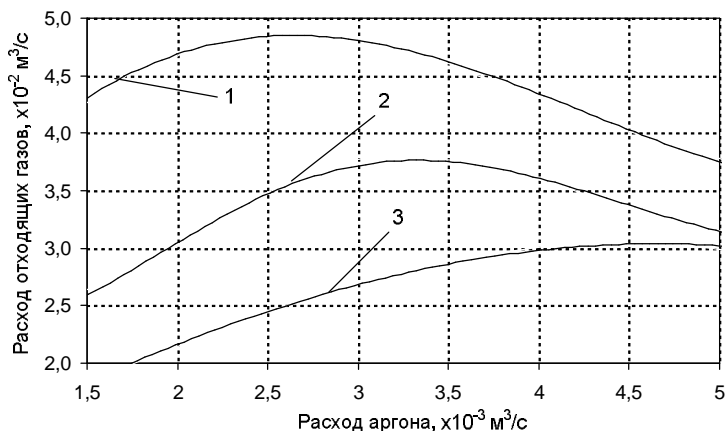


Рис.1. Изменение расхода отходящих газов на второй (линия 1), пятой (линия 2) и восьмой (линия 3) минутах процесса вакуумирования от расхода аргона

Для реализации САО был разработан статистический оптимизирующий алгоритм управления. Принцип работы данного алгоритма заключается в определении статистической связи между сигналом X на входе объекта управления и скоростью Z изменения выходного параметра объекта управления посредством расчета коэффициента корреляции R_{XZ} за предшествующий период времени. Смена знака величины R_{XZ} свидетельствует о достижении выходным параметром объекта управления своего максимального значения.

Структурная схема системы автоматической оптимизации (САО), которая реализует статистический оптимизирующий алгоритм управления представлена на рис.2.

Объект управления (оптимизируемый процесс циркуляционного вакуумирования) аппроксимирован последовательным соединением статического звена с характеристикой $Y=f(X)$ и двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени T_1 и T_2 . Величина Y – установившийся расход отходящих газов из вакуум камеры при постоянном текущем расходе аргона, т.е. при $X=const$ во всасывающей патрубке. Величина Z_2 – текущий расход газов из вакуумкамеры. Блок ДУ – дифференцирующее устройство, на выходе которого формируется параметр, определяющий текущую скорость изменения выходного сигнала с ОУ в соответствии с выражением: $\Delta Z_2/\Delta\tau = Z(\tau)$, где $\Delta\tau$ - интервал времени опроса датчика сигнала с выхода объекта управления – текущего значения массы металла в вакуумкамере.

Сигналы скорости $Z(\tau)$ изменения выходного сигнала с ОУ и входной сигнал $X(\tau)$ одновременно подаются на блоки ячеек памяти, которые организованы в виде сдвиговых регистров X_N и Z_N и содержащие по N ячеек памяти каждый.

Текущие значения сигналов $X(\tau)$ и $Z(\tau)$ записываются в первую ячейку памяти регистров X_N и Z_N . Через промежуток времени $\Delta\tau$ определяемый тактовым генератором импульсов ГИ значения во всех ячейках перемещаются (сдвигаются) в соседнюю справа ячейку с номером на единицу больше текущей.

Значение из последней ячейки N теряется, а первая ячейка освобождается. После этого в первые ячейки записываются новые текущие значения сигналов $Z(\tau)$ и $X(\tau)$. С приходом нового тактового импульса через время $\Delta\tau$ цикл повторяется. Таким образом, в каждый момент времени сдвиговые регистры содержат

массив значений сигналов $X(\tau)$ и $Z(\tau)$ за период времени $\Delta\tau \cdot N$ предшествующий предыдущему.

По массивам данных содержащиеся в сдвиговых регистрах X_N и Z_N производится расчет коэффициента корреляции R_{XZ} :

$$R_{XZ} = \frac{\sum_{n=1}^N (Z_n - M_Z) \cdot (X_n - M_X)}{D_X D_Z} \quad (1)$$

где M_X - математическое ожидание значений массива X_N :

$$M_X = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n \quad (2)$$

M_Z - математическое ожидание значений массива Z_N :

$$M_Z = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_n \quad (3)$$

D_X – среднее квадратичное отклонение значений массива X_N :

$$D_X = \sqrt{\sum_{n=1}^N (X_n - M_X)^2} \quad (4)$$

D_Z – среднее квадратичное отклонение значений массива Z_N :

$$D_Z = \sqrt{\sum_{n=1}^N (Z_n - M_Z)^2} \quad (5)$$

Величина R_{XZ} принимает значения в диапазоне (+1, -1) и подается на релейный элемент (РЭ) с порогом срабатывания $|\Delta R_{XZ}|$ и зоной нечувствительности $2 \cdot \Delta R_{XZ}$ формирующий сигнал $\sigma \in (+1; -1)$. При достижении параметром R_{XZ} порога срабатывания $\pm \Delta R_{XZ}$ выходной сигнал релейного элемента меняет свой знак на противоположный.

В момент смены знака формируется сигнал $|\sigma'|$ запуска реле паузы, которое формирует импульс длительностью $\Delta\tau_{\text{ПАУЗЫ}}$, запрещающий работу генератора импульсов и тем самым «замораживая» значения в сдвиговых регистрах X_N и Z_N .

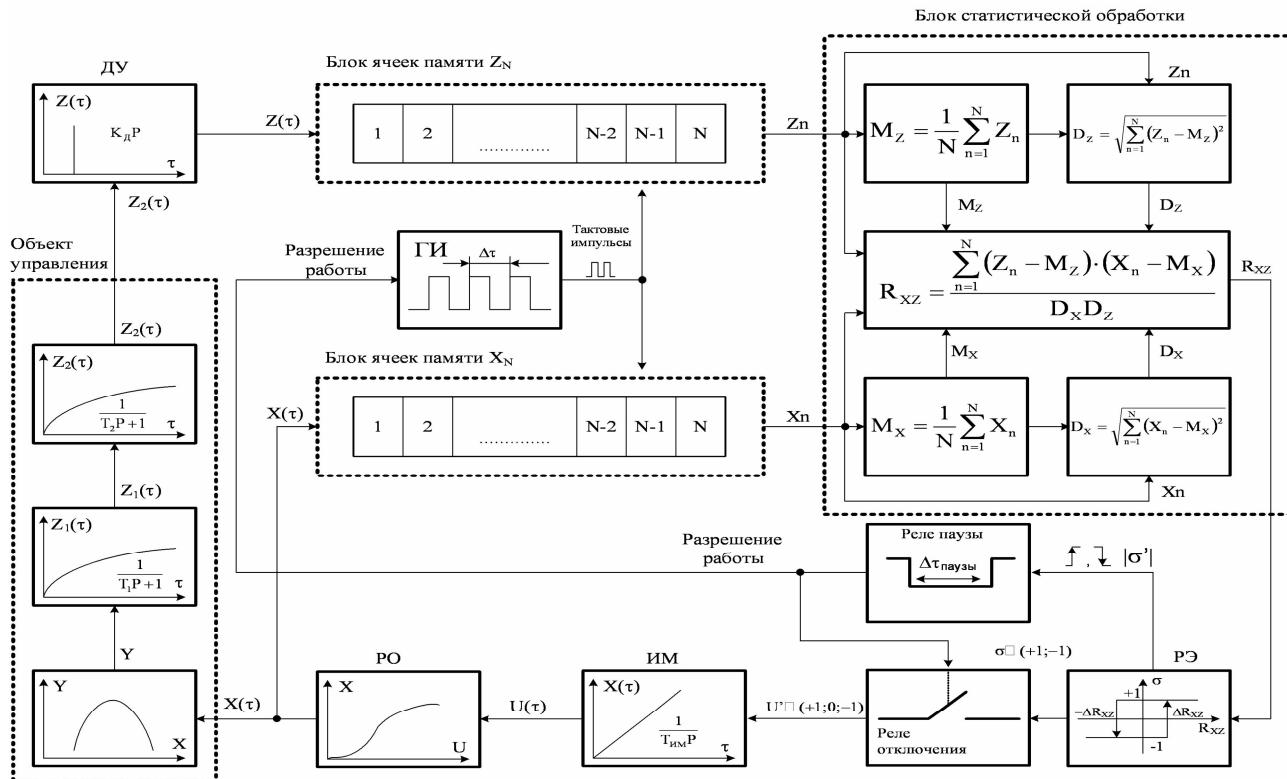


Рис.2. Структурная схема системы автоматической оптимизации статистического типа

Одновременно на время паузы с помощью реле отключения происходит разрыв в цепи управления исполнительным механизмом – исполнительный механизм перемещения регулирующего органа (РО) останавливается. Остановка ИМ в момент переключения позволяет стабилизировать переходный процесс, исключить формирование ложных реверсов ИМ при наличии помех, действующих последовательно с выходным сигналом ОУ и свести к минимуму число включений ИМ, тем самым облегчая работу технических средств цепи управления.

После истечения времени паузы $\Delta t_{\text{ПАУЗЫ}}$ генератор импульсов возобновляет свою работу, реле отключения коммутирует цепь управления ИМ и через контакты этого реле в цепь управления этим ИМ подается сигнал направления движения σ . Так как сигнал релейного элемента изменил свой знак перед выдержкой, то после остановки ИМ изменяет направление изменения вала на противоположное.

Выходной вал ИМ связан с клапаном регулирующего органа с расходной характеристикой, представленной на структурной схеме статической характеристикой $X(\tau)=f(U)$, где U – положение вала ИМ.

Для моделирования и программной реализации работы САО со статистическим оптимизирующим алгоритмом управления был разработан комплекс программ. Блок – схема алгоритма программы реализации САО статистического типа представлена на рис.3. Рассмотрим работу алгоритма более подробно. Для этого на рис.3 выделены основные участки блок-схемы алгоритма разбитые по группам.

В группе 1 блок-схемы алгоритма задается длина массивов сдвиговых регистров X_N и Z_N , производится их обнуление и в переменной σ задается первоначальное направление движения исполнительного механизма. Это направление может быть задано вручную, а может быть сформировано алгоритмом стабилизирующего контура. Также производится расчет скорости изменения сигнала с выхода ОУ.

В группе 2 блок-схемы алгоритма производится первоначальное заполнение массивов сдвиговых регистров X_N и Z_N значениями с входа объекта управления и скорости изменения $Z(\tau)$ выходного параметра ОУ. Во время первоначального заполнения массивов сдвиговых регистров движение ИМ продолжается в выбранном направлении со скоростью K_M . Положение вала исполнительного механизма определяется в переменной U .

При смене знака направления движения ИМ в группе 8 блок-схемы алгоритма происходит запуск цикла формирующего паузу в работе алгоритма и движении ИМ на время $\tau_{\text{ПАУЗ}}$. В этот момент исполнительный механизм останавливается ($\sigma = 0$), заполнение массивов сдвиговых регистров не происходит, работа алгоритма «замораживается». После истечения времени паузы $\tau_{\text{ПАУЗ}}$ общий цикл работы алгоритма возобновляется. В этой же группе блок-схемы происходит проверка дальнейшего разрешения работы алгоритма.

При математическом моделировании поискового режима работы САО и расчете траектории изменения $Z(\tau)$ в процессе оптимизации использован численный метод Эйлера.

Статическая характеристика исследуемого процесса вакуумирования стали с использованием экспериментальных данных при их адаптации к условиям работы ККЦ ОАО «ММК» (емкость ковша 385 тонн) определяется уравнением:

$$Y = f[X(\tau)] = 4,9439 - 5,932x(\tau) + 4,6294x^2(\tau) - 1,3999x^3(\tau) + 0,183x^4(\tau) - 0,0087x^5(\tau), \quad (7)$$

где X – расход аргона, $\text{м}^3/\text{ч}$; Y – расход отходящих газов, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Расчетные траектории изменения во времени (без учета дрейфа статической характеристики) входного $V_{\text{АРГ}}(\tau)$ относительно базового $28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ расхода аргона, выходного $Z_2(\tau)$ значения объема отходящих газов, скорости изменения объема отходящих газов $Z(\tau)$, коэффициента корреляции R_{XZ} при $\Delta R_{XZ}=0,1$ и $K_{\text{ИМ}}=0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}^2$ представлены на рис.4.

В начальный момент времени $\tau = 0$ положение процесса характеризуется состоянием обозначенным точкой 0 (см. рис.4). Первоначальное направление движение было выбрано в сторону увеличения расхода транспортирующего газа аргона. В течении первых 10 с работы САО идет заполнение сдвиговых регистров X_N и Z_N до момента времени обозначенного точкой 1. В дальнейшем начинается расчет коэффициента корреляции R_{XZ} .

При достижении величиной R_{XZ} порога срабатывания ΔR_{XZ} (см. рис.4, точка 3) исполнительный механизм останавливается на время паузы $\Delta \tau_{\text{ПАУЗЫ}}$, работа системы оптимизации «замораживается»: заполнение сдвиговых регистров и расчет коэффициента корреляции не происходит.

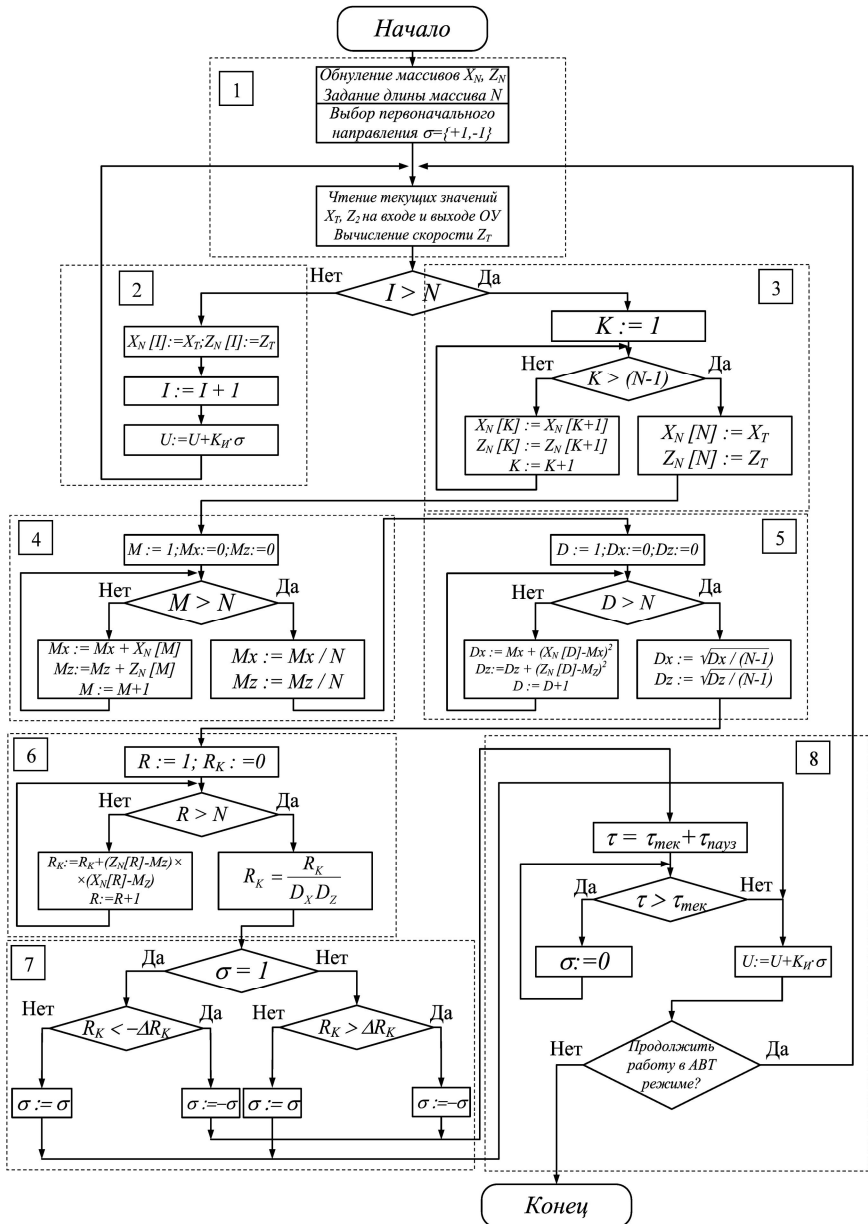


Рис.3. Блок схема алгоритма программы реализации системы оптимизации статистического типа

После истечения времени паузы $\tau_{\text{ПАУЗЫ}}$ движение исполнительного механизма и изменение входного сигнала начинается в противоположном направлении до тех пор пока коэффициент корреляции R_{XZ} опять не достигнет порога срабатывания. С каждым шагом значение выходного параметра – расхода отходящих газов приближается к максимально возможной величине $V_{\text{О.Г.}}^{\text{MAX}}$.

Анализ представленных на рис. 4 расчетных траекторий режима работы САУ управления процессом циркуляционного вакуумирования показывает высокую эффективность функционирования предлагаемого ОАУ.

По предварительным ориентировочным расчетам использование системы оптимального управления позволит увеличить производительность установки циркуляционного вакуумирования на 1,5-2% по сравнению с существующим (ручным) режимом управления расходом транспортирующего газа (аргона).

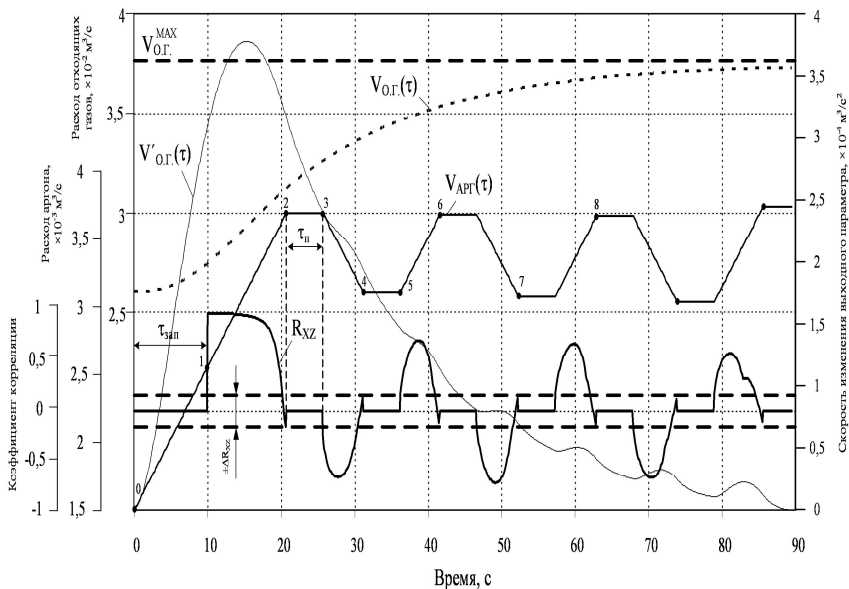


Рис.4. Расчетные траектории изменения во времени относительного расхода аргона $V_{\text{АРГ}}(\tau)$, расхода отходящих газов $V_{\text{О.Г.}}(\tau)$, скорости изменения расхода отходящих газов $V'_{\text{О.Г.}}(\tau)$ и коэффициента корреляции R_{XZ} при $\Delta R_{XZ}=0,1$ и $K_{\text{ИМ}}=0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}^2$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Использование сведений о газах, экстрагируемых при циркуляционном вакуумировании для управления процессом / Б.П.Чумаков, Г.В.Алексеев, В.И.Явойский и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. №3. С.49-52.
2. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: Монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 198 с.

УДК 621.778.1.06-52

**Радионов А.А., Линьков
С.А., Малахов О.С.**

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ПРЯМОТОЧНЫЙ ВОЛОЧИЛЬНЫЙ СТАН КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Прямоточный волочильный стан, как объект автоматического управления, представляет собой совокупность взаимосвязанных через обрабатываемый металл электромеханических систем (см. рис. 1), состоящих из волочильных блоков, участка размотки (разматывателя – при условии смотки заготовки со шпули) и участка смотки (моталки). Каждая из этих систем имеет различные физические сущности процессов, а, следовательно, и различное математическое описание.

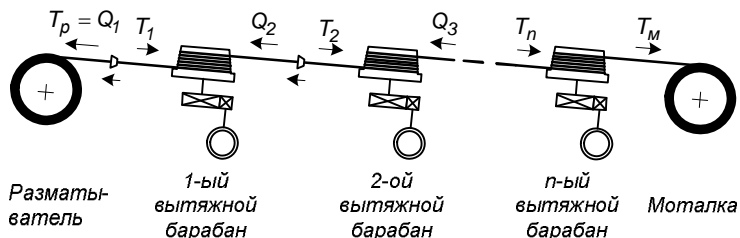


Рис. 1. Схема прямоточного волочильного стана

В настоящей статье рассматривается математическая интерпретация волочильных блоков стана и выполняется анализ его динамических свойств с учетом взаимосвязи через обрабатываемый металл в едином и непрерывном технологическом процессе.

На рис. 2 приведена укрупненная структурная схема ранее разработанной математической модели n -кратного прямоточно-го волочильного стана [1-3].

В основу построения математической модели очага деформации был положен закон сохранения энергии, записанный в виде:

$$N_{T_i} - N_{Q_i} = N_{\phi_i} + N_{m_i} + N_{y\partial_i}, \quad (1)$$

где N_T - мощность, подводимая к очагу деформации тянущим усилием T через передний конец проволоки; N_Q - мощность, подводимая к очагу деформации противонапряжением Q через задний конец проволоки; N_ϕ - мощность, затрачиваемая на формоизменение (вытяжку) металла; $N_{y\partial}$ - мощность, расходуемая на упругую деформацию проволоки в волоке; N_m - мощность сил трения скольжения на контактной поверхности обрабатываемого металла с волокой.

Доказано [1], что математическое описание очага деформации при волочении может быть представлено следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= \frac{N_{Q_i}}{V_{n_i}^{ex}} \\ N_{Q_i} &= N_{T_i} - N_{\phi_i} - N_{y\partial_i} - N_{m_i} \\ N_{T_i} &= T_i \cdot V_{n_i}^{ввх}, \quad N_{\phi_i} = \sigma_i \cdot \ln \mu_i \cdot S_{n_i}^{ввх} \cdot V_{n_i}^{ввх} \\ N_{y\partial_i} &= \sigma_{пц_i} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_{пц_i}}{E_i} + 1 \right) \cdot S_{n_i}^{ex} \cdot V_{n_i}^{ex} \\ N_{m_i} &= f_i \cdot \sigma_i \cdot S_{n_i}^{ex} \cdot V_{n_i}^{ex} \cdot \left[\int_{l_{обж_i}} \frac{(R_{n_i}^{ex} + R_{n_i}^{ввх}) \cdot dl}{(R_{n_i}^{ex} - \sin \alpha_i \cdot l)^2} + 2 \cdot \frac{l_{кап_i}}{R_{n_i}^{ввх}} \right] \\ l_{обж_i} &= \frac{R_{n_i}^{ex} - R_{n_i}^{ввх}}{\sin \alpha_i}, \quad R_{n_i}^{ex} = \sqrt{\frac{S_{n_i}^{ex}}{\pi}}, \quad R_{n_i}^{ввх} = \sqrt{\frac{S_{n_i}^{ввх}}{\pi}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

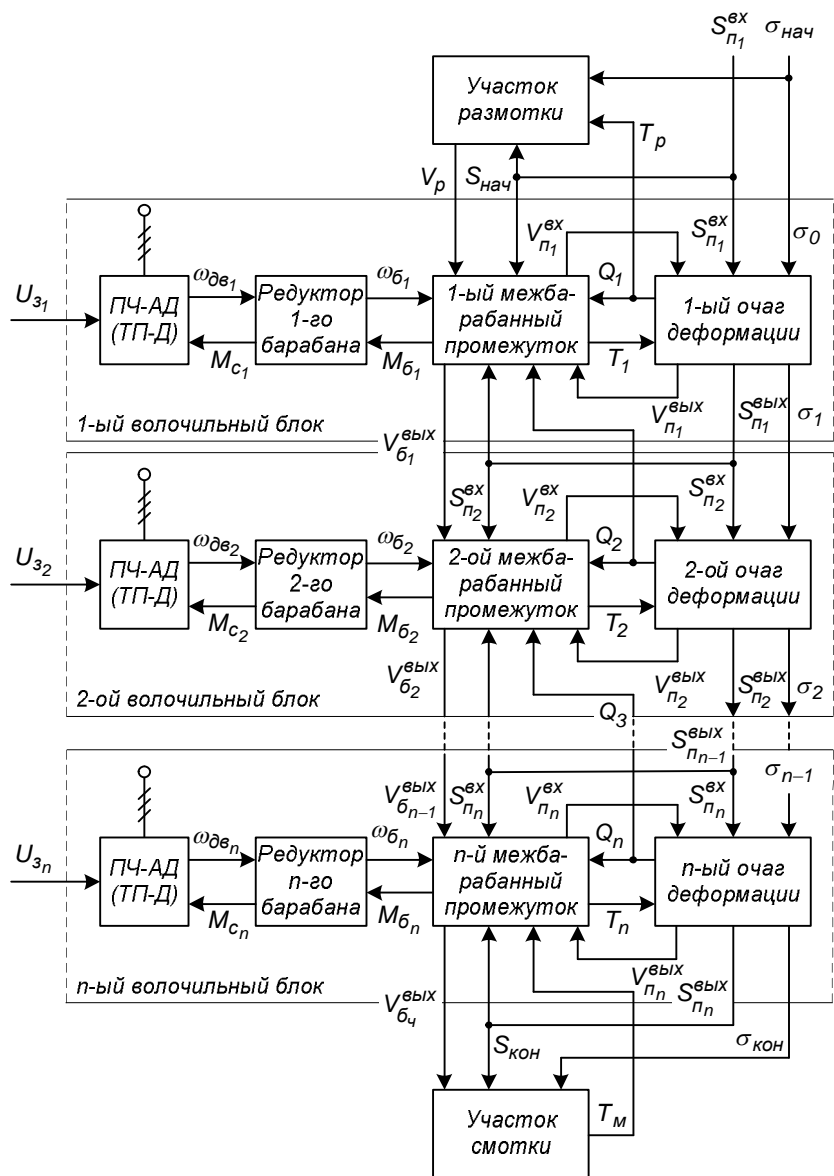


Рис. 2. Укрупненная структурная схема комплексной математической модели n -кратного прямоточного волоочильного стана как объекта управления

где S_{π}^{ex} , S_{π}^{blix} , R_{π}^{ex} , R_{π}^{blix} - соответственно площадь сечения и его радиус обрабатываемого металла на входе в очаг деформации и на выходе из него; V_{π}^{ex} , V_{π}^{blix} - скорость проволоки на входе в очаг деформации и на выходе из него; σ , $\sigma_{\pi c}$, $E_{\pi c}$ - истинное сопротивление деформации, предел пропорциональности и модуль упругости материала проволоки; $l_{обж}$, $l_{кал}$, α - длина обжимающей калибрующей частей волюки и ее полуугол; μ - коэффициент вытяжки; f - коэффициент трения в очаге; i - номер очага деформации в линии стана.

Разработанное математическое описание i -го межбарабанного промежутка представляется системой дифференциальных уравнений, записанной в операторном виде:

$$\left. \begin{aligned} M_{\sigma_i}(p) &= T_i(p) \cdot R_{\sigma_i}^{ex} - Q_{(i+1)}(p) \cdot R_{\sigma_i}^{blix} \\ V_{\sigma_i}^{ex}(p) &= \omega_{\partial\sigma_i}(p) \cdot R_{\sigma_i}^{ex}, \quad V_{\sigma_i}^{blix}(p) = \omega_{\partial\sigma_i}(p) \cdot R_{\sigma_i}^{blix}, \\ T_i(p) &= \left(V_{\sigma_i}^{ex} - V_{\pi_i}^{blix} \right) \cdot \frac{E_i \cdot S_{\pi_i}^{blix}}{L_{T_i} \cdot p}, \\ V_{\pi_i}^{ex} &= Q_i(p) \cdot \frac{L_{Q_i} \cdot p}{E_i \cdot S_{\pi_i}^{ex}} + V_{\sigma_{(i-1)}}^{blix} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

где L_T^{ex} , L_Q^{blix} - длина проволоки, на которой действуют соответственно силы T и Q ; V_{σ}^{ex} , V_{σ}^{blix} , R_{π}^{ex} , R_{π}^{blix} - соответственно линейные скорости проволоки и радиус барабана в точках его соприкосновения с проволокой при входе и выходе с него; ω_{σ} , $\omega_{\partial\sigma}$ - угловые скорости барабана и приводного электродвигателя; M_{σ} - момент сил натяжения и противонапряжения на валу барабана.

Математические описания системы ПЧ-АД, либо ТП-Д, а также редукторов в реализованной модели – подобны известным.

Анализ динамики процессов, происходящих в многократном прямоточном волочильном стане, является трудоемкой задачей, связанной с преобразованием сложных многосвязных структурных схем разработанной математической модели. Существенно упростить вычисления возможно с использованием

современных математических пакетов для ПЭВМ и методов теории автоматического управления [4-5]. Следует отметить, что в последнем случае выводы носят частный характер, поскольку получены для конкретного стана и процесса – конкретных конструктивных и технологических параметров.

На рис. 3-7 представлены логарифмические частотные характеристики (ЛАЧХ), построенные посредством математического пакета MATLAB 6.0 и описывающие процесс формирования противонатяжения – основного технологического параметра, обеспечивающего как эффективность, так и стабильность технологического процесса волочения в целом. В качестве примера характеристики построены для трехкратного волочильного стана ВПЦ 3-4/550, на рис. 3-7 $L_1 - L_3$ - соответствуют противонатяжениям в 1-3 межбарабанных промежутках.

Согласно разработанной структурной схеме математического описания многократного прямоточного волочильного стана управляющим воздействием для противонатяжения является момент двигателя вытяжного блока (рис. 3, 4). Возмущающими воздействиями являются изменение скорости волочения (рис. 5), условий деформации проволоки (рис. 6) и изменение натяжений до стана – на участке размотки (рис. 7, а) и после него – на участке смотки (рис. 7, б).

Приведенные логарифмические частотные характеристики электромеханической системы имеют подобный вид и отражают свойства преимущественно трех типичных звеньев – пропорционального (в области ультранизких и низких частот), интегрального (в области низких частот) и колебательного (в области высоких частот).

Управляющее воздействие в виде момента любого двигателя оказывает влияние на процесс формирования всех противонатяжений. Причем в статике это влияние распространяется на противонатяжения как по ходу технологического процесса, так и против него. В динамике же наиболее ощутимое воздействие наблюдается только в следующем по ходу технологического процесса межбарабанном промежутке. Так при воздействии моментом двигателя 1-го вытяжного блока с частотой более Ω^* (для приведенного случая – 0,001 рад/с) наиболее существенные изменения произойдут в противонатяжении второго межбарабанного промежутка. При подобном воздействии моментом двигателя последнего вытяжного блока ослабление влияния на противонатяжения в предыдущих межбарабанных промежутках увеличивается и достигает наибольшего значения в первом промежутке.

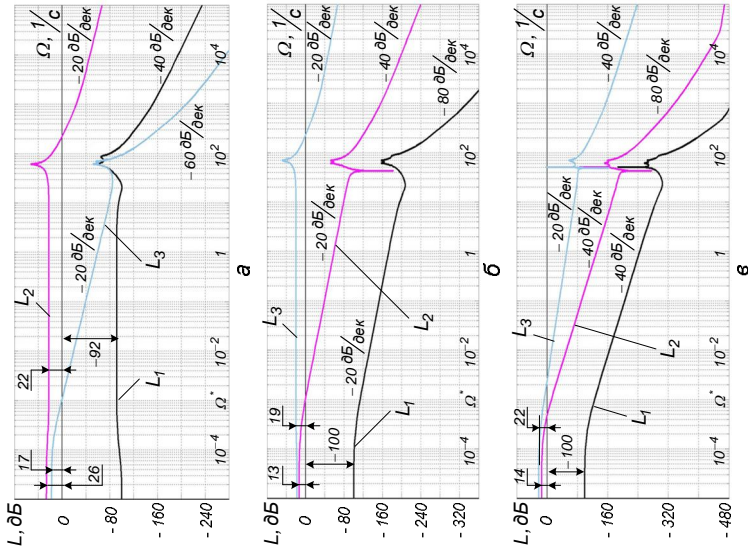


Рис. 3. ЛАЧХ противонапряжений по управляющему воздействию при последовательно соединенных якорях двигателей:
а, б, в - при воздействии 1-ым, 2-ым и 3-им двигателями

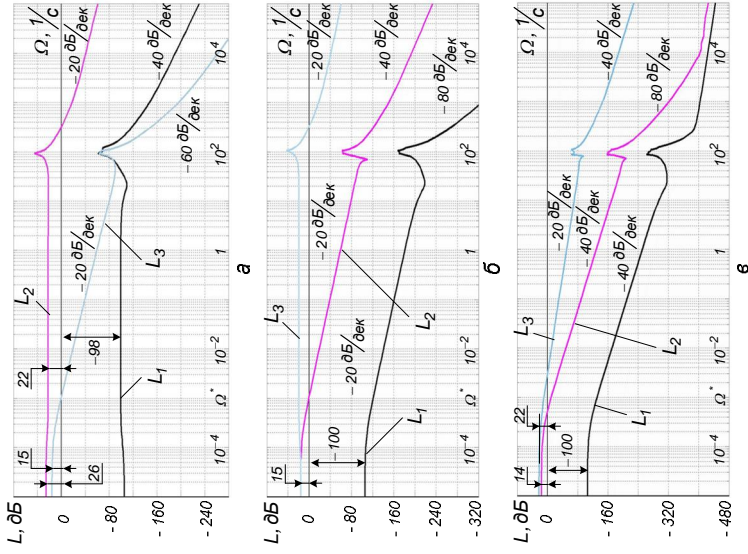


Рис. 4. ЛАЧХ противонапряжений по управляющему воздействию при параллельно соединенных якорях двигателей:
а, б, в - при воздействии 1-ым, 2-ым и 3-им двигателями

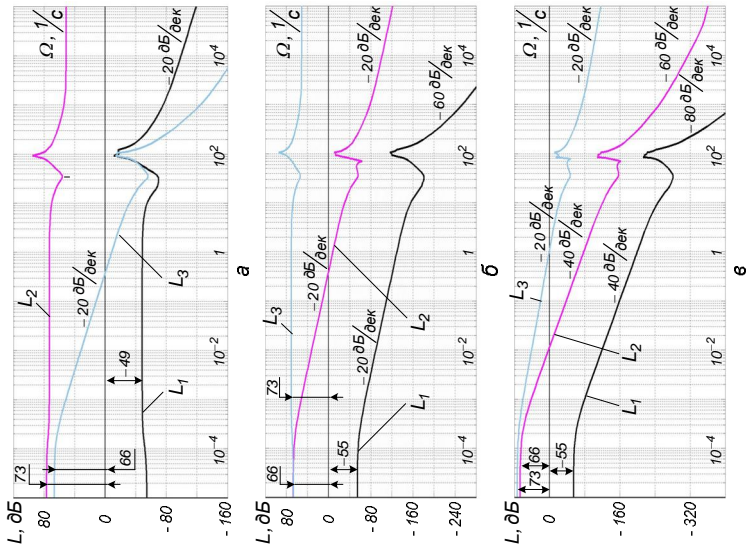


Рис. 5. ЛАЧХ противонапряжений по возмущающему воздействию в виде изменения скорости вращения: а, б, в - при воздействии 1-ым, 2-ым и 3-им двигателями

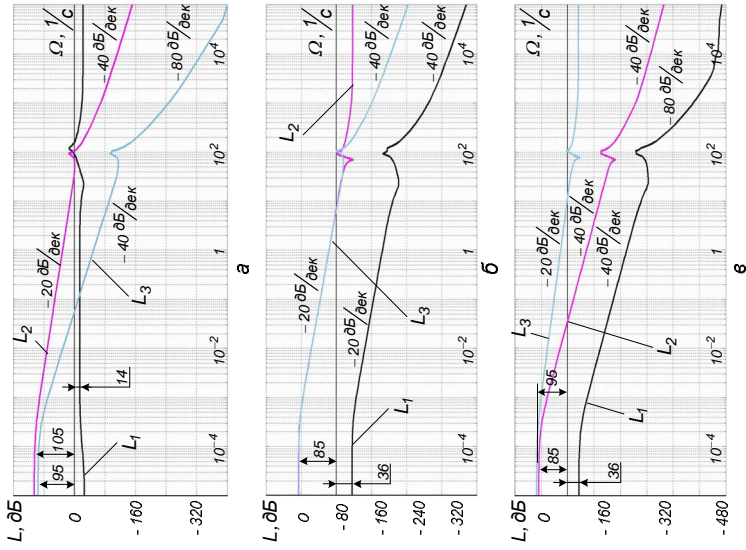


Рис. 6. ЛАЧХ противонапряжений по возмущающему воздействию в виде изменение условий деформации: а, б, в - при изменениях в 1-ом, 2-ом и 3-ем очагах деформации

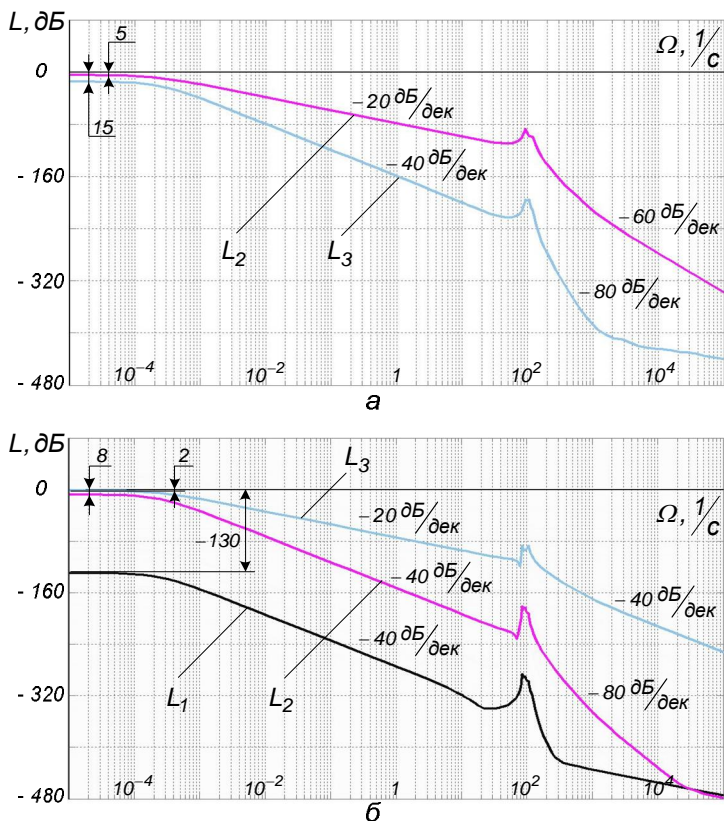


Рис. 7. Логарифмические частотные характеристики процесса формирования противонапряжений по возмущающему воздействию в виде натяжений проволоки на участках размотки (а) и смотки (б)

Для возмущающего воздействия в виде изменения скорости волочения в низкочастотной области имеется горизонтальный участок, из чего следует, что при изменении скорости волочения величина противонапряжения меняется. Иначе говоря, настроенный на заправочной скорости стан при выходе на рабочую скорость изменит свои энергетические характеристики таким образом, что величина противонапряжений увеличится. В об-

ласти средних частот также имеет место динамическая ошибка и наличие колебательного процесса.

Изменение условий деформации (режима и усилий волочения) существенно влияет на противонатяжения, причем имеют место, как гармонические колебания, так и изменения установившихся значений (см. рис. 6). Следует отметить, что такие воздействия оказывают более существенное влияние на процессы формирования натяжений, чем воздействие приводными электродвигателями. Так статический коэффициент усиления у такого возмущающего воздействия более чем в 5 раз больше по сравнению с управляющим воздействием.

Анализ частотных характеристик, приведенных на рис. 7, позволяет сделать вывод о слабом воздействии изменений натяжений размотки и смотки на процессы формирования противонатяжений в межбарабанных промежутках. Исключение составляет первый межбарабанный промежуток, в котором натяжение размотки является одновременно и противонатяжением.

Диапазон возможных частот колебаний противонатяжений для большинства эксплуатируемых на отечественных предприятиях станов составляет 60...120 рад/с.

Сравнительный анализ схем с последовательным и с параллельным соединением якорей двигателей постоянного тока показывает, что предпочтение с точки зрения динамики работы следует отдать параллельной схеме питания. Однако в статике с такой системой электропривода наблюдаются более существенные отклонения противонатяжений.

Сравнительный анализ параллельной и индивидуальной (в т. ч. на основе системы ПЧ-АД) схем питания показывает, что частотные характеристики электромеханической системы прямоточного волоочильного стана для них идентичны.

Таким образом, проведенные исследования динамических свойств применяемых в настоящее время систем электропривода прямоточных волоочильных станов показали, что:

- процесс формирования противонатяжений как по отношению к управляющему воздействию – моменту электродвигателей, так и возмущающим воздействиям – изменению скорости волочения, условий деформации, натяжений проволоки до стана и после него, носит колебательный характер;
- электромагнитный момент двигателя как управляющее воздействие оказывает существенное влияние на установившееся значение противонатяжений во всех межбарабанных промежутках, в динамике же наиболее ощутимое воздействие наблюдается

лишь в следующем по ходу технологического процесса межбарабанном промежутке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радионов А.А. Автоматизированный электропривод станов для производства стальной проволоки: Монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 311 с.
2. Линьков С.А., Радионов А.А. Математическая модель энергосиловых параметров при волочении проволоки в монолитной волоке // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. Вып. 12. – С. 149-157.
3. Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006614112. Программа для моделирования статических и динамических режимов работы трехкратного прямоточного волочильного стана / Радионов А.А., Линьков С.А.; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». - № 2006613330; заявл. 03.10.06; зарегистр. 01.12.06.
5. Кузовков Н.Т. Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах. – М.: Оборонгиз, 1960. – 263 с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с.

УДК 669.162

М.Ю. Рябчиков, Л.М. Трофимов

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОНУСНЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ В ДОМЕННОМ ЦЕХЕ ОАО «ММК»

Высокопроизводительная и экономичная работа доменной печи в значительной мере зависит от того, как организовано движение и распределение газов и шихты в ее рабочем пространстве. Материалы при загрузке должны распределяться равномерно по сечению печи, как по крупности, так и по компонентам шихты. У стен должно сосредотачиваться больше крупного агломерата с целью лучшего использования периферийных газов, а у оси – больше кокса. Большое количество мелких

фракций железосодержащих компонентов у стен печи недопустимо во избежание тугого хода. Основную часть мелких фракций необходимо располагать в промежуточном кольце между периферией и центром. По окружности печи материалы должны, наоборот, распределяться строго равномерно, т. е. так, чтобы любая окружность горизонтального сечения была кривой равного содержания диоксида углерода в газе и кривой одинаковой температуры.

Газовый поток в основном образуется в районе фурм и его кратчайший путь - вдоль стен печи. Газопроницаемость периферийной части столба материалов должна быть ниже осевой, поэтому в периферийной части должна быть большая рудная нагрузка. Поэтому специалисты, опираясь на многолетний опыт, считают, что для стабильного хода печи и высоких экономических показателей плавки наиболее важно обеспечить интенсивный осевой газовый поток и сформировать высокотемпературную зону когезии с обратным V-образным профилем. Для этого необходимо при загрузке кокса и руды в печь настроить определенным образом соотношение толщин их слоев в разных позициях по радиусу колошника и обеспечить локальную пониженную рудную нагрузку в осевой зоне.

На печах, оборудованных конусными загрузочными устройствами, регулировать величину рудной нагрузки по радиусу печи практически невозможно. Современным направлением в этой области является оборудование доменных печей бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ). БЗУ лоткового типа позволяет формировать слой шихтовых материалов на колошнике доменной печи согласно заданной программы загрузки путём вращения и наклона лотка во время выгрузки материала в печь. БЗУ установленное в доменном цехе ОАО «ММК» на печи №9 по конструкции включает в себя (см. рис. 1):

- приёмный бункер – для приёма материалов с бункерной эстакады (система нижней загрузки);
- шихтовый бункер, система уплотнительных клапанов и система сброса и выравнивания давления в бункере образуют шлюз между печью и атмосферой, который позволяет загружать материалы в печь, находящуюся под давлением;
- верхний шихтовый затвор, позволяющий управлять выгрузкой материалов из приемного бункера в шихтовый бункер;
- нижний шихтовый затвор, позволяющий регулировать поток материала во время выгрузки;

- весовая система для измерения массы материала в шихтовом бункере;
- распределительный лоток, обеспечивающий распределение материалов на колошнике по заданной программе путем его наклона и вращения
- редуктор, обеспечивающий вращение и наклон лотка БЗУ.

Работой БЗУ управляет система на базе контроллеров Siemens S7-414H разработанная фирмой поставщиком PAUL WURTH. Одной из важнейших подсистем является блок управления наклоном и вращением лотка.

Данная подсистема до последнего времени имела недостаток, связанный с отсутствием автоматической коррекции угла открытия шихтового затвора при выгрузке материалов в печь. Из-за постоянных колебаний гранулометрического состава шихты и кокса, их насыпной плотности и влажности, обеспечение выгрузки заданной массы материалов печь на заданное количество оборотов лотка при распределении обеспечить довольно трудно, поэтому суммарная ошибка составляет от 0,5 до 1 оборота лотка, что влечет за собой серьёзные нарушения технологии загрузки.

Данную проблему можно решить эффективным регулированием потока материала из бункера БЗУ путём регулирования угла открытия шихтового затвора. Подобная коррекция может проводиться как статически (после каждой выгрузки), так и динамически (во время выгрузки). Однако в существующей системе по проекту PAUL WURTH программно данные режимы не были реализованы, автоматической коррекции угла открытия шихтового затвора при выгрузке материалов в печь не производилось, ее проводил оператор-технолог в меру своей компетенции. Для более эффективного управления БЗУ требуется реализовать режимы автоматической коррекции угла открытия шихтового затвора в технологической программе БЗУ.

В целом, коррекция открытия шихтового затвора может быть осуществлена на основе применения статических периодически корректируемых зависимостей расхода шихты от угла.

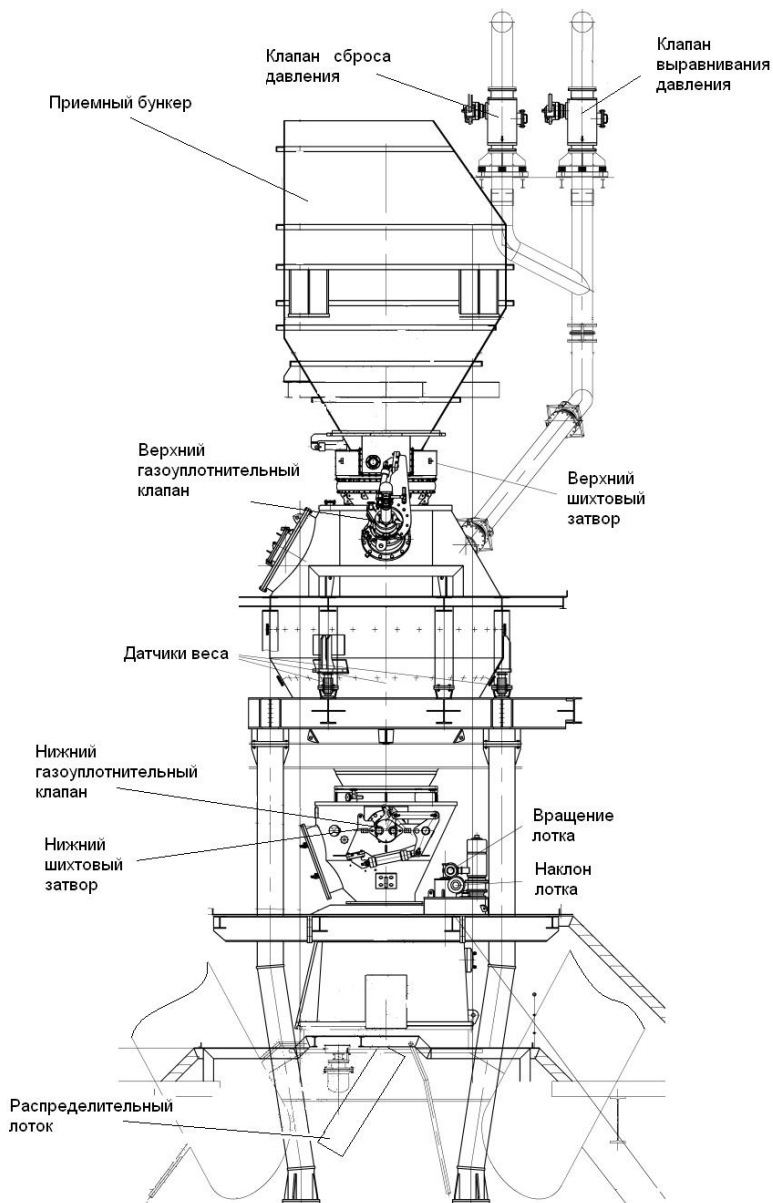


Рис. 1. Конструкция БЗУ лоткового типа фирмы

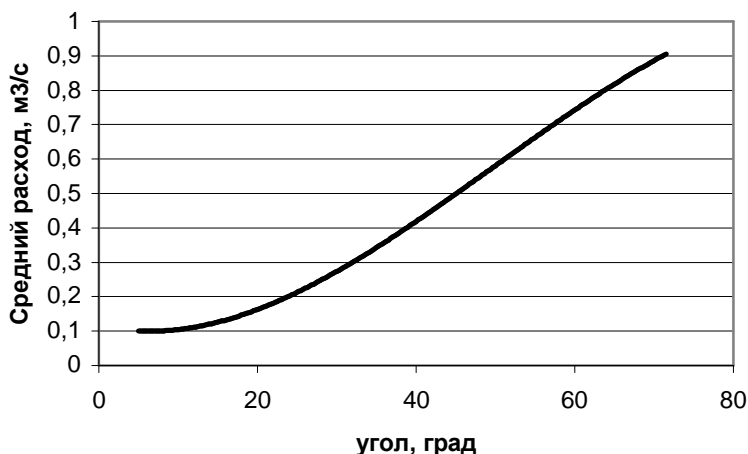


Рис.2. Вариант возможной зависимости расхода шихты от угла открытия шихтового затвора

Коррекция кривых расхода шихты через шихтовые затворы выполняется в соответствии с отклонением от требуемого значения расхода при действительном используемом значении угла α_i . Поправки к кривым расхода шихты для положений, более далеких от реального используемого положения α_i , уменьшается (интерполяция). Корректировка осуществляется наклоном кривой (рис. 2). Данные кривые различны для компонентов шихты и представляются в памяти контроллера в форме таблиц - набора отдельных точек.

Алгоритм блока статической коррекции представлен на рис. 3.

Согласно данному алгоритму на первом этапе по фронту окончания выгрузки производится определение фактического потока материала, усредненного за выгрузку. Далее рассчитывается отклонение фактического потока от заданного и определяется положение текущей рабочей точки в таблице материалов. В зависимости от величины отклонения потока и положения точки в таблице относительно текущей рабочей для каждой точки таблицы углов открытия шихтового затвора рассчитывается новое значение угла.

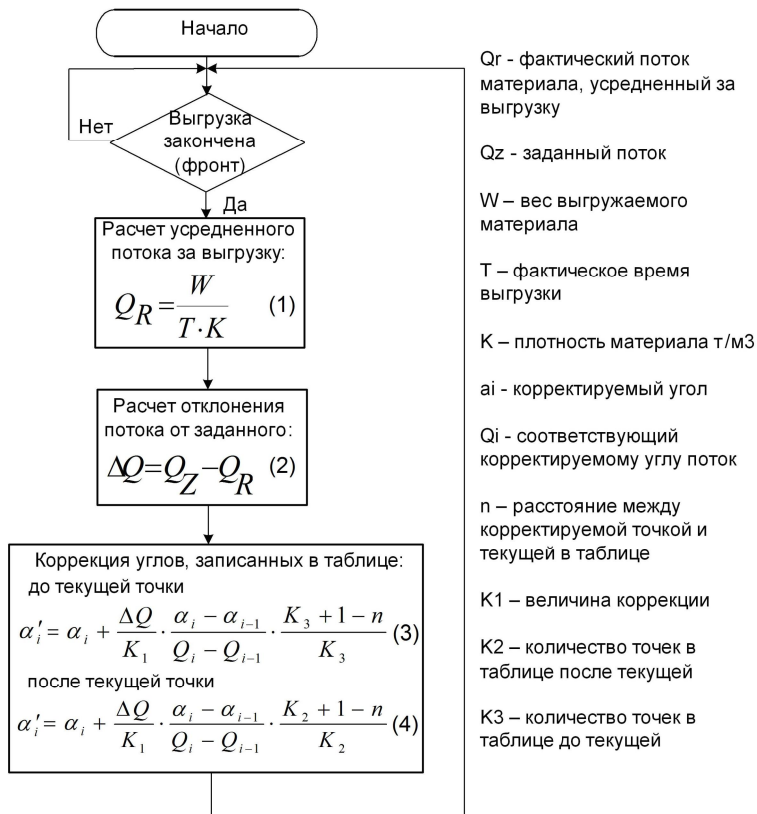


Рис. 3. Алгоритм программного блока статической коррекции

Расчет в рабочей точке осуществляется по формуле:

$$\Delta \alpha_i = \Delta Q_i \cdot \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1}}{Q_{i+1} - Q_{i-1}} \quad (5)$$

Здесь $\Delta \alpha_i$ – коррекция угла в рабочей точке; ΔQ_i – отклонение фактического потока от заданного; α_{i+1} и α_{i-1} – значение угла при следующем и предыдущем табличном значении расхода Q_{i+1} и Q_{i-1} соответственно.

Графически данный способ проиллюстрирован на рис. 4. Показано два подобных согласно (5) треугольника со сторонами $Q_{i+1} - Q_{i-1}$, $\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1}$ и ΔQ , $\Delta\alpha_i$. В таблицах происходит корректировка значений угла при неизменных значения расхода материалов.

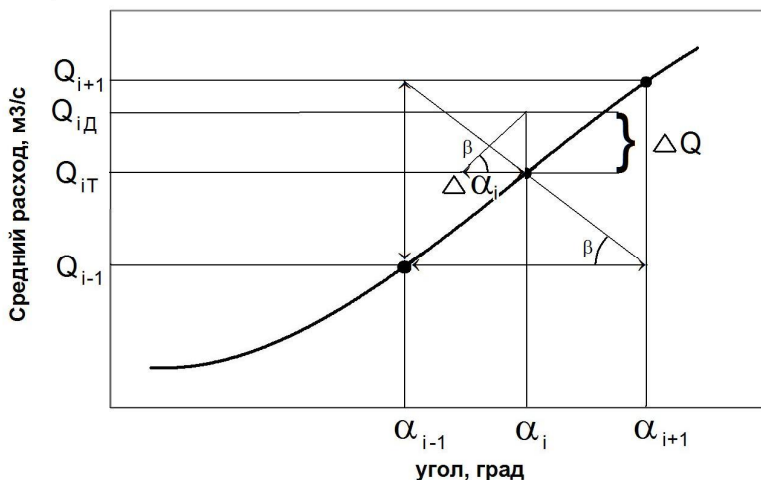


Рис.4. Расчет нового значения угла открытия шихтового затвора

Коррекция в остальных точках производится по формулам (3) и (4) в зависимости от их “удаленности” от рабочей (см. рис. 3). Чем дальше очередная точка от рабочей, тем меньше величина коррекции.

Расчет фактического расхода при выгрузке производится с учетом измеренного времени выгрузки:

$$QR = \frac{W}{T_R \cdot K} \quad (6)$$

Здесь QR – фактический расход; TR – Фактическое время выгрузки.

На рис. 5 и рис. 6 показаны отклонения по времени выгрузки при работе системы автоматической коррекции угла открытия затвора и без нее соответственно.

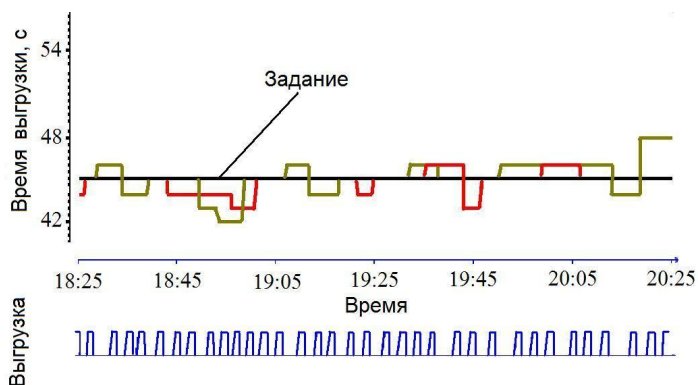


Рис. 5. Отклонения от заданного времени выгрузки материалов при работе системы автоматической коррекции угла открытия затвора

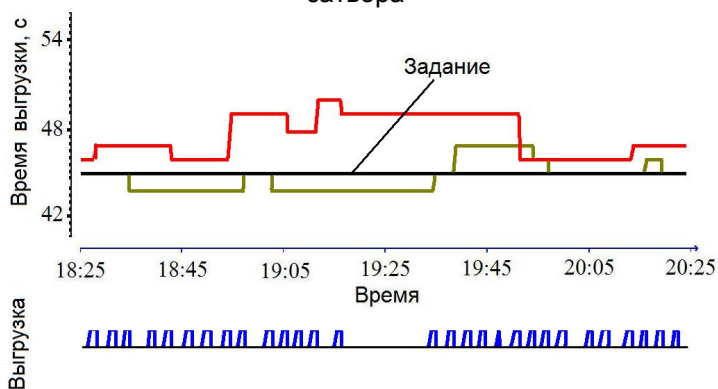


Рис. 6. Отклонения от заданного времени выгрузки материалов в случае, когда коррекции угла открытия затвора осуществляет оператор

Из рис. 6 видно, что оператор, как правило, не принимает своевременных шагов по внесению корректировок, что может приводить к существенным отклонениям (порядка 500 кг) при выгрузке материала. Таким образом, создание соответствующего программного обеспечения на базе контроллеров Siemens позволило достигнуть более ровного хода доменной печи за счет повышения точности распределения материалов при загрузке.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Целью работы является разработка и математическое описание системы автоматической оптимизации энергетического режима дуговых сталеплавильных печей (ДСП).

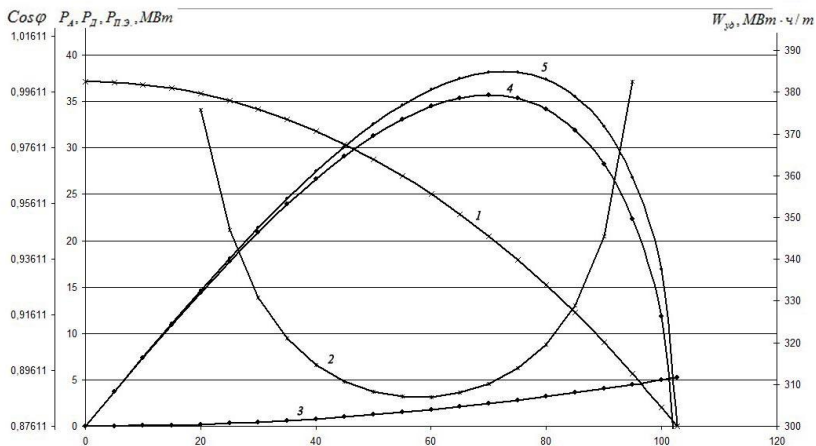
Статические рабочие характеристики ДСП принято рассчитывать как функции от рабочего тока дуги. Основные рабочие характеристики ДСП приведены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, зависимости активной мощности, потребляемой печью, и мощности дуги от рабочего тока дуги имеют экстремальный унимодальный вид, при этом значение активной мощности доступно для прямого контроля. Следовательно, целесообразно поддерживать такое оптимальное значение рабочего тока дуги, при котором значение активной мощности достигает максимального значения.

Задачей разрабатываемой системы является достижение и поддержание системой максимально возможного текущего значения потребляемой ДСП активной мощности в условиях высокочастотных помех, создаваемых электромагнитным полем печи, и сложного технологического дрейфа статической характеристики.

Управление энергетическим режимом ДСП может осуществляться за счёт изменения рабочего тока дуги (изменением положения электрода) и путём переключения ступени напряжения низкой стороны трансформатора. Предлагаемая система максимизирует значение активной мощности за счёт изменения длины дуги для каждой ступени напряжения печного трансформатора.

Система оптимизации реализуется на промышленном компьютере, сигналы текущих значений технологических параметров необходимых для управления и сигналы управления электродами передаются по интерфейсным каналам. Сигнал управления электродами формируется программой, реализующей алгоритм нейросетевой оптимизации. Блок-схема оптимизирующей программы приведена на рисунке 2.



1 - $\cos \varphi$; 2 – удельная энергия, затрачиваемая на выплавку тонны стали, $W_{уд}, MBm \cdot ч / m$; 3 – мощность электрических потерь, $P_{П.Э.}, MBm$; 4 – мощность, выделяемая в дуге, $P_{Д.}, MBm$; 5 – активная мощность, потребляемая печью, $P_{А.}, MBm$

Рисунок 1 – Рабочие статические характеристики ДСП при напряжении трансформатора 1291 В:

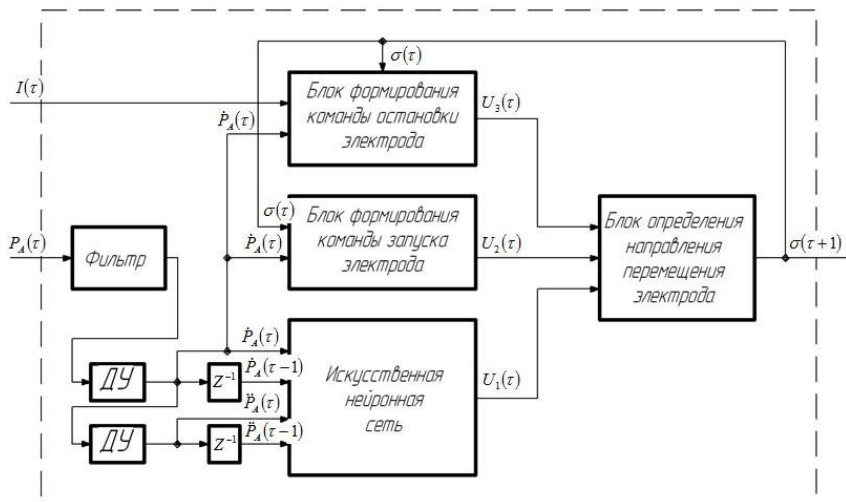


Рисунок 2. Блок-схема оптимизирующей программы

Нейросетевой оптимизатор включает в себя четыре функциональных блока.

Блок определения момента переключения направления перемещения электрода представляет собой искусственную нейронную сеть архитектуры многослойный перцептрон, содержащий четыре входных нейрона, один выходной и два скрытых слоя по восемь нейронов. В качестве входных сигналов нейросети используются значения первой и второй производных сигнала активной мощности в текущий и предыдущий моменты времени. Перед началом работы данная нейронная сеть обучается по выборке образов, сформированных с использованием двух классических алгоритмов оптимизации: алгоритма с запоминанием максимума выходного параметра и алгоритма с запоминанием максимума скорости изменения выходного параметра. Таким образом, обученная нейронная сеть, аппроксимирующая ряд классических правил, позволяет формировать закон управления напрямую, без перехода к аппарату нечёткой логики, если требуется объединить при управлении ряд правил.

Блок схема включает также блок определения момента остановки электрода и блок определения момента запуска электрода. В задачи этих блоков входит формирование команды остановки и повторного запуска электрода соответственно на основе информации о текущих значениях технологических параметров.

Блок выбора направления перемещения электрода определяет текущее направление движения на основе сигналов, полученных из трёх описанных блоков.

При обучении нейросети использовался алгоритм обратного распространения ошибки. Данный алгоритм по сути реализует поиск минимума функции энергии ошибки в пространстве синаптических весов методом наискорейшего спуска. Работа алгоритма включает в себя два этапа: прямой проход, в процессе которого вычисляется функциональный сигнал, и обратный проход, в процессе которого корректируются синаптические веса нейронов.

В реальных промышленных условиях на сигналы, поступающие с первичных преобразователей, накладываются высокочастотные помехи, вследствие влияния электромагнитных полей, возникающих в результате работы печи. Поэтому, для адекватной и качественной работы системы оптимизации необходимо осуществлять фильтрацию сигнала.

В данной работе предлагается осуществлять фильтрацию сигнала программно, используя алгоритм адаптивной линейной фильтрации. Фильтр, по сути, представляет собой искусственную нейронную сеть архитектуры однослойный перцептрон с линейной функцией активации выходного нейрона и встроенным алгоритмом адаптации. На вход фильтра поступают сигналы рабочего тока дуги за шесть равно отстоящих друг от друга моментов времени. На выходе фильтра формируется отфильтрованное значение активной мощности, которое используется в дальнейшем алгоритмом оптимизации для управления. Процесс адаптации фильтра, то есть подстройка весовых коэффициентов, осуществляется на основе сигнала рассогласования между текущим действительным значением активной мощности и выходным значением фильтра в соответствии с алгоритмом минимизации среднеквадратической ошибки. Теоретически, фильтр выдаёт адекватный результат по истечении некоторого времени от начала процесса адаптации, поскольку скорость процесса адаптации конечна, а работа начинается с произвольных синаптических весов. Однако моделирования показали, что выходной сигнал фильтра можно использовать для управления сразу же после начала работы, поскольку скорость изменения выходного сигнала фильтра приблизительно равна скорости изменения активной мощности, а для управления используются именно производные сигнала.

Для проверки работоспособности данной системы в реальных производственных условиях были проведены испытания системы на модели электрического режима ДСП-180. Моделирование проводилось в соответствии со структурной схемой и математической моделью, приведённой на ДЛ 6.

В модели электрического режима ДСП-180 учитываются его статические и динамические свойства. Статические свойства описываются полиномом четвёртой степени, динамические – системой дифференциальных уравнений первой степени. Также, моделировались высокочастотные помехи, накладываемые на информационные сигналы технологических параметров.

Для моделирования помех необходимо было установить вид и параметры закона распределения. Для этого был обработан массив из десяти тысяч пар данных, сформированный в ходе плавов на ОАО «ММК» на ДСП 1. Было установлено, что помехи распределяются в соответствии с нормальным законом и определён коэффициент масштаба распределения. При моделировании помех значения, распределённые в соответствии с

нормальным законом, были получены с использованием преобразования Бокса-Мюллера.

Результаты моделирования работы системы нейросетевой оптимизации приведены на рис. 3а, 3б, 3в, 3г. На рисунках представлены переходные процессы и фазовые портреты работы системы в условиях стабильной статической характеристики и в условиях технологического дрейфа.

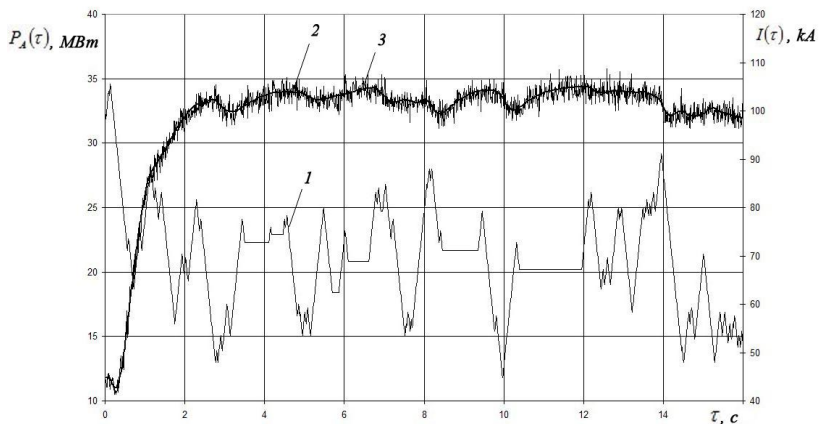


Рис. 3а. Переходный процесс в условиях стабильной статической характеристики

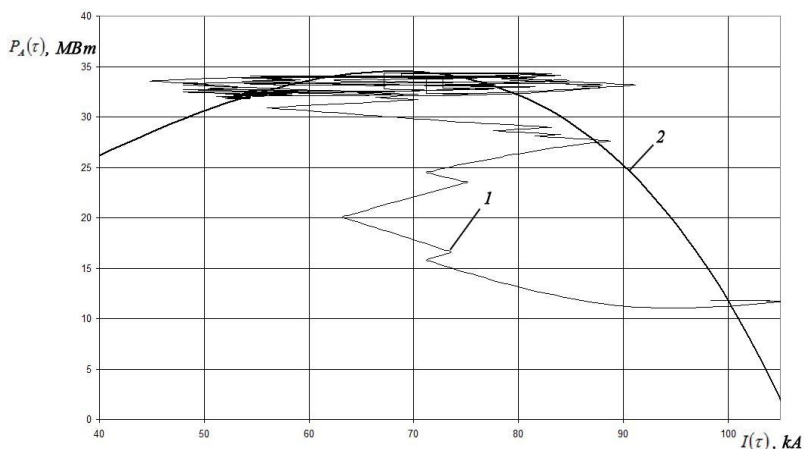


Рис. 3б. Фазовый процесс в условиях стабильной статической характеристики

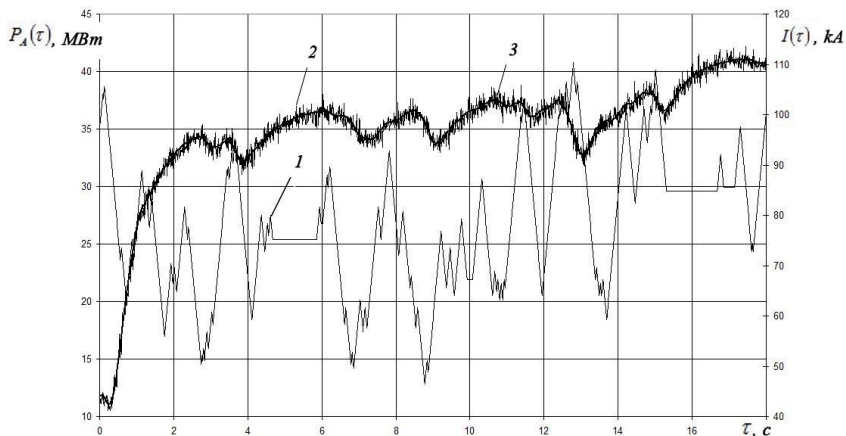


Рис. Зв. Переходный процесс в условиях дрейфа статической характеристики

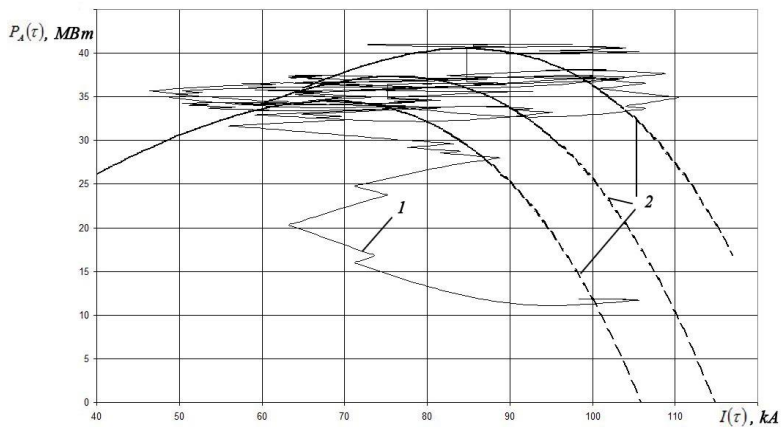


Рис. Зг. Фазовый процесс в условиях дрейфа статической характеристики

В результате было установлено, что данная система выводит значение потребляемой активной мощности в окрестности оптимума не более чем за 2,5 с, при этом среднее значение активной мощности в процессе управления начиная от момента выхода в окрестности оптимума составляет не менее 94% от максимально возможного значения на данной ступени напряжения трансформатора.

Результаты моделирования работы системы показывают, что система способна адекватно работать в сложных производственных условиях, при этом обладает необходимым быстрым действием и высоким качеством управления.

УДК 669.074

**Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев
М.Ю. Рябчиков, Гуков Д.В.**

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

Объектом исследования является методическая печь стана «2000» цеха горячей прокатки ОАО «ММК». Целью работы является оптимизация распределения тепловых нагрузок по зонам методической печи с целью экономии газа. Для исследований использовалась математическая модель процесса нагрева металла в методической печи.

Нагреваемый металл, рассматриваемый изолированно или совместно с нагревательным устройством, представляет собой динамическую систему с распределенными параметрами. Задача оптимального управления такой системой формулируется следующим образом: объект управления – нагреваемый металл – необходимо перевести из некоторого исходного состояния в конечное заданное так, чтобы выбранный показатель качества процесса оказался при этом оптимальным – минимальным или максимальным. При реализации оптимального управления необходимо учитывать ограничения, обеспечивающие требуемое качество нагреваемого металла – температура поверхности металла должна быть ниже температуры пережога, термические напряжения не должны приводить к разрушению металла и т. д. В качестве оптимизируемого показателя качества процесса могут выступать: удельный расход топлива, угар металла, длительность процесса нагрева, общий расход средств на нагрев и др. Изменяя функцию управляющего воздействия в процессе оптимального управления, обычно удается найти такое ее значение, чтобы показатель качества процесса достиг оптимума [1].

Наряду с классическими вариационными методами задачу оптимального управления можно решить с помощью линейных методов решения – простейшего, с математической точки зрения, прямого метода (итерационный процесс последовательного улучшения показателя качества).

В данной работе рассматривается решение задачи по нахождению такого статического пространственного распределения температуры по зонам нагревательной печи, которое минимизирует общий расход топлива на нагрев металла. Полагаем, что скорость продвижения металла в печи постоянна, нагреваемые заготовки – термически массивные тела, границы верхних и нижних зон в печи совпадают.

Варьируемую функцию $t_c(i)$ (температура в центре i -той зоны печи) зададим значениями, равными температуре перегрева сляба. При этом первый вариант управления нагревом сляба будет точно правильным, но не всегда оптимальным. Температура в остальных точках печи $t_c(y)$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Варьируя функцию $t_c(i)$, добьемся, чтобы заготовка нагрелась до заданной температуры не перегреваясь в процессе нагрева, а также добьемся минимума функционала [2]:

$$B[t_c(x)] = k \int_0^l b dy = \min, \quad (1)$$

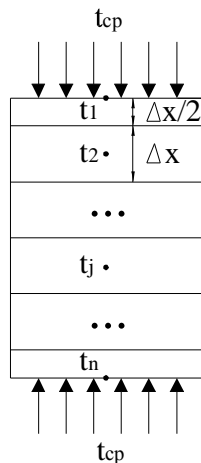
где b - расход топлива в единицу времени, м³/с;
 B - интегральное количество топлива, израсходованной на нагрев металла, Дж;
 k - коэффициент пропорциональности;
 l - длина печи, м.

Теперь сформулируем зависимость между температурой металла, температурой среды и расходом топлива, для чего составим уравнение теплового баланса нагревательной печи:

$$Q_{хим} + Q_{физ} = Q_{пол} + Q_{yx} + Q_n, \quad (2)$$

где $Q_{хим}$ - тепло от сгорания топлива, Дж;
 $Q_{физ}$ - физическое тепло воздуха и топлива, Дж;
 Q_{yx} - тепло уходящих продуктов, Дж;
 Q_n - потери тепла через кладку, Дж;
 $Q_{пол}$ - полезное тепло нагрева металла, Дж.

Нагрев металла будем моделировать при граничных условиях 3-го рода. Для расчета температур внутри заготовки толщиной R разбиваем её на n тонких слоев так, как показано на рисунке 1, где $\Delta x = R/(n-1)$. Пронумеруем слои 1, 2, ..., n . Температуры в центре каждого внутреннего элемента разбиения обозначим t_2, t_3, \dots, t_{n-1} , а температуры поверхностей в граничных элементах обозначим t_j и t_n . Внутренние тепловые потоки определяются только теплопроводностью между слоями, а внешние тепловые потоки складываются из радиационного, конвективного, кондуктивного тепловых потоков.



t_{cp} – температура греющей среды

Рисунок 1 – Расчетная схема математической модели сляба

В течение единичного промежутка времени на единицу площади границы j -тый элемент получает тепло от элементов $j-1$ и $j+1$ в количестве:

$$q_{внутр} = \lambda(t_j) \frac{t_{j-1} - t_j}{\Delta x} + \lambda(t_j) \frac{t_{j+1} - t_j}{\Delta x}, \quad (3)$$

где $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности пластины при температуре t , Вт/(м·К).

Полученное тепло расходуется на изменение температуры j -того слоя ($j = 2, 3, \dots, n-1$) на dt_j за небольшой интервал времени dt , т.е.:

$$\Delta t_j = \frac{\Delta \tau}{\rho(t_j)c(t_j)\Delta x} \left[\lambda(t_j) \frac{t_{j-1} - t_j}{\Delta x} + \lambda(t_j) \frac{t_{j+1} - t_j}{\Delta x} \right]. \quad (4)$$

Температуру слоев 1 и n будем рассчитывать при граничных условиях третьего рода, т.е. известна температура греющей среды $t_{cp}(t)$ и известны условия теплообмена на границах.

В методических печах металл получает тепло преимущественно (около 80%) лучистым (радиационным) теплообменом, часть тепла передается при помощи конвекции:

$$q_{внеш} = \sigma_{np} \frac{(t_{cp} + 273)^4 - (t_{нов} + 273)^4}{10^8} \alpha \cdot (t_{cp} - t_{нов}), \quad (5)$$

где σ_{np} – приведенный коэффициент излучения в системе газ-кладка-металл; α – коэффициент теплоотдачи.

Следовательно, изменение температуры слоев 1 и n будем рассчитывать по следующим формулам:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta \tau}{\rho(t_1)c(t_1)\Delta x} \left[q_{внеш1} + \lambda(t_1) \frac{t_2 - t_1}{\Delta x} \right], \quad (6)$$

$$\Delta t_n = \frac{\Delta \tau}{\rho(t_n)c(t_n)\Delta x} \left[\lambda(t_n) \frac{t_{n-1} - t_n}{\Delta x} + q_{внеш2} \right], \quad (7)$$

где $q_{внеш1}$ – это $q_{внеш}$ при $t_{пов}=t_1$,
 $q_{внеш2}$ – это $q_{внеш}$ при $t_{пов}=t_n$.

Последовательно находя значения температуры для моментов времени dt , $2dt$, и т.д., можно получить расчетную кривую изменения температуры во времени.

При расчете следует учесть приращение температуры, а значит и количество получаемого тепла в течение выбранного шага по времени dt не должно существенно влиять на теплообмен между соседними слоями, следовательно,

$$\Delta\tau = \frac{\rho \cdot c(t_j) \cdot \Delta x}{\Delta q_j} \cdot \eta, \quad (8)$$

где $\eta \ll 1$ – константа, от которой зависит точность расчета.

Алгоритм расчета температур сляба при нагреве

Тепловое состояние сляба описывается с помощью следующей вычислительной процедуры:

- ввод исходных данных – начальное распределение температуры по сечению сляба;
- разбиение сляба на слои;
- расчет тепловых потоков на границах слоев, исходя из соотношения (3);
- расчет шага по времени, исходя из соотношения (8);
- расчет значений температур слоев по уравнениям (4), (6), (7).
- повторение этапов 3-5, пока суммарное время не достигнет необходимого значения. Зная теперь $Q_{пол}$ можно найти расход топлива

$$b_i = \frac{Q_{пол} + Q_n}{Q_H^P - (1 - k_p)k_\delta c_\delta}. \quad (9)$$

Алгоритм, реализующий прямой вариационный метод для оптимизации процесса нагрева металла в печах с шагающими балками

Алгоритм реализуется с помощью следующей вычислительной процедуры:

- задаем начальное распределение температур по зонам равное температуре перегрева сляба;
- задаем начальное значение шага варьирования как половину разности максимальной и минимальной температур зон печи;
- вызываем процедуру рекурсии по зонам печи для трех вариантов:
- уменьшаем шаг варьирования в два раза;
- повторяем этапы 3 и 4 пока шаг не станет меньше заданного значения точности.

Моделирование радиационного теплообмена

Температура газов в газовой рабочей зоне методической печи обычно находится в пределах от 800 до 1350°C. При температуре газов примерно 800°C роль лучеиспускания и

конвекции приблизительно одинакова. При увеличении температуры в рабочем пространстве выше 800°C теплопередача конвекцией изменяется мало, а теплопередача лучеиспусканием сильно возрастает. При температуре газов примерно 1300°C на долю радиационного теплопереноса приходится уже около 80% всей передаваемой теплоты.

Таким образом, основным видом теплопередачи в рабочем пространстве печи является излучение.

Поверхность нагреваемого тела, находясь в непосредственном соприкосновении с газами, помимо лучеиспускания, воспринимает тепло конвекцией. Поверхность кладки также воспринимает тепло конвекцией, причем это тепло далее путём излучения передается нагреваемой поверхности.

Необходимо отметить, что в действительности тепло, полученное кладкой от газа лучеиспусканием и конвекцией, не идет полностью на нагревание массы кладки, а в некоторой степени расходуется на покрытие потерь через кладку в окружающую среду.

Таким образом происходит теплообмен излучением и конвекцией между газом и кладкой, газом и нагреваемым телом и кладкой и нагреваемым телом. При этом кладка выполняет роль посредника в передаче тепла между газами и нагреваемой поверхностью. В большинстве случаев роль в кладки в процессах теплопередачи значительна.

Следовательно, нагреваемое тело получает тепло излучением и конвекцией от газа и излучением от кладки.

Моделирование теплообмена излучением между твердыми телами

Пусть две небольшие плоские поверхности F_1 и F_2 , произвольно расположены в пространстве, имеют коэффициенты излучения соответственно C_1 , C_2 и температуры T_1 и T_2 . Расположение поверхностей приведено на рисунке 2. Расстояние между центрами поверхностей равно r метров и углы, образованные нормальными к поверхности и прямой соединяющей центры, равны φ_1 , φ_2 .

Согласно закону Ламберта и закону расстояния, количество тепла, излучаемого одной поверхностью на другую, равно:

$$E = \frac{1}{\pi} C \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \cos \varphi \omega F, \quad (10)$$

где C – коэффициент излучения поверхности, Дж/(м²·с);
 ω – телесный угол, под которым видна поверхность.

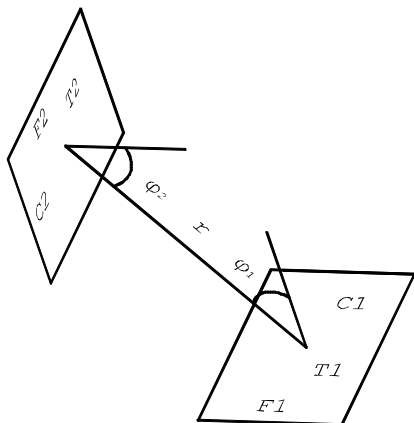


Рисунок 2 – Взаимное облучение поверхностей

Количество тепла, поглощаемого поверхностями, пропорционально их коэффициенту поглощения. Практически коэффициент поглощения технических поверхностей колеблется в пределах 0,7-0,9, то есть, близок к единице, поэтому при расчетах можно пренебречь отражением поверхности. При этих допущениях количество тепла, поглощенное поверхностью 2, при коэффициенте поглощения $a_2 = C_2/C_s$, равно:

$$Q_1 = \frac{1}{\pi} \frac{C_1 C_2}{C_s} \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} F_1 F_2 \Delta t. \quad (11)$$

Количество тепла, поглощенное поверхностью 1, при коэффициенте поглощения $a_1 = C_1/C_s$, равно:

$$Q_2 = \frac{1}{\pi} \frac{C_1 C_2}{C_s} \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} F_1 F_2 \Delta t. \quad (12)$$

Следовательно, количество тепла, передаваемое поверхностью 1 поверхности 2, равно:

$$Q = \frac{1}{\pi} \frac{C_1 C_2}{C_s} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} F_1 F_2 \Delta t. \quad (13)20$$

Рассмотренное уравнение теплопередачи лучеиспусканием справедливо для небольших, сравнительно с расстоянием между ними, поверхностей и имеющих коэффициенты излучения близкие к коэффициенту излучения абсолютно черного тела [3].

Моделирование теплообмена излучением между газом и окружающими стенками методической печи

Газообразные тела в отличие от твердых тел характеризуются малой поглощательной способностью, и значительная часть лучистой энергии проходя через слой газа, не задерживаясь.

Спектр поглощения газов в отличие от спектра поглощения твердых тел является дискретным. Газы поглощают тепловую энергию только в определенных интервалах длин волн. Излучение газов также является дискретным.

Все газы в той или иной степени поглощают часть лучей, однако одно- и двухатомные газы поглощают лучи в настолько узких пределах длин волн, что их можно считать практически лучепрозрачными. К таким газам относится кислород, азот и др. Трех- и выше атомные газы имеют несколько полос поглощения в более широких пределах длины волны. Такие газы считаются относительно нелучепрозрачными, к их числу относятся водяные пары и углекислый газ [4].

Поглощение газами тепловой энергии зависит от концентрации лучепоглощающего газа (его парциального давления p в смеси газов) и длины пути поглощения луча $S_{эф}$.

Длина пути поглощения $S_{эф}$ характеризует толщину слоя поглощения газа и определяется по формуле:

$$S_{эф} \approx 3,6V / F_v, \quad (14)$$

где V – объем, заполненный излучающим газом, m^3 ;
 F_v – площадь стенок, ограничивающих этот объем, m^2 .

Таким образом, степень черноты излучающего газа зависит от его парциального давления, толщины слоя газа и его температуры.

Плотность теплового потока, излучаемого слоем газа, можно найти из выражения:

$$q_z = \varepsilon_z C_s \left(\frac{T_z}{100} \right)^4, \quad (15)$$

где ε_z – степень черноты газа.

Зная температуру газа и произведение $Sz\phi \cdot p$, определяют степень черноты углекислого газа ε_{CO_2} и водяных паров ε_{H_2O} . По найденным значениям ε_{CO_2} и ε_{H_2O} можно рассчитать суммарную степень черноты излучающего газа:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}. \quad (16)$$

Газ имеющий степень черноты ε_z , температуру T_z , и окружающие стенки с температурой T_{cm} и степень черноты ε_{cm} участвуют в теплообмене, в результате которого на 1 м^2 поверхности стенок за одну секунду газ излучает количество тепла, определяемое по формуле (15).

Так как стенка имеет степень черноты ε_{cm} , то она поглощает только часть падающего на нее излучения, а часть тепла отражается. Отраженное тепло частично поглощается слоем газа, а частично пройдя через него, попадает на противоположную поверхность.

Результирующий тепловой поток от газов к стенке можно определить по формуле [4]:

$$Q = \frac{5,7}{\frac{1}{\varepsilon_z} + \frac{1}{\varepsilon_{cm}} - 1} \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right] F, \quad (17)$$

где F – площадь стенок, м^2 .

Математическая модель методической печи стана «2000» ЛПЦ-10 ОАО «ММК»

Созданная модель представляет собой динамическую математическую модель процесса теплообмена излучением и теплопроводностью в рабочем пространстве методической печи.

В реальных процессах обмен тепловой энергией происходит внутри твердых тел теплопроводностью, между несоприкасающимися твердыми телами – излучением, между газом и твердыми телами излучением и конвекцией. Теплообмен теплопроводностью называется внутренним теплообменом, теплообмен излучением и конвекцией – внешним. Поэтому математическая модель процесса включает в себя две подмодели: подмодель внутреннего теплообмена и подмодель внешнего теплообмена.

Подмодель внутреннего теплообмена реализована на основе конечно-разностного метода. В соответствии с этим методом весь объем кладки печи и слябов разбиваются на достаточно небольшие в сравнении с их размерами конечные объемы (КО). Температура каждого КО берется равной температуре его центра. Каждый КО представляет собой параллелепипед. Теплообмен между КО осуществляется через его грани. В зависимости от того где находится КО (на поверхности или внутри тела) одна часть его граней находится в контакте с другими КО и обменивается с ними теплом путем теплопроводности. Другая часть граней является граничными и обменивается теплом путем излучения (внешний теплообмен).

Подмодель внешнего теплообмена реализована следующим образом. Все внутренние и внешние поверхности кладки и слябов разделены на достаточно небольшие в сравнении с их размерами конечные поверхности (КП) соответствующие по форме и размерам, внешним граням КО, на которые разбито твердое тело. Температура каждой КП берется равной температуре КО гранью которого является данная поверхность. Теплообмен между КП осуществляется путем излучения тепловой энергии каждой КП и поглощение части ее другими поверхностями.

В процессе расчета в цикле вычисляется изменение состояния системы за небольшой интервал времени Δt .

Количество теплоты которое получает КО от соседних КО за счет теплопроводности за интервал времени Δt рассчитывается по формуле (3).

Полученное тепло расходуется на изменение температуры КО в соответствии с формулой (4).

Количество теплоты которое получит КП за интервал времени Δt от других КП рассчитывается по формуле (11). Количество теплоты которое излучит КП за интервал времени Δt рассчитывается по формуле (18). Количество излучаемой энергии «серыми» телом, согласно закону Кирхгофа, выражается:

$$E = a \cdot C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (18)$$

где a – степень черноты «серого» тела; C_s – константа излучения абсолютно черного тела, $C_s = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; T – температура «серого» тела, К.

При этом температура КО гранью которого является КП уменьшится на ΔT в соответствии с формулой:

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - E_i)}{V \cdot \rho \cdot c(t)}, \quad (19)$$

где Q_i – тепло получаемое КО через КП от других КП, Дж; E_i – энергия излученная i -ой излучающей гранью в соответствии с формулой (2.13), Дж; n – число излучающих граней.

Графически теплообмен между двумя телами представлен на рисунке 3.

Использование динамической модели процесса позволяет не только рассчитать изменение теплового состояния системы во времени, но также позволяет перемещать, добавлять и удалять тела участвующие в теплообмене.

Математическая модель была реализована на языке программирования высокого уровня C++. При создании модели использовался принцип объектно-ориентированного программирования (ООП).

Графический интерфейс программы, с помощью которого можно визуальнo следить за ходом процесса представлен на рисунке 4. С помощью него реальном времени можно увидеть распределение температур по сечению любого объекта участвующего в теплообмене. Так же все расчетные данные сохраняются в файл. Эти данные в дальнейшем используются для проведения исследования процесса теплообмена.

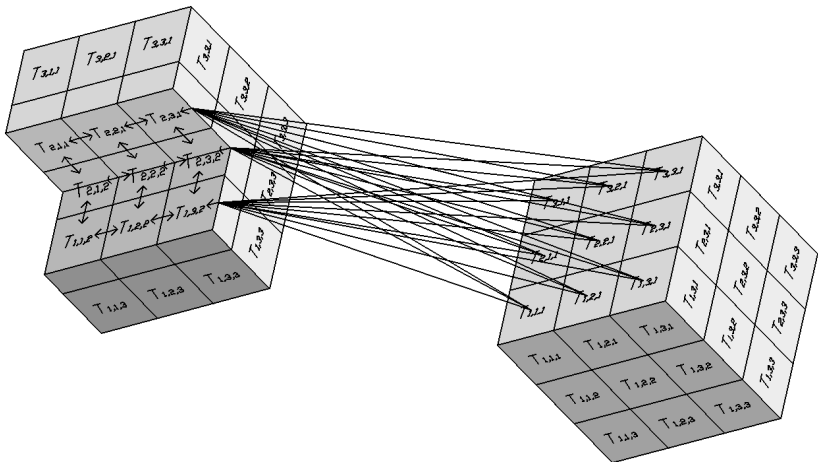


Рисунок 3 – Теплообмен между двумя телами

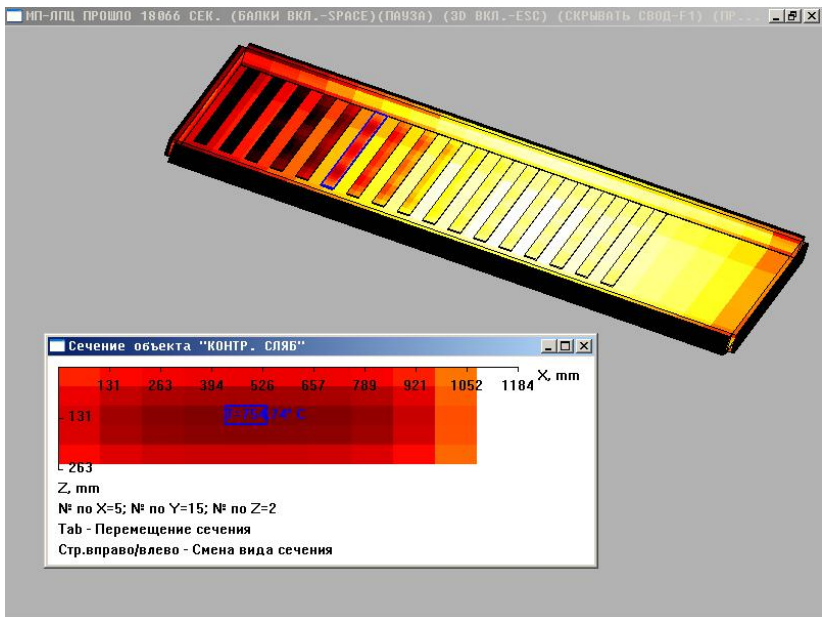


Рисунок 4 – Графический интерфейс программы

При создании модели приходилось искать компромисс между точностью и скоростью расчета модели. Точность расче-

та возрастет с увеличением число КО, но при этом увеличивает-ся продолжительность расчета. Помимо количества КО также важное значение имеет структура модели, количество слябов в рабочем пространстве и др.

В результате экспериментов была выбрана следующая структура модели. В печи находятся три сляба – один контрольный (данные о его состоянии сохраняются в файл) который разбит на большое число КО и два сляба с меньшим числом КО. Свод и под разбит на части в соответствии с зонами реальной методической печи стана «2000» ЛПЦ-10 ОАО «ММК». Каждая часть имеет собственную температуру и в свою очередь разбита на КП. Температура стен не фиксирована и изменяется в процессе работы программы.

По созданной модели был рассчитан процесс нагрева сляба при распределении тепловых нагрузок по зонам методической печи в соответствии с текущим распределением на ОАО «ММК». На данный момент при нагреве слябов из низкоуглеродистой стали Ст3 температура в зонах устанавливается в соответствии с таблицей 1.

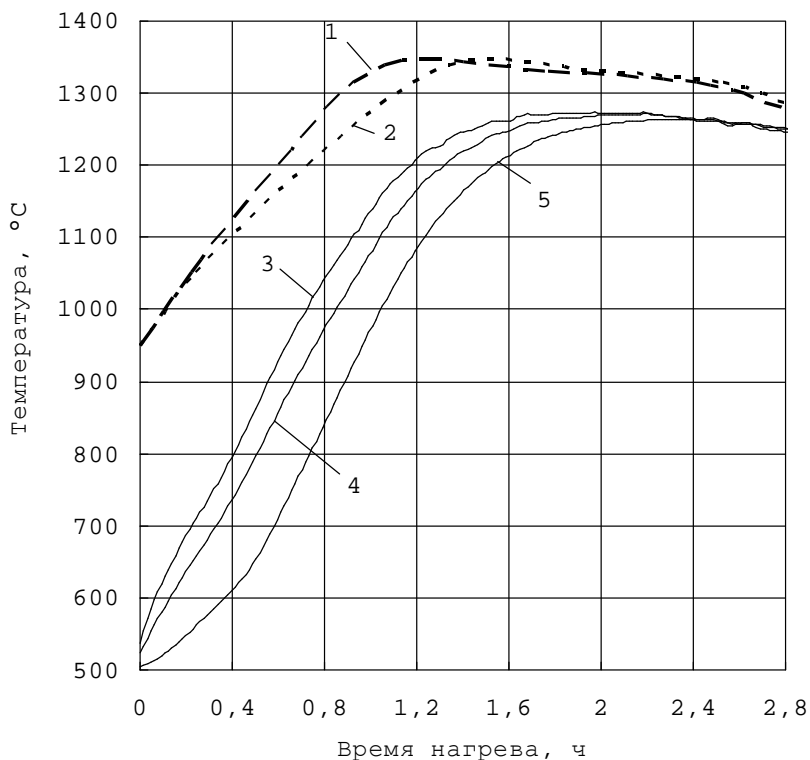
Таблица 1 – Текущее распределение температурных нагрузок по зонам

Номер зоны	Температура в зоне, °С
0	950
1	1200
2	1200
3	1340
4	1340
5	1330
6	1330
7	1300
8	1300
9	1250
10	1250

Кривые изменения температуры сляба при использовании данного режима нагрева приведены на рисунке 5.

Созданная модель получилась очень требовательной к ресурсам ЭВМ и расчёт даже одного режима занимает значительное время (несколько часов). Для того же чтобы найти оптимальное по какому либо критерию распределение тепловых

нагрузок по зонам по зонам методической печи методом перебора, необходимо рассчитать большое число режимов работы печи (несколько тысяч). Такой перебор с использованием данной модели на обычном компьютере может занять недопустимо много времени (несколько месяцев). Для ускорения процесса вычисления была использована нейросетевая модель процесса, полученная на основе данной модели.



1 – температура кладки в нижних зонах; 2 – температура кладки в верхних зонах; 3 – температура поверхности сляба; 4 – средне-массовая температура сляба; 5 – температура центра сляба

Рисунок 5 – График полученного по модели процесса нагрева

Нейросетевая модель процесса нагрева заготовки в методической печи стана «2000» ЛПЦ-10 ОАО «ММК»

Для того чтобы по нейросетевой модели можно было найти оптимальное распределение тепловых нагрузок по зонам печи, она должна иметь следующие входы:

- температура в нулевой зоне X_1 ;
- температура в первой и во второй зонах X_2 ;
- температура в третьей и четвертой зонах X_3 ;
- температура в пятой и шестой зонах X_4 ;
- температура в седьмой и восьмой зонах X_5 ;
- температура в девятой и десятой зонах X_6 .

На выходе нейросетевой модели снимаются следующие сигналы:

- среднemasсовая температура сляба в конце нагрева Y_1 ;
- температура поверхности сляба в конце нагрева Y_2 ;
- температура центра сляба в конце нагрева Y_3 ;

Для НС была выбрана многослойная структура, в которой каждый нейрон произвольного слоя связан со всеми аксонами нейронов предыдущего слоя. Такая НС называется полносвязной.

После обучения НС были протестирована на десяти различных вариантах распределения тепловых нагрузок, не использованных при обучении.

Получено, что наиболее оптимальной структурой НС для аппроксимации модели является НС имеющая восемь нейронов в одном скрытый слое. При такой структуре, отклонение между модельными расчетами и нейросетевыми в среднем составляет порядка 3 °С. НС достаточно точно воспроизводит работу модели, и может быть использована вместо нее для нахождения оптимального распределения тепловых нагрузок.

Расчет расхода газа в зависимости от температуры в зонах

Для нахождения оптимального распределения тепловых нагрузок по зонам методической печи необходимо знать расход газа подаваемого в каждую зону и температура в каждой зоне, которая установится при данном расходе газа. Так как в модели задается только температура кладки в зонах, то для нахождения оптимальных тепловых нагрузок по зонам печи для экономии топлива, необходимо сопоставить этим температурам расход газа, при которых в зонах установится заданная температура кладки.

Для этого была создана программа, которая методом теплового баланса и расчетом излучения газа для каждой зоны печи, находит расход газа, при котором в каждой зоне устанавливается заданная температура кладки.

При расчете учитываются следующие потери тепла [4]:

- расход тепла на нагрев металла;
- расход тепла вследствие потерь через кладку печи;
- расход тепла с дымовыми газами, покидающими зону;
- неучтенные потери.

При расчете учитываются следующие источники тепла:

- приход тепла от сжигания топлива (тепло химической реакции горения);
- приход тепла с подогретым воздухом, подаваемого для сжигания газа (физическое тепло воздуха);
- приход тепла с дымовыми газами из соседней зоны.

Количество теплоты, которое способны отдать дымовые газы кладке и металлу зависит от следующих факторов:

- Температура дымовых газов. Чем выше температура дымовых газов, тем больше тепла они могут отдать кладке и металлу за единицу времени.
- Температура кладки. Чем выше температура кладки, тем меньший процент тепла она получает от дымовых газов.
- Длина зоны. Чем длиннее зона, тем больше времени требуется дымовым газам чтобы ее покинуть и, следовательно, тем больше тепла они отдадут кладке и металлу.
- Температура металла. Чем выше температура металла, тем меньший процент тепла она получает от дымовых газов.
- Расположение зоны по высоте (верхняя, нижняя). В нижней зоне тепло дымовых газов расходуется не только на нагрев кладки и металла, но и значительное количество тепла расходуется на нагрев стационарных и шагающих балок. Следовательно, для нагрева кладки в нижней зоне до заданной температуры необходимо подать больший расход газа, чем в верхнюю, для нагрева ее до такой же температуры.

Рабочее пространство разбито на зоны в соответствии с зонами на реальной методической печи. Температура металла в каждой зоне берется равной средней температуре металла в этой зоне. Газ в каждой зоне считается равномерно нагретым и заполняющим весь объем зоны. Кладка имеет теплопроводность и теплоемкость шамотного кирпича при 1 000 °С. Толщина кладки соответствует толщине кладки на реальной методиче-

ской печи. Нижние и верхние зоны считаются изолированными друг от друга.

Расчет температуры в зонах производится, последовательно начиная с восьмой зоны и заканчивая нулевой.

Для каждой зоны в цикле осуществляется подбор такого расхода газа, чтобы в зоне установилась заданная температура кладки. Перебор начинается с расхода $0 \text{ м}^3/\text{с}$ и увеличивается на $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сначала рассчитывается количество теплоты $Q_{\text{поде}}$ поступающей в текущую зону за небольшой интервал времени Δt . $Q_{\text{поде}}$ складывается из тела полученного от сгорания теплота, тепла подогретого воздуха и тепла дымовых газов поступающих из соседней зоны. Это тепло расходуется на нагрев среды в зоне.

Далее по формуле (17) рассчитывается тепло $E_{\text{изл}}$ которое передается греющей средой кладке печи и металлу. Тепловые потери через кладку рассчитываются методом конечных разностей.

Также часть тепла $Q_{\text{ух}}$ уходит в соседнюю по ходу движения дымовых газов зону.

Расчет заканчивается когда в зоне устанавливается заданная температура кладки.

Расчетный и действительный расход газа на зоны методической печи приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетный и действительный расход газа по зоны методической печи

Номер зоны	Расчетный расход газа на зону, $\text{м}^3/\text{ч}$	Действительный расход газа на зону, $\text{м}^3/\text{ч}$
1	2520	2736
2	3240	3240
3	5400	4896
4	6480	6408
5	2520	3132
6	4320	4104
7	1080	1260
8	2520	2628
Всего	28080	28404

Оптимизация распределения тепловых нагрузок по зонам методической печи стана «2000» ЛПЦ-10 ОАО «ММК» для минимизации затрат топлива на нагрев

Ранее проведенные исследования показали, что распределение нагрузок по зонам методической печи стана «2000» ЛПЦ-10 ОАО «ММК» не является оптимальным, с точки зрения экономии топлива. Оптимальный энергосберегающий режим управления характеризуется интенсификацией нагрева на конечном интервале заданной общей продолжительности нахождения металла в печи. Реализация такого режима одновременно обуславливает предъявление значительно более сложных и интеллектуально повышенных требований к информационному обеспечению режима нагрева [5].

Цель энергосберегающего оптимального управления нагревом металла формулируется следующим образом. Необходимо выбрать такой температурный режим нагрева, при котором точно соблюдаются все принятые ограничения и безусловно гарантируется достижение заданного качества нагрева (средне-массовая температура и заданный температурный перепад по сечению заготовки) к концу назначенного времени при минимальных затратах топлива на нагрев.

Применение энергосберегающих режимов нагрева металла возможно только в случае, если нагревательные печи не являются узким местом в технологическом производственном процессе.

В производственных условиях при реализации энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла возникают проблемы, связанные с необходимостью учета различных конструктивных и технологических ограничений. Основными из них являются: ограничение на максимально допустимую температуру рабочего пространства печи; ограничение на максимально допустимую текущую температуру поверхности нагреваемой заготовки; ограничение на максимально допустимый текущий перепад температур по сечению заготовки [6].

При нагреве сляба из низкоуглеродистой марки стали толщиной 250 мм с начальной температуры 500°C до средне-массовой температуры 1250°C за заданное время 170 мин. эти ограничения принимают следующие значения: $t_{ГЦ}^{MAX}(\tau) = 1400^\circ\text{C}$, $t_{ПОВ}^{MAX}(\tau) = 1300^\circ\text{C}$ и $\Delta t^{MAX}(\tau) = 150^\circ\text{C}$. Последнее ограничение действует до достижения температурой центра заготовки 550-600°C.

Нахождение оптимального распределения тепловых нагрузок в методической печи стана «2000» ЛПЦ-10 ОАО «ММК»

При помощи нейросетевой модели было рассчитано 1000 случайных вариантов распределения тепловых нагрузок по зонам и при помощи программы по этим данным был рассчитан расход газа по зонам для каждого варианта.

По результатам оптимизации был самый оптимальный вариант распределения тепловых нагрузок при котором выполняются все ограничения и требования к качеству нагрева металла.

В таблице 3 приведено оптимальное распределение тепловых нагрузок по зонам печи и соответствующий им расход газа.

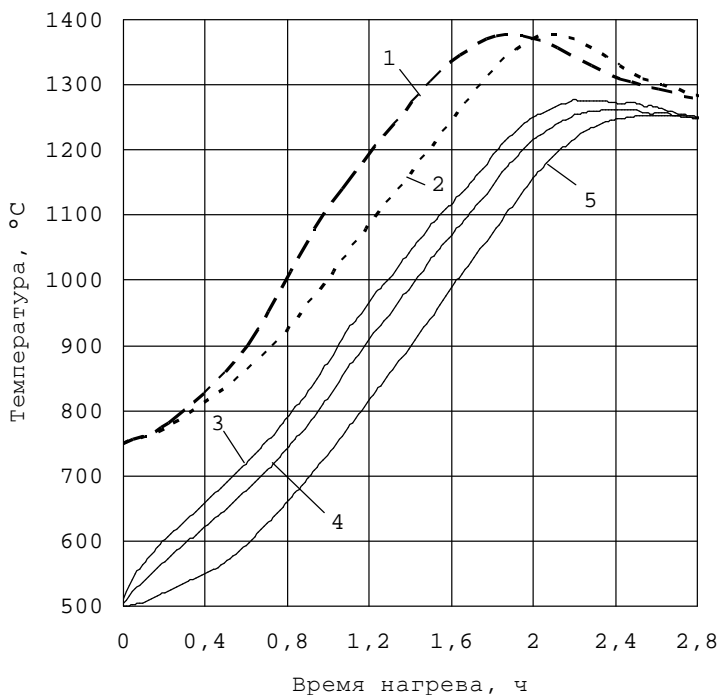
Таблица 3 – Оптимальное распределение тепловых нагрузок по зонам методической печи

Номер зоны	Расход газа на зону, м ³ /ч	Температура в зоне, °С
1	720	1000
2	1080	1000
3	1800	1100
4	2880	1100
5	3960	1370
6	6480	1370
7	2520	1330
8	5760	1330
Всего	25200	-

На рисунке 6 приведены кривые изменения температуры металла и кладки по длине печи приведенной ко времени для оптимального распределения тепловых нагрузок по зонам.

Относительная экономия топлива при использовании оптимального распределения тепловых нагрузок вместо текущего равна:

$$\delta = \frac{28404 - 25200}{28404} \cdot 100\% = 11,4\% .$$



1 – температура кладки в нижних зонах; 2 – температура кладки в верхних зонах; 3 – температура поверхности сляба; 4 – среднемассовая температура сляба; 5 – температура центра сляба

Рисунок 6 – Изменение температуры металла и кладки во времени для оптимального распределения тепловых нагрузок по зонам

Учитывая погрешность модели, экономия топлива при использовании полученного режима нагрева составит порядка 5%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Булгак Л. И. и др. Автоматизация методических печей.- М.:Металлургия, 1997.
- 2 Ревун М. П., Соколов А.К. Моделирование нагрева металла при автоматизированном проектировании и управлении –

Запорожье, 2000.

- 3 Литвин А. М. Теоретические основы теплотехники – М.: Государственное энергетическое издательство, 1999.
- 4 Филимонов Ю. П. Топливо и печи: Учебник для вузов – М.: Металлургия, 2002.
- 5 Парсункин Б. Н., Андреев С.М. Прогнозирование продолжительности нагрева непрерывно литой заготовки в методической печи с шагающими балками - Магнитогорск МГТУ, 2000.
- 6 Парсункин Б. Н., Бушманова М.В., Андреев С.М. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии – Магнитогорск МГТУ, 2003.

УДК 681.511

**Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова,
Т.Г. Обухова**

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОМЫМ РЕЖИМОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ

В последние десятилетия в связи с существенным развитием программируемых вычислительных устройств в задачах автоматического управления с успехом применяются системы, основанные на принципах теорий нечетких множеств и нечетких логических выводов.

В отличие от традиционных способов автоматического управления, использующих, как правило, упрощенную математическую количественную модель управляемого процесса, системы с нечеткой логикой применяют качественную лингвистическую логическую модель. Нечеткие правила задаются в форме «Если..., тогда...», при этом оператор-технолог легко понимает действия регулятора и может их корректировать с помощью введения новых правил. Так как правила нечеткого управления являются логическими, то легко представить логику управления эксперта и разнообразным предпосылкам поставить в соответствие некоторое действие. При этом, если имеется несколько управляемых величин, то для каждой можно создать свои правила [1].

В данной работе предлагается реализация системы управления тепловым режимом промышленной печи, основанной на использовании принципов нечеткой логики и нечетких множеств.

Структурная схема замкнутой системы нечеткого регулирования представлена на рис. 1.

На вход замкнутой системы нечеткого регулирования поступает сигнал задания $Z_{зад}$, который сравнивается в элементе сравнения с текущим выходным сигналом регулируемой величины (температуры). Полученный сигнал рассогласования ε поступает одновременно на вход дифференцирующего звена и, после масштабирования в блоке K1 (сигнал X_1), на вход нечеткого регулятора.

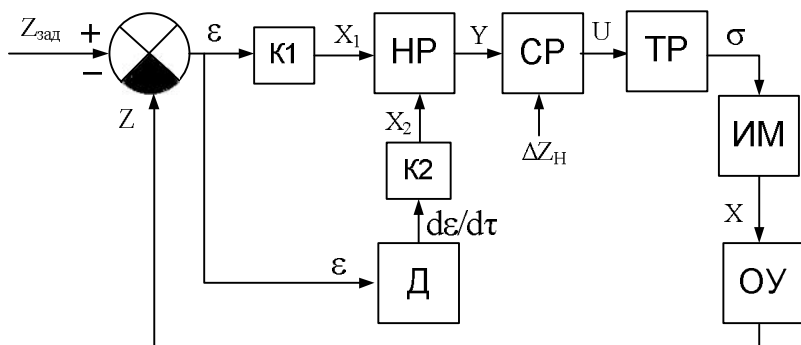


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы нечеткого регулирования

После дифференцирующего звена величина текущей скорости изменения сигнала рассогласования $\frac{d\varepsilon}{d\tau}$ также масштабируется в блоке K2, и полученный сигнал X_2 поступает на вход нечеткого регулятора.

Коэффициенты K1 и K2 необходимы для масштабирования осей на предметной области входных сигналов нечеткого регулятора.

Таким образом, на вход нечеткого регулятора поступает два сигнала – нормированный текущий сигнал рассогласования и нормированная текущая скорость изменения сигнала рассогласования.

гласования. На выходе нечеткого регулятора формируется нормированный управляющий сигнал Y , который поступает на вход сигнум-реле (СР), где сравнивается с величиной зоны нечувствительности СР ΔZ_H . На выходе СР формируется управляющий импульс U , определяющий закономерность формирования текущего значения переключающей функции σ в соответствии с условием:

$$U = \begin{cases} +1, \text{ при } Y \geq \frac{\Delta Z_H}{2}, \\ 0, \text{ при } \frac{\Delta Z_H}{2} < Y < -\frac{\Delta Z_H}{2}, \\ -1, \text{ при } Y \leq -\frac{\Delta Z_H}{2}. \end{cases}$$

Управляющий импульс U поступает на вход триггер реверса ТР, который формирует сигнал переключающей функции, определяющей текущее направление изменения входного параметра $X(t)$ в соответствии с условием:

– при $U = +1$ $\sigma_{\tau_{i+1}} = \sigma_{\tau_i}$ – сохранить выбранное направление изменения $X(t)$;

– при $U = 0$ $\sigma_{\tau_{i+1}} = 0$ – остановить ИМ;

– при $U = -1$ $\sigma_{\tau_{i+1}} = -\sigma_{\tau_i}$ – выбранное направление изменения $X(t)$ изменить на противоположное (произвести реверс ИМ).

Для управления объектом используется исполнительный механизм постоянной скорости.

В рассматриваемой системе нечеткий регулятор вырабатывает управляющий сигнал X в соответствии с принципом нечеткой логики.

Входные сигналы нечеткого регулятора обозначим как X_1 и X_2 , а нормированный выходной сигнал как Y .

Введем лингвистические переменные:

X_1 – «Рассогласование»; X_2 – «Скорость рассогласования»; Y – «Нормированный управляющий сигнал».

Нечеткое множество задается на непрерывной области определения (предметной области) переменной с помощью функций принадлежности, которые характеризуют степень принадлежности значения переменной этому множеству.

В области определения текущего нормированного сигнала рассогласования X_1 введем пять нечетких множеств, определяющих значения лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности:

[$A_1^{x_1}$ = «Положительное_большое»; $A_2^{x_1}$ = Положительное_малое»; $A_3^{x_1}$ = «Нулевое»; $A_4^{x_1}$ = «Отрицательное_малое»; $A_5^{x_1}$ = «Отрицательное_большое»].

Аналогично определим функции принадлежности для значений лингвистической переменной X_2 :

[$A_1^{x_2}$ = «Положительное_большое»; $A_2^{x_2}$ = Положительное_малое»; $A_3^{x_2}$ = «Нулевое»; $A_4^{x_2}$ = «Отрицательное_малое»; $A_5^{x_2}$ = «Отрицательное_большое»].

Нормированные значения функций принадлежности четких переменных X_1 и X_2 нечетким множествам A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 представлены в таблице 1.

Графически функции принадлежности нечетких множеств $\mu(x)$, а также значения их параметров $A_1^{x_1}, A_2^{x_1}, A_3^{x_1}, A_4^{x_1}, A_5^{x_1}, A_1^{x_2}, A_2^{x_2}, A_3^{x_2}, A_4^{x_2}, A_5^{x_2}$ представлены на рис.2 (а, б).

Таблица 1 – Значения функций принадлежности $\mu(x)$

X	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
-1	0	0	0	0,3	1
-0,75	0	0	0	0,7	0,7
-0,5	0	0	0,3	1	0,3
-0,25	0	0	0,7	0,7	0
0	0	0,3	1	0,3	0
0,25	0	0,7	0,7	0	0
0,5	0,3	1	0,3	0	0
0,75	0,7	0,7	0	0	0
1	1	0,3	0	0	0

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности:

[$B_1 =$ «Положительное большое»; $B_2 =$ «Положительное малое»; $B_3 =$ «Нулевое»; $B_4 =$ «Отрицательное малое»; $B_5 =$ «Отрицательное большое»] и представлены в виде функции:

$$\mu^Y(x) = \delta(x - b) = \begin{cases} 1, & \text{àñëè } x = b \\ 0, & \text{àñëè } x \neq b \end{cases}$$

где значения параметра b для каждого значения выходной лингвистической переменной представлены в виде вектора $b = [1, 0.5, 0, -0.5, -1]^T$.

Для организации режима и получения правил нечеткого управления используется основное эвристическое правило: «Если наблюдается рассогласование между текущим и заданным значениями выходной величины, тогда необходимо дать управляющий сигнал на изменение управляющего параметра в сторону подавления текущего значения рассогласования».

Функционирование предлагаемого нечеткого регулятора определится следующей базой правил:

$$R_1 : \left(X_1 = A_5^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_3^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_5;$$

$$R_2 : \left(X_1 = A_1^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_3^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_1;$$

$$R_3 : \left(X_1 = A_4^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_3^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_4;$$

$$R_4 : \left(X_1 = A_2^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_3^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_2;$$

$$R_5 : \left(X_1 = A_4^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_4^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_3;$$

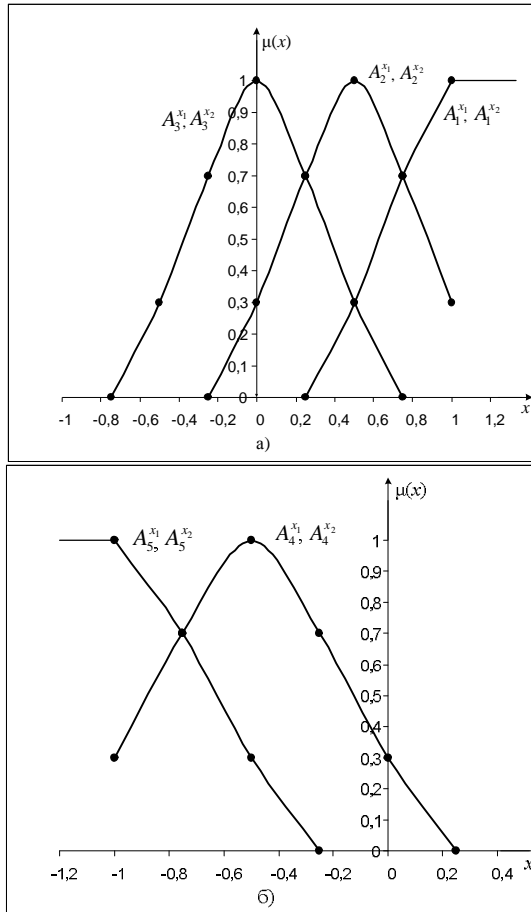


Рис. 2. Функции принадлежности $\mu(x)$ нечетких множеств для входных переменных X_1 и X_2

$$R_6 : \left(X_1 = A_2^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_2^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_3;$$

$$R_7 : \left(X_1 = A_4^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_2^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_5;$$

$$R_8 : \left(X_1 = A_2^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_4^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_1;$$

$$R_9 : \left(X_1 = A_3^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_4^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_2;$$

$$R_{10} : \left(X_1 = A_3^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_2^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_4.$$

$$R_{11} : \left(X_1 = A_2^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_3^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_2.$$

$$R_{12} : \left(X_1 = A_4^{x_1} \right) \cap \left(X_2 = A_3^{x_2} \right) \rightarrow Y = B_4.$$

Так, например, эвристическое правило R_1 можно сформулировать следующим образом: «Если скорость изменения рассогласования близка к нулю ($A_3^{x_2}$ = «Нулевое») и есть большое отрицательное рассогласование между заданным значением и текущим значением регулируемой величины ($A_5^{x_1}$ = «Отрицательное большое»), то на выходе регулятора должен быть сигнал, пропорциональный максимальному перемещению исполнительного механизма в сторону, необходимую для уменьшения значения регулируемой величины (B_5 = «Отрицательное большое»)). Такая ситуация возможна, например, в случае изменения сигнала задания, когда в системе имел место установившийся переходный процесс.

При нечетком управлении данная база правил представляет некоторую лингвистическую модель процесса управления, являясь как бы качественной моделью, отражающей логику работы высококвалифицированного эксперта.

Работа предлагаемого нечеткого регулятора проверялась на модели промышленной печи, представляющей собой последовательное соединение статической характеристики и двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени

$T_1=100$ с и $T_2=10$ с. Коэффициент передачи объекта управления равен $5,6$ °C/% хода ИМ. Скорость исполнительного механизма составляет $0,2$ %/с. Зону нечувствительности сигнум-реле прием равной $\Delta Z_H = 0.1$.

Уравнение статической характеристики объекта управления имеет вид:

$$F(x) = 0.027x^2 + 4.02x + 356.7,$$

где x – управляющий сигнал, формируемый нечетким регулятором.

Так как значения лингвистических переменных X_1 и X_2 должны принадлежать диапазону $[-1,1]$, то вначале необходимо нормировать входные сигналы нечеткого регулятора.

Нормирующий коэффициент K_{x_1} для сигнала рассогласования определим по формуле:

$$K_{x_1} = \frac{F(x)_{\text{ëî}} - F(x)_{\text{îä}}}{4} = \frac{1028.7 - 356.7}{4} = 168, ,$$

где $F(x)_{\text{кон}}$ и $F(x)_{\text{нач}}$ – конечное и начальное значения регулируемой величины по статической характеристике.

Аналогично определим нормирующий коэффициент K_{x_2} для сигнала скорости изменения рассогласования:

$$K_{x_2} = \frac{F(x)_{\text{ëî}} - F(x)_{\text{îä}}}{T_o \cdot 4} = \frac{1028.7 - 356.7}{100 \cdot 4} = 1.68, \text{ где}$$

T_o – постоянная времени объекта управления.

Для определения нормированного значения входного сигнала регулятора, необходимо соответствующее текущее значение сигнала поделить на нормирующий коэффициент.

Пусть текущее значение температуры составляет 600°C , и на вход системы регулирования поступает сигнал задания $Z_{\text{çäî}} Z_{\text{çäð}} = 700^\circ\text{C}$. Нормированное значение рассогласования составит $0,6$ условных единиц, а сигнал скорости изменения рассогласования будет нулевым, так как рассматриваем начальный этап процесса регулирования.

Для получения конкретного числового значения управляющего сигнала регулятора используем упрощенный алгоритм нечеткого вывода [2].

1. Используя графики, приведенные на рис. 2, определим значения функций принадлежности каждого входного нормированного сигнала для значений $X_1 = 0.6$ и $X_2 = 0$:

$$\begin{array}{ll} A_1^{x_1} = 0.47; & A_1^{x_2} = 0; \\ A_2^{x_1} = 0.93; & A_2^{x_2} = 0.3; \\ A_3^{x_1} = 0.18; & A_3^{x_2} = 1; \\ A_4^{x_1} = 0; & A_4^{x_2} = 0.3; \\ A_5^{x_1} = 0; & A_5^{x_2} = 0. \end{array}$$

2. Найдем уровни «отсечений» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции МИНИМУМ).

Для этого необходимо в каждой правило подставить соответствующие значения функций принадлежности входных сигналов, рассчитанные ранее (см. выше), а затем определить минимальное из этих значений.

$$\begin{array}{ll} \mu_1^P = A_5^{x_1} \wedge A_3^{x_2}; & \mu_1^P = \min(0;1) = 0; \\ \mu_2^P = A_1^{x_1} \wedge A_3^{x_2}; & \mu_2^P = \min(0.47;1) = 0.47; \\ \mu_3^P = A_4^{x_1} \wedge A_3^{x_2}; & \mu_3^P = \min(0;1) = 0; \\ \mu_4^P = A_2^{x_1} \wedge A_3^{x_2}; & \mu_4^P = \min(0.93;1) = 0.93; \\ \mu_5^P = A_4^{x_1} \wedge A_4^{x_2}; & \mu_5^P = \min(0;0.3) = 0; \\ \mu_6^P = A_2^{x_1} \wedge A_2^{x_2}; & \mu_6^P = \min(0.93;0.3) = 0.3; \end{array}$$

$$\mu_7^P = A_4^{x_1} \wedge A_2^{x_2}; \quad \mu_7^P = \min(0; 0.3) = 0;$$

$$\mu_8^P = A_2^{x_1} \wedge A_4^{x_2}; \quad \mu_8^P = \min(0.93; 0.3) = 0.3;$$

$$\mu_9^P = A_3^{x_1} \wedge A_4^{x_2}; \quad \mu_9^P = \min(0.18; 0.3) = 0.18;$$

$$\mu_{10}^P = A_3^{x_1} \wedge A_2^{x_2}; \quad \mu_{10}^P = \min(0.18; 0.3) = 0.18;$$

$$\mu_{11}^P = A_2^{x_1} \wedge A_3^{x_2}; \quad \mu_{11}^P = \min(0.93; 1) = 0.93;$$

$$\mu_{12}^P = A_4^{x_1} \wedge A_3^{x_2}; \quad \mu_{12}^P = \min(0; 1) = 0.$$

3. Далее найдем четкое значение выходной переменной (нормированного управляющего воздействия) по формуле:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{12} \mu_i^R}{\sum_{i=1}^{12} \mu_i^P} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (\mu_i^P \cap \mu_i^Y)}{\sum_{i=1}^{12} \mu_i^P}$$

$$Y_{\text{ннн}} = \frac{0 \cdot (-1) + 0.47 \cdot 1 + 0 \cdot (-0.5) + 0.93 \cdot 0.5 + 0 \cdot 0 + 0.3 \cdot 0 + 0 \cdot (-1)}{0 + 0.47 + 0 + 0.93 + 0 + 0.3 + 0 + 0.3 + 0.18 + 0.18 + 0.93 + 0} +$$

$$+ \frac{0.3 \cdot 1 + 0.18 \cdot 0.5 + 0.18 \cdot (-0.5) + 0.93 \cdot 0.5 + 0 \cdot (-0.5)}{0 + 0.47 + 0 + 0.93 + 0 + 0.3 + 0 + 0.3 + 0.18 + 0.18 + 0.93 + 0} = 0.54.$$

Так как нормированное значение управляющего воздействия больше зоны нечувствительности сигнум-реле, то управляющий импульс $U = +1$, переключающая функция $\sigma_{\tau_i+1} = \sigma_{\tau_i} = +1$, следовательно, числовое значение управляющего воздействия можно рассчитать по формуле:

$$Y_i = Y_{i-1} + \sigma \cdot K_{\text{и}} \cdot Y_{\text{норм}} = Y_{i-1} + K_{\text{и}} \cdot Y_{\text{норм}},$$

где $K_{\text{и}}$ – скорость исполнительного механизма.

В нашем случае начальное положение вала исполнительного механизма было равно 46 %, скорость исполнительного

механизма равна $0,2 \text{ \%}/\text{с}$. Тогда в первый момент времени расчетное значение угла поворота вала исполнительного механизма будет равно:

$$Y_1 = 46 + 0,2 \cdot 0,52 = 46,104 \text{ \%}.$$

Аналогично рассчитываются все остальные значения управляющего воздействия в зависимости от величины рассогласования и скорости изменения рассогласования.

Переходный процесс, полученный путем моделирования системы управления тепловым режимом промышленной печи с использованием принципов нечеткой логики, представлен на рис.3.

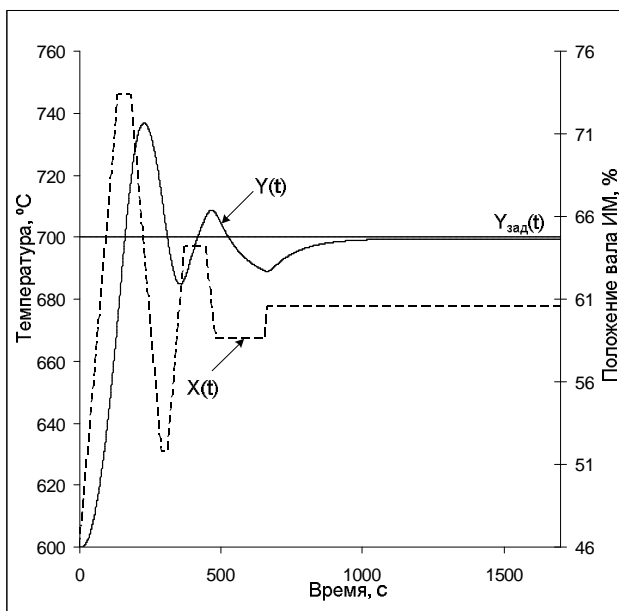


Рис. 3. Переходный процесс в системе регулирования с использованием принципов нечеткой логики: $Y(t)$ – выходной регулируемый сигнал; $X(t)$ – управляющее воздействие

Как видно из рис.3, разработанный нечеткий регулятора позволяет быстро и без большого перерегулирования выводить регулируемую величину на заданное значение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батыршин И.З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения. – Казань: Отечество, – 2001. – с. 102
2. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: «Физматлит», – 2001. – 224 с.

УДК 621.365.2:669.187

У.Б. Ахметов, Т.У. Ахметов

НПЦ «УРАЛ», ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова»

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электродуговые технологические агрегаты выплавки и внепечной доводки стали в настоящее время являются перспективными и экологически безопасными. Рациональное или технологически обоснованное энергосберегающее управление потребляемой этими агрегатами дорогостоящей электрической энергии представляет актуальную проблему [1].

Наиболее эффективным методом управления используемой этими агрегатами электрической энергии является использование систем автоматической оптимизации управления (САОУ) энергетическим режимом. САОУ за счет реализации поискового динамического режима способна обеспечивать достижение максимальной возможной производительности электродуговых агрегатов металлургического производства за счет оптимального управления потребляемой электрической энергии. Наибольшее распространение в отечественной металлургии нашли дуговые агрегаты переменного тока. Наличие инерционности и запаздывания при одновременном воздействии высокочастотных помех и технологических возмущений усложняет условия функционирования САОУ в реальных условиях. Это обстоятельство оказывает определяющее влияние на выбор поискового метода, реализуемого в САОУ.

Для электродуговых технологических агрегатов характерно наличие неконтролируемых возмущений, возникающих вследствие значительной нестационарности условий горения

электрических дуг и взаимовлияющих электрических параметров в трехфазной сети.

Наиболее приемлемым методом динамической оптимизации управления энергетическим режимом в этих условиях является метод интегральной оценки отклика оптимизируемого процесса на пробное поисковое тестирующее входное воздействие определенной формы.

Математическая модель динамической оптимизации управления энергетическим режимом электродуговых технологических агрегатов при использовании метода интегральной оценки и разделением во времени поискового и рабочего управляющих воздействий определяется следующей системой уравнений и логических условий

$$\bar{P}_D[I(\tau), \tau] = \{a_0 + a_1[I(\tau) \pm \alpha\tau] + a_2[I(\tau) \pm \alpha\tau]^2 + \dots \dots + a_n[I(\tau) \pm \alpha\tau]^n\} \pm \beta\tau \quad (1)$$

$$T_0 \frac{dP_1(\tau)}{d\tau} + P_1(\tau) = \bar{P}_D(\tau) \quad (2)$$

$$\tau_3 \frac{dP_1(\tau)}{d\tau} + P_D(\tau) = P_1(\tau) \quad (3)$$

$$J_H = \int_{\tau_3}^{\tau_3 + T_H} P_D(\tau) \cdot \Psi_H(\tau) \cdot d\tau, \text{ при } \tau_3 \leq \tau \leq T_H + \tau_3 \quad (4)$$

$$\Psi_H(\tau) = \prod_{k=1}^{n+1} \text{SignSin} \frac{2^k \pi \cdot \tau}{T_H} \quad (5)$$

$$J_H = K_H \cdot \Delta I(\tau), \text{ при } \Delta I(\tau) = I_{\text{ном}}(\tau) - I_H \quad (6)$$

$$I^T(\tau) = I_H(\tau = 0) + A \cdot \Psi_H(\tau), \text{ при } 0 \leq \tau \leq T_H \quad (7)$$

$$\Delta\tau_p = \frac{J_H}{\sigma(\tau) \cdot K_H \cdot K_{\text{ум}}}, \text{ при } T_H + \Delta\tau_H \leq \tau \leq \Delta\tau_H + \Delta\tau_p T_H \quad (8)$$

$$+1 \text{ если } 0 < J_H \leq (\Delta J_H)H$$

$$\sigma(\tau) = 0 \text{ если } |J_H| \leq (\Delta J_H)H, \text{ при } T_H < \tau \leq T_H + \Delta\tau_H \quad (9)$$

$$-1 \text{ если } 0 > J_H - (\Delta J_H)H$$

При $T_H = 2^{n+1} \Delta\tau$; $\Delta\tau = 1 \div 2(T_p + \tau_3)$;

$$\Delta\tau_{II} = 1,5 \div 2(T_0 + \tau_3); \quad \Delta\tau_{\beta}^3 = 2 \div 10T_{II}; \quad (10)$$

$$T_u = T_{II} + 2\Delta\tau_{II} + \tau_p + \Delta\tau_{\beta}^3;$$

Здесь τ - текущее время; $P_{д}^{-}[I(\tau), \tau]$ - установившееся значение мощности выделяемой в электрической дуге для постоянных значений $I(\tau)$ и τ ; $P_{д}(\tau)$ - расчетное текущее значение электрической мощности, выделяемой в дуге при текущем значении фазного напряжения $U_{\phi}(\tau)$.

$$P_{д}(\tau) = P_A(\tau) - P_{ЭП}(\tau) = I(\tau) \cdot \sqrt{U_{\phi}^2(\tau) - (I(\tau) \cdot x)^2} - I^2(\tau) \cdot r$$

где $P_A(\tau)$ - контролируемое текущее значение активной электрической мощности, потребляемой электродуговым технологическим агрегатом;

$P_{ЭП}(\tau) = I^2(\tau) \cdot r$ - текущее значение мощности электрических потерь в подводящей цепи электродугового агрегата; x , r - соответственно активное и реактивное (индуктивное) сопротивление подводящей короткой цепи;

Здесь $I(\tau)$ - текущая величина тока дуги фазы; $I^T(\tau)$ - поисковое тестирующее изменение тока дуги при перемещении электрода данной фазы; A - амплитуда тестирующего воздействия; $\Delta I(\tau)$ - необходимое рабочее изменение тока дуги для достижения оптимального значения тока $I_{opt}(\tau)$, при котором достигается максимальная величина мощности выделяемой в дуге $P_{д \max}(\tau)$, обеспечивающей достижение максимальной производительности электродугового технологического агрегата; J_{II} - величина интегральной оценки отклика оптимизируемого энергетического режима на входное тестирующее возмущающее воздействие при перемещении электрода при реализации $I^T(\tau)$; K_{II} - коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально или расчетными способами, характеризующий величину интегральной оценки J_{II} , приходящуюся на единицу изменения тока дуги $I(\tau)$;

T_{II} - продолжительность тестирующего воздействия;

$\Delta\tau$ - продолжительность интервала времени, характеризующего реакцию оптимизируемого процесса на изменение тестирующего воздействия; $\Psi_{II}(\tau) \in (+1, -1)$ - ортогональная функция Уолша, определяющая вид и траекторию (изменения во времени) тестирующего воздействия; $\Delta\tau_{II}$ - продолжительность паузы, необходимой для завершения переходного процесса в объекте оптимизации после тестирующего и рабочего управляющих воздействий; $\Delta\tau_p$ - продолжительность рабочего управляющего воздействия для достижения $I_{opt}(\tau)$, обеспечивающего достижение $P_D \max(\tau)$; $K_{им}$ - принятая скорость перемещения электрода каждой фазы; $\sigma(\tau)$ - направление перемещения электрода в процессе реализации рабочего управляющего перемещения электрода;

$\pm\alpha, \pm\beta$ - соответственно величины и направление скоростей горизонтального и вертикального смещения (дрейфа) рабочей

статической характеристики $\bar{P}_D[I(\tau), \tau]$ оптимизируемого энергетического режима за время тестирующего входного воздействия; n - степень аппроксимирующего полинома, которым можно отразить траекторию смещения статической характеристики

$\bar{P}_D[I(\tau), \tau]$ во времени; $\Delta\tau_B^3$ - продолжительность заданного интервала времени между двумя последующими циклами поисковых воздействий; $T_{ц}$ - общая продолжительность поискового цикла работы САОУ;

В работах [2], [3] убедительно и обоснованно доказано, что максимальная производительность электродугового технологического агрегата металлургического производства достигается при условии максимального выделения электрической мощности в дуге каждой фазы.

Следует особо отметить, что для реальных условий функционирования рассматриваемого метода динамической оптимизации управления энергетическим режимом электродуговых технологических агрегатов наличие информации о текущем положении и виде рабочей статической характеристики

$\bar{P}_D[I(\tau), \tau]$ не требуется.

В этом и заключается повышенная интеллектуальность методов поисковой динамической оптимизации управления.

Информация $\bar{P}_d[I(\tau), \tau] = f[I(\tau), \tau]$ необходима только для теоретического исследования при математическом моделировании поискового режима работы САОУ и обоснования принципиальной реальной работоспособности и эффективности функционирования САОУ энергетическим режимом с целью обеспечения максимальной производительности электродуговых технологических агрегатов.

В производственных условиях для функционирования рассматриваемого поискового метода требуется только измерение текущих (мгновенных) величин тока и напряжения в каждой фазе. Затем в соответствии с использованием выражений (11), (12), (13) вычисляются соответственно действующие значения фазного тока, напряжения и активной мощности P_A потребляемой фазой

$$U = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} U^2(\tau) \cdot d\tau} \quad (11)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} i^2(\tau) \cdot d\tau} \quad (12)$$

$$P_A = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} i(\tau) \cdot U(\tau) d\tau \quad (13)$$

где U , I - действующее значение соответственно фазного напряжения и тока;

$U(\tau)$, $i(\tau)$ - соответственно мгновенное значение фазного напряжения и тока;

P_A - активная мощность потребляемая фазой; T_c - период переменного тока и напряжения промышленной сети питания, $T_c = 0,02$ с; частота опроса датчиков $4 \cdot 10^{-4}$ с.

С использованием рассмотренной математической модели для проверки работоспособности предлагаемой САОУ энергетическим режимом электродуговых технологических агрегатов бы-

ло создано программное обеспечение. После дополнения созданной рабочей программы стандартными процедурами обмена информацией между объектом управления и управляющим микропроцессором контроллером разработанная программа была использована при математическом и физическом моделировании работы поисковой динамической системы оптимизации энергетического режима с целью достижения максимальной производительности электродугового технологического агрегата.

Программа реализует операции: зажигание дуги, ликвидацию технологических коротких замыканий и обрывов дуги, и обрабатывает режим переключений ступеней напряжения.

При математическом моделировании функционирования САОУ энергетическим режимом ДСП – 180 ЭСПЦ ОАО «ММК» были использованы следующие исходные данные:

продолжительность тестирующего воздействия $T_{II} = 4$ с; амплитуда тестирующего воздействия $A = 5,5$ кА; постоянная времени $T_0 = 0,05$ с; время запаздывания $\tau_z = 0,02$ с;

реактивное сопротивление короткой цепи $x = 0,005$ Ом; скорость перемещения электрода 80мм/с при скорости изменения тока 17,8 кА/с;

Начальным состоянием процесса считается режим технологического короткого замыкания при $U_d = 1291$ В или $U_\phi = 746,2$ В

Расчетные рабочие фазные статические характеристики

$P_d = f[I(\tau), \tau]$ при переключении ступеней напряжения печного трансформатора во всем возможном диапазоне изменения напряжения от 800 до 1400 В представлены на Рис. 1

При переключении ступеней напряжения изменение величины максимальных (экстремальных) значений мощности выделяемой в дуге $P_d \max[I_{om}(\tau)]$ и оптимальных значений величины тока $I_{om}(U)$ и $P_d \max(U)$ можно отразить статическими уравнениями:

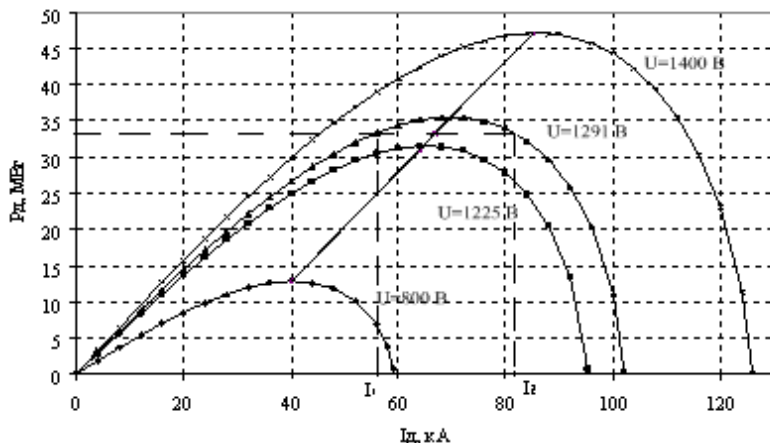


Рис.1 Расчетные зависимости мощности выделяемой в дуге $P_d(\tau)$ от величины рабочего тока дуги $I(\tau)$ для всех возможных ступеней напряжения для ДСП-180 ЭСПЦ ОАО «ММК»

$$P_d \max[I_{onm}(\tau)] = 0,76051 \cdot I_{onm}(\tau) - 17,602, \quad \text{при} \\ 0 \leq I \leq 125 \text{ кА}$$

$$P_d \max(U) = 0,0531 \cdot U_n(\tau) - 30,837, \quad \text{при } 800 \text{ В} \leq U \leq 1400 \text{ В}$$

$$I_{onm}(U) = 0,0674 \cdot U_n(\tau) - 15,48, \quad \text{при } 800 \text{ В} \leq U \leq 1400 \text{ В}$$

Это означает, что зависимости практически линейны (см. Рис.1) и при определении интегральной оценки J_{II} в (4) на интервале времени $\tau_3 \leq \tau \leq \tau_3 + T_{II}$ в качестве функции $\Psi_{II}(\tau)$ использовать функцию вида $\Psi_1(\tau)$, которая содержит четыре отрезка времени $\Delta\tau$.

Траектория используемой функции Уолша $\Psi_1(\tau)$ при формировании тестирующего входного воздействия $I^T(\tau)$ в (6) представлена на Рис.2

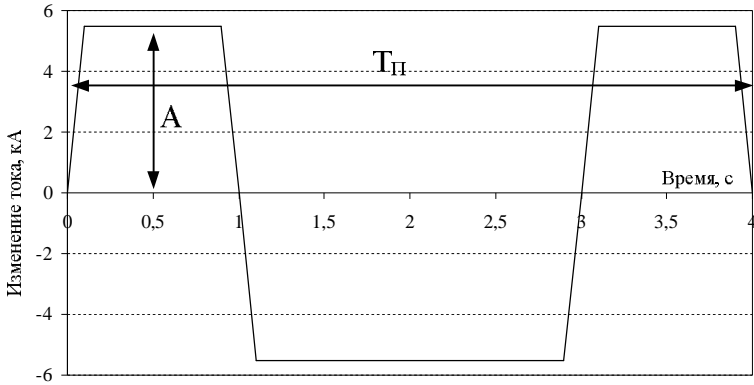


Рис.2 Вид тестирующей функции Уолша для $n=1$ при $K_{им}=17,8$ кА/с (80 мм/с), $T_{П}=4$ с; $A=5,34$ кА

Трапецевидный вид изменения поисковой траектории $I^T(\tau)$ определяется конечной скоростью перемещения электрода $K_{им}$.

Для достоверного определения продолжительности рабочего управляющего воздействия (времени перемещения электрода) -

$\Delta\tau_p$ необходимо определить величину $K_{П}$.

При отклонении вида рабочей характеристики $P_D = [I(\tau), \tau]$ от параболического, величина $K_{П}$ непостоянна и зависит от отклонения текущего начального значения $I_H(\tau=0)$ от оптимального текущего значения фазного напряжения $U_\phi = U_\lambda / \sqrt{3}$.

Поэтому величина $K_{П}(\tau) = Y[I_{онм}(\tau) - I_u(\tau)]$ для обеих ветвей несимметричной относительно $I_{онм}(\tau)$ статической характеристики может быть определена расчетным способом по методике изложенной в работе [4] при проведении вычислительного эксперимента.

Поскольку зависимость мощности, выделяемой в электрической дуге от величины рабочего тока дуги $\bar{P}_D = [I(\tau), \tau]$

для выбранной ступени напряжения имеет экстремальный вид (см. Рис.1 при $U_{д} = 1291В$), а процедура зажигания дуги начинается всегда с ликвидации технологического короткого замыкания (при касании электрода металлошихты или расплава) $I_{кз}$ следует учитывать следующее обстоятельство.

Требуемая заданная (см. Рис.1) мощность дуги $P_{д}^3(\tau)$, определяемая при поддержании стабилизируемого параметра, может быть обеспечена при двух различных величинах токов дуги I_1 и I_2 , причем $I_1 < I_2$

В целях энергосбережения целесообразно поисковый режим оптимизации начинать с величины тока I_1 , хотя при этом возможно нестабильное горение дуги при большей величины коэффициента полезного использования электрической мощности ($\cos\psi$) и меньшим расходе электродов. Режим работы электродугового технологического агрегата на более коротких дугах при большей величине тока I_2 и меньшей величине заданного значения импеданса $Z_3 = U_{\phi} / I(\tau)$ является более затратным, т.к. характеризуется повышенным значением электрических потерь, большей величиной удельного количества электричества, повышенным расходом электродов, однако при этом обеспечивается более стабильное горение дуги, особенно в начальный период технологического процесса.

В существующих реальных условиях, когда оптимизация управления энергетическим режимом не предусмотрена, обычно технологи выбирают второй более затратный режим работы, хотя используемые технические средства управления позволяют реализовать (например, система ArCOS) режим оптимизации управления.

Расчетные траектории изменения во времени $P_{д}(\tau)$ и $I(\tau)$, полученные в процессе математического моделирования предлагаемого метода динамической оптимизации управления энергетическим режимом электродугового технологического агрегата на примере ДСП – 180 при начальном значении тока в окрестности I_1 в момент включения САΟΥ в работу представлены на Рис.3

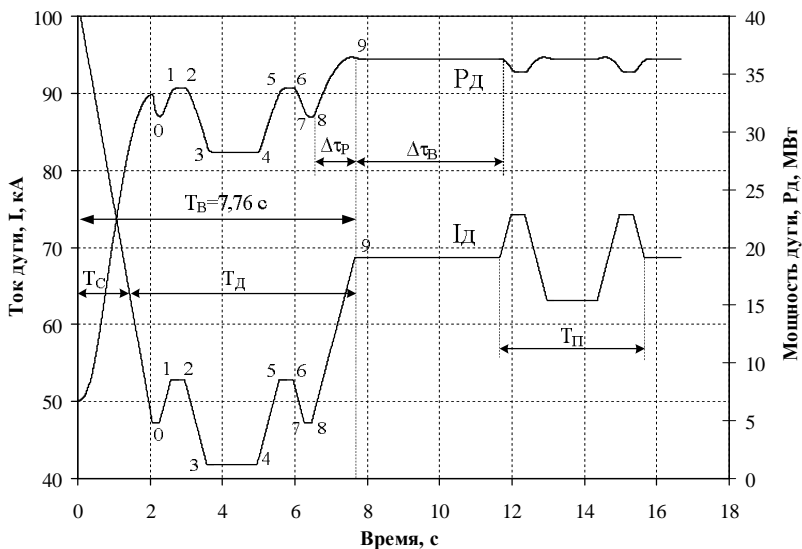


Рис.3 Расчетные траектории изменения $P_d(\tau)$ и $I_p(\tau)$ во времени в процессе функционирования энергосберегающего метода динамической коррекции для $U=1291$ В ДСП-180 при

$$I_n(\tau) \approx I_1(\tau) = 45.5 \text{ кА.}$$

При приведенных ранее параметрах поисковый метод обеспечивает вывод энергетического режима на оптимальный уровень при $P_d \max(\tau)$ за $T_B = 7,76$ с с момента зажигания дуги.

Для повышения эффективности работы предлагаемой САОУ энергетические режимом электродуговых технологических агрегатов и предотвращения ложных срабатываний целесообразно САОУ использовать в качестве дополнительного корректирующего контура, уточняющего работу существующего стабилизирующего контура.

На Рис.3 отмечены продолжительности отдельных интервалов времени, составляющих полный цикл работы - $T_{\text{ц}}$ поискового метода оперативной коррекции энергетического режима .

$$T_{\text{ц}} = \Delta\tau_{\text{П}} + T_{\text{П}} + \Delta\tau_{\text{П}} + \Delta\tau_p + \Delta\tau_B^3$$

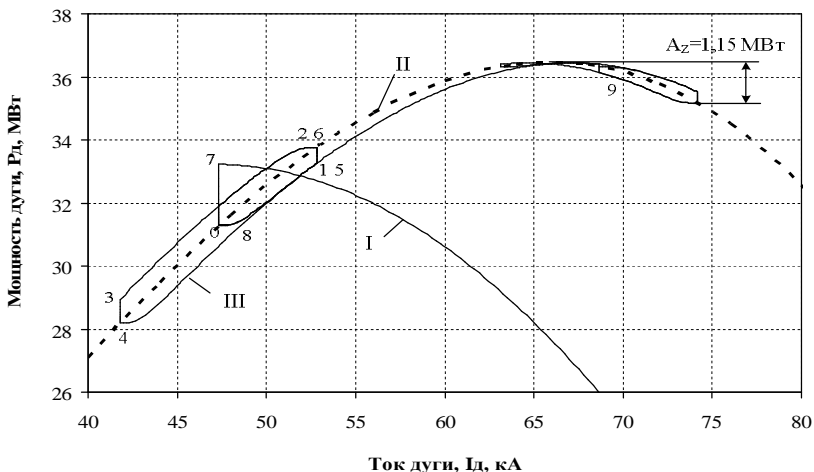


Рис.4 Траектория поискового процесса функционирования метода динамической коррекции заданного стабилизирующим контуром энергетического режима в плоскости координат « $I(\tau) - P_D(\tau)$ »: I – траектория изменения текущего значения $P_D = Y[I(\tau), \tau]$ при работе стабилизирующего контура; II – траектория статической характеристики энергетического режима $P_D[I(\tau), \tau]$ при $U_n = 1291B$; III – траектория изменения $P_D[I(\tau), \tau]$ в процессе динамической поисковой оптимизации управления.

Для более удобного представления эффективности работы САОУ на Рис.4 траектория поискового режима во времени (см. Рис.3) представлена в системе координат « $I(\tau) - P_D(\tau)$ » в увеличенном масштабе.

Для удобства анализа процесса на Рис.3 и Рис.4 соответствующими точками отмечены текущие величины входного управляющего параметра $I(\tau)$ (определяемого величиной импеданса и выходного оптимизируемого $P_D(\tau)$ параметров).

Достижение оптимального (максимального значения $P_D \max(\tau)$ режима на примере ДСП - 180) происходит за один рабочий цикл функционирования САОУ.

Предлагаемый поисковый метод динамической оптимизации управления энергетическим режимом электродуговых технологических агрегатов обеспечивает устойчивый поиск и поддержание величины $P_d \max(\tau)$, при котором достигается максимальная производительность агрегата за счет максимального выделения электрической мощности в дугах каждой из трех фаз.

В процессе математического моделирования проверена работоспособность программного обеспечения предлагаемого метода. В результате проведенной оценки эффективности работы САОУ энергетическим режимом получено ориентировочное снижение энергопотребления на $2 \div 2,5\%$ по сравнению с используемым режимом управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лапшин И.В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи / И.В.Лапшин // М.: ООО «Квадратум», 2002. – 157 с.
2. Ефроймович Ю.Е. Электрические режимы дуговых сталеплавильных печей / Ю.Е. Ефроймович. М.: Metallurgizdat. – 1956. – 131 с.
3. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы элетропечных установок / Н.А. Марков М.: Энергия. –1975. – 204 с.
4. Ишметьев Е.Н., Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Салихов З.Г., Ахметов У.Б Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали: Монография. -Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. -311с.

УДК 62-503.55

С.А. Усков, С.Н. Басков

Новотроицкий филиал
Государственного технологического университета
Московского института стали и сплавов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

В настоящее время существует большое количество программных средств, обеспечивающих человеко-машинное взаи-

модействие в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Несмотря на разнообразие подобных средств, функционал при использовании в качестве клиента браузер ограничен. Данное ограничение вызвано отсутствием библиотек, позволяющих получать данные технологического процесса из серверных языков программирования, таких как PHP, Perl, ASP, Python. Кроме этого программные комплексы обеспечения человеко-машинного взаимодействия в автоматизированных системах управления технологическими процессами обладают ограниченным набором функций и инструментов скриптовых языков программирования.

На основе стандарта OLE (Object Linking and Embedding) - технологии связывания и внедрения объектов в другие документы и объекты, разработанной корпорацией Microsoft был разработана технология, поддерживающая набор стандартов, предоставляющих единый интерфейс для управления объектами автоматизации и технологическими процессами, получившая название OPC (OLE for Process Control). Создание и поддержку спецификаций данного набора стандартов координирует ассоциация OPC Foundation. В настоящее время в ассоциации более 500 членов, и поддержка стандартов осуществляется всеми крупными производителями аппаратных и программных средств автоматизированных систем управления технологическими процессами и промышленными компаниями.

Технология OPC позволяет различным программным модулям, разработанным самостоятельно или другими компаниями, взаимодействовать друг с другом через универсальный открытый интерфейс.

Основным объектом данной технологии является OPC-сервер, который отвечает за получение данных, запрошенных клиентом, от соответствующего устройства управления процессом. На каждом сервере можно создать некоторое количество OPC групп, объединяющих произвольные наборы данных от соответствующего устройства управления процессами - OPC элементов, запрос на получение которых поступил от клиента. OPC группы на сервере могут быть доступны нескольким клиентам одновременно или только одному клиенту.

OPC сервер – программа, получающая данные во внутреннем формате устройства или системы и преобразующая эти данные в формат OPC. OPC сервер является источником данных для OPC-клиентов.

OPC клиент – программа, принимающая от OPC серверов данные в формате OPC и преобразующая их во внутренний формат устройства или системы.

OPC клиент общается с OPC сервером посредством строго определенных в спецификации интерфейсов, что позволяет любому OPC клиенту общаться с любым OPC сервером. Однажды созданный OPC сервер позволяет подключать устройство к широкому кругу программного обеспечения.

Технология OPC базируется на модели COM/DCOM (Component Object Model и Distributed Component Object Model). OPC-сервер и OPC-клиент выполнены в виде COM-объектов. В Win32-совместимой операционной системе взаимодействие COM-объектов происходит на системном уровне. [1]

На основе технологии OPC происходит обмен данными между большинством систем человеко-машинного взаимодействия с устройствами управления процессами - программируемыми логическими контроллерами.

В самих программируемых логических контроллерах технология OPC не поддерживается, поэтому необходимо наличие установленного драйвера, позволяющего использовать данную технологию в различных языках программирования.

Кроме технологии OPC существует низкоуровневый протокол обмена данных с программируемыми логическими контроллерами – CIP (Control and Information Protocol), который поддерживается большинством производителей аппаратных средств автоматизированных систем управления технологическими процессами. Данный протокол не требует установки специальных драйверов для осуществления обмена данными.

На ОАО «Уральская Сталь» в настоящее время функционируют несколько систем, построенных с помощью Web-технологий и участвующих или зависящих от автоматизированных систем управления технологическими процессами.

В листопрокатном цехе №1 на стане 2800 в связи с вводом в эксплуатацию новой чистовой клетки «Кварто», а потом и новой черновой клетки «Дуо» и методической печи №1, появились дополнительные требования для работы агрегатов в автоматическом режиме. Для автоматической настройки клеток без участия человека необходимо получение по каждой обрабатываемой заготовке информации о размерах, допусках, технологии, температуры начала и окончания прокатки, марки стали, химическом анализе, данных заказа. В системе автоматизации второго уровня клеток «Дуо» и «Кварто» предусмотрена воз-

возможность ручного ввода и/ или корректировки такой информации через человеко-машинный интерфейс на случай отсутствия цеховой системы автоматизации третьего уровня, которая должна пересылать необходимые данные на клеть.

Ручной ввод информации предполагает заполнение не менее 20 полей необходимых технологических данных для работы клетки и результатов химического анализа по 20 химических элементам. На данную операцию затрачивается время примерно 10 минут на каждую заготовку и привлечение дополнительного персонала для круглосуточной работы. А это означает, что темп прокатки при ручном вводе будет составлять примерно шесть заготовок в час или 10% от максимальной производительности методических печей. Ввод в эксплуатацию новой методической печи потребует передачу технологических параметров для нагрева, результатов химического анализа и данных из заказа для слябов перед загрузкой в печь. Цеховой системы автоматизации третьего уровня в листопрокатном цехе №1 нет, и поэтому для обеспечения оперативного поступления данных по заготовкам и, следовательно, автоматической настройки клетки на необходимый режим прокатки было принято решение о разработке и внедрении системы слежения за слябами на участке методических печей. Использование подобной системы позволило пересылать необходимую информацию в систему автоматизации второго уровня клеток «Дуо» и «Кварто» сразу после выгрузки сляба из методической печи и произвести автоматическую настройку без задержек.

После ввода в эксплуатацию методической печи №1, система автоматизации второго уровня также будет получать необходимую информацию без доработки системы слежения. В настоящее время нагрев и прокат производятся по бумажным экземплярам наряд задания на посад и прокат, которые передаются при помощи курьеров на посты управления из планово-распределительного бюро листопрокатного цеха №1, как представлено на рис. 1.

Система слежения получает электронный вариант наряд задания в момент его формирования в планово-распределительном бюро через базу данных и отображает на экране для оператора поста управления №1.

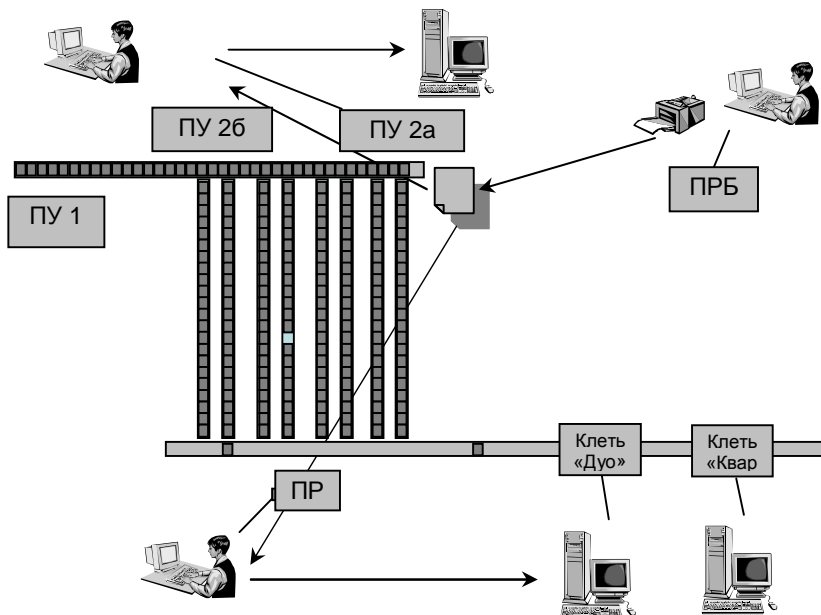


Рис. 1. Схема передачи нарядов до внедрения

По мере помещения слябов на загрузочный рольганг на экране операторов постов управления №2б и №2а появляются записи об этих слябах, позволяющие принять решение о посадке в печь и указать необходимое назначение – печь и ряд. На первом рабочем посту отображается информация о слябах, находящихся в печах, и выгружаемых из печей в текущее время. Схема передачи информации после внедрения системы слежения представлена на рис. 2.

Данная система слежения обеспечивает передачу информации с момента выгрузки сляба из методических печей на второй уровень автоматизации клеток для их настройки. Также система слежения позволила уменьшить количество ошибок, допускаемых технологами при подсчете.

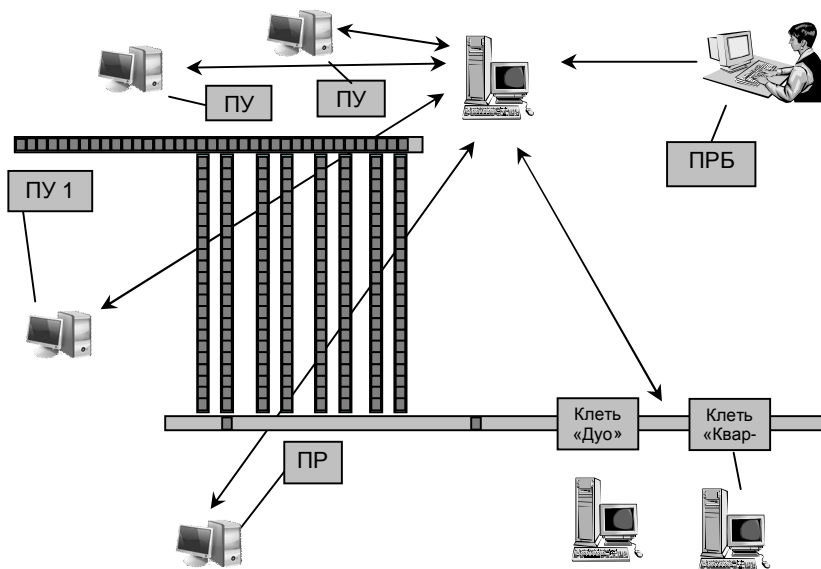


Рис. 2. Схема передачи нарядов после внедрения

Слежение осуществляется за каждым слябом, которые получают свои уникальные идентификационные номера в базе данных, начиная со стола загрузки на рольганг перед постом управления №1. По данному идентификационному номеру можно получить информацию о размерах сляба, плавке, данных заказа, результатах химического анализа, требуемом режиме нагрева, проката, дальнейшей обработке. Один или несколько слябов могут быть объединены в группы, а группы в порции. Различаются группы по нагреву и прокату, так как одна группа нагрева может соответствовать одной или нескольким группам проката согласно заданиям на посад и прокат. На посту управления №1 происходит привязка слябов к группам нагрева – происходит создание записей, соответствующих слябам с уникальными идентификационными номерами и указанием номера группы нагрева. После посада в методические печи составляется наряд-задание на прокат и происходит назначение групп проката слябам.

У каждого сляба, появляющегося в системе с поста управления №1 имеется поле статуса или назначения. Первоначальное назначение – пост управления №2б, согласно технологиче-

ской цепочке, следующее – печи №3, 4 или передача на пост управления №2а и загрузка в печи №1, 2. Затем – первый рабочий пост и отправка информации на второй уровень автоматизации клетей «Дуо» и «Кварто» о прокате или возврате сляба после печи. Отправка технологической информации о слябах, находящихся в печах, но не об их очередности выгрузки из печи происходит заблаговременно. Предусмотрено накопление информации о проходящих через систему слябах, которая может использоваться для проверки правильности действия операторов. Дальнейший анализ данных специалистами центральной лаборатории комбината и технического управления необходим для установления взаимосвязи параметров, характеризующих качество с технологическими параметрами настройки клетки, что позволит в дальнейшем корректировать технологию, установить контроль качества и наиболее полно реализовать все конструктивные и технологические возможности, заложенные в новые агрегаты. Система слежения состоит из html страничек, получающих и отправляющих данные через AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) из/в php скрипты, что позволяет динамически перестраивать страничку без ее принудительного обновления. Технология AJAX служит для создания более гибких и интерактивных web-приложений. [2]

Достоинства созданной системы слежения:

- оперативность поступления данных из ПРБ и об изменении местонахождения сляба;
- интуитивно-понятный интерфейс для операторов, замена бумажного варианта наряд задания;
- накопление истории о прошедших через систему слябах;
- возможность масштабирования системы (в том числе и подключить любое количество пользователей без необходимости установки дополнительного программного обеспечения).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение технологии OPC. / Р.Р. Ковязин, А.Е. Платунов // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). Выпуск 10. Информация и управление в технических системах. - СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2003. С.71-76.
2. Дари К. AJAX и PHP. Разработка динамических веб-приложений.// Символ-Плюс, 2009. 397с.

**М.Н. Давыдкин, А.С.
Коньков**

Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова

С.Н. Басков

Новотроицкий филиал
Государственного технологического университета
Московского института стали и сплавов

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА LPC2148 В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВНОГО ПУСКА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Переход от аналоговых систем управления к системам прямого цифрового управления, является необратимой тенденцией современных систем управления. Прямое управление это подача управляющего сигнала непосредственно от микроконтроллера на силовой модуль в моменты времени заданные алгоритмом работы системы, а также непосредственный ввод информации о текущем состоянии системы с последующей программно-аппаратной обработкой полученной информации внутри микроконтроллера. Информация в микроконтроллер может поступать как в цифровом (цифровые датчики скорости, положения) так и аналоговом виде (датчик тока, напряжения). Современный микроконтроллер интегрированный в систему управления электропривода должен обладать как высокой скоростью обработки получаемой информации, так и средствами для преобразования полученных сигналов. Современный микроконтроллер для преобразования аналоговых сигналов должен иметь встроенный АЦП с разрешением не ниже 10-12 двоичных разрядов и временем преобразования не меньше 5-10 мкс. Восьми каналов АЦП достаточно для приема не только сигналов обратных связей по токам фаз, но и сигналов обратных связей по напряжению и току, а также внешних задающих сигналов. Алгоритм векторного управления предъявляет повышенные требования к математическому аппарату и объему памяти ОЗУ микроконтроллера. Наличие датчика скорости в системе управления обуславливает наличие таймера, работающего в «квадратурном» режиме. Определение скорости

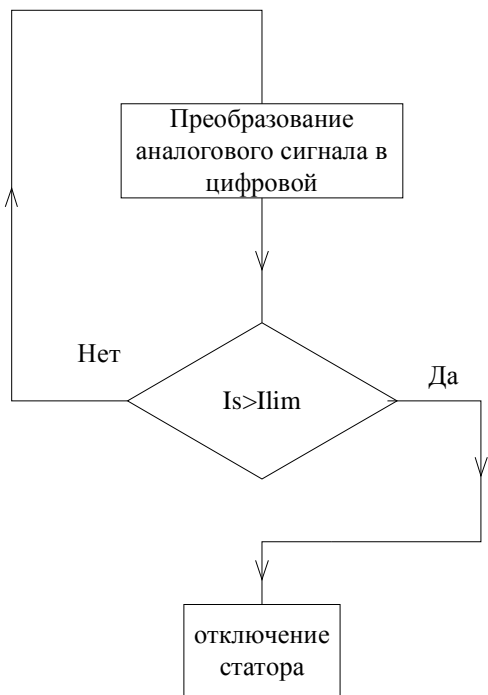


Рис. 1. Алгоритм работы блока ограничения

должно выполняться с регулируемым разрешением как по числу импульсов на периоде измерения скорости (от 1 до 255), так и с регулируемым разрешением по времени (максимальное разрешение 50-100 нс при диапазоне регулирования разрешения 1:128). Если перечисленные выше требования к периферийным устройствам микроконтроллера будут выполнены, то окажется возможным измерение скорости в диапазоне, как минимум, 1:20000 с точностью, не хуже 0,1%. Анализ современных недорогих микроконтроллеров обладающих вышеперечисленными параметрами позволяет остановиться на 32-ух битном микроконтроллере

семейства LPC2100 фирмы NXP LPC2148 с архитектурой процессора ARM7 TDMI.[2]

Выпускаемые в настоящее время приборы работают на тактовой частоте до 60 МГц, обеспечивая производительность до 54 MIPS, имеют встроенную Flash-память объемом 512 Кбайт со 128-битной шиной, статическую оперативную память (SRAM) объемом 64 Кбайт, модуль ШИМ, 10 канальный 10-битный модуль АЦП, 10-битный модуль ЦАП, интерфейсы I²C, SPI, CAN, два UART (один UART с полным модемным интерфейсом), USB.

Существуют разнообразные алгоритмы работы устройств плавного пуска электродвигателей. Ключевыми моментами в них являются:

1. Определение начальных условий;

2. Определение положения ротора (или вектора потокосцепления ротора);
3. Определение положения поля статора;
4. Определение электрических параметров системы (тока, напряжения угла сдвига фаз);
5. отслеживание темпа нарастания тока и напряжения;
6. Подача управляющего импульса непосредственно на силовой модуль.

Возможности микроконтроллера LPC2148 позволяют выполнить все вышеперечисленные задания. Приведем пример работы микроконтроллера для способа векторно-импульсного управления синхронным двигателем [1].

В устройстве, работающего по принципу векторно-импульсного управления, необходимо ограничивать токи, протекающие в статоре синхронного двигателя. В периферии микроконтроллера, возможно, использовать АЦП для определения токов. Алгоритм работы блока ограничения тока представлен на рис. 1. АЦП преобразует аналоговый сигнал, поступающий с датчика тока в цифровой код, который проверяется на выполнение условия. Если ток статора превышает заданный ток ограничения, то статор отключается от сети. Принципиальная схема устройства системы управления по векторно-импульсному принципу изображена на рис. 2.

Максимальная работа АЦП микроконтроллера LPC2148 4,5 МГц. Аналого-цифровое преобразование входного напряжения с полной точностью (расширением) требует 11 периодов частоты 4.5 МГц, что соответствует 2,44 мкс на одно преобразование. Данный показатель вполне удовлетворяет выше приведенным требованиям.[3]

Применение датчиков положения или скорости в системе управления двигателя предъявляет к микроконтроллеру требование в наличии средств измерения времени и импульсов, поступающих с датчика. В предлагаемом микроконтроллере имеются 2 таймера. При известной тактовой частоте работы таймера можно определить время, за которое поступают сигналы с датчика положения (или скорости). Зная количество импульсов на оборот датчика скорости возможно определение скорости вращения ротора.

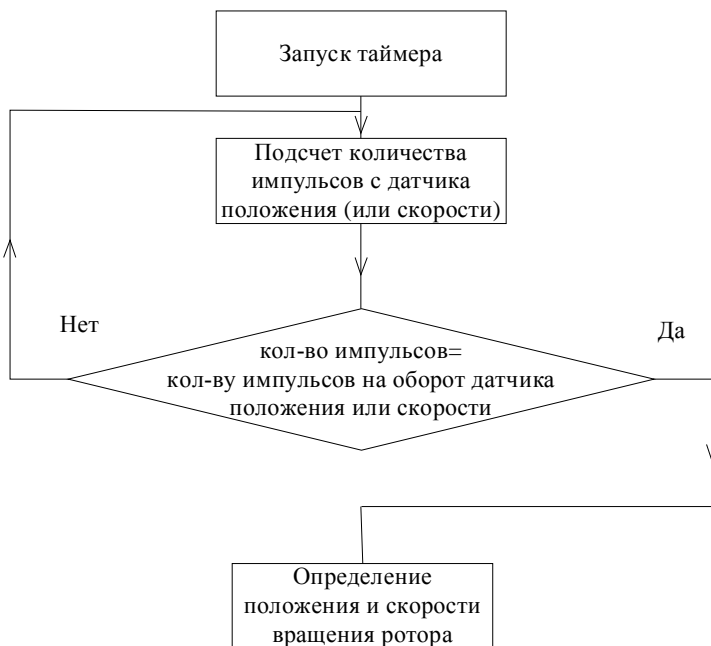


Рис. 3. Алгоритм работы блока определения положения и скорости вращения ротора

По количеству поступающих импульсов возможно определение положение ротора. Подсчет поступающих импульсов с датчика положения (или скорости) можно вести в режиме внешнего прерывания микроконтроллера. Микроконтроллер LPC 2148 обладает энергонезависимой Flash-памятью объемом 512 Кбайт, что позволяет запоминать последнее положение ротора двигателя, перед отключением питающего напряжения. Это упрощает начальную инициализацию начальных условий для системы векторно-импульсного управления при условии, что после отключения питания ротор двигателя будет заблокирован. На рис. 3 представлен алгоритм работы блока определения положения ротора.

Краткий анализ микроконтроллера LPC2148 позволяет сделать вывод о возможности использования данного устройства в системах плавного пуска электродвигателей. Он отвечает

всем современным требованиям, предъявляемым к микроконтроллерам. Наличие практически всех интерфейсов используем в промышленности позволяет расширить возможности микроконтроллера и использовать данные поступающие непосредственно с электродвигателя в системах управления высшего уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Векторно-импульсный способ пуска синхронных двигателей в компрессорных установках кислородно-компрессорного цеха ОАО «Уральская сталь»/ М.Н. Давыдкин // Известия ВУЗ Электромеханика. – 2009. - №1. – С. 99-101.
2. Тревор Мартин Микроконтроллеры ARM7. Семейство LPC2000 компании Philips.// М. – 2006. 240с.
3. П.П. Редькин Микроконтроллеры ARM7 семейства LPC2000. Руководство пользователя. //М. - 2007. 560с.

УДК 504.062

**О.Д. Олендаренко,
Е.Н. Темлянцева, М.В. Темлянец**
ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет»

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ
ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Для защиты стали от окисления при нагреве в печах под обработку давлением применяют защитные покрытия. В настоящее время разработано большое многообразие различных составов покрытий, обеспечивающих надежную защиту стали от угара при нагреве до температур порядка 900 – 1100 °С. Гораздо меньше разработано технологичных и относительно дешевых покрытий, способных надежно защищать сталь при температурах 1200 – 1300 °С в условиях массового производства при нагреве блюмов и слябов в методических печах перед прокаткой [1]. Одной из актуальных задач является научное изыскание новых составов на основе дешевых, широко распространенных компонентов, надежно защищающих сталь. Для этих целей весьма перспективным является использование твердых дисперсных отходов металлургического производства [2].

На металлургических предприятиях для футеровки дуговых сталеплавильных печей, конвертеров и сталеразливочных ковшей широкое распространение получили периклазовые и периклазоуглеродистые огнеупоры, содержание углерода в последних достигает 5 – 10 %. На многих предприятиях после службы и ремонта футеровки такие огнеупоры вывозятся в отвалы. Отвалы занимают значительные площади потенциально полезных земель, увеличивают общую техногенную нагрузку на окружающую среду. В то же время лом огнеупоров, бывших в употреблении, представляет собой ценное вторичное сырье. Централизованная утилизация лома огнеупоров не всегда экономически целесообразна, поскольку связана со значительными затратами на транспортировку на предприятия, занимающиеся переработкой огнеупорного лома.

Основная цель настоящей работы – разработка защитных покрытий на основе отходов металлургического производства,

способных надежно защищать стальные заготовки от угара при нагреве в печах.

В результате проведенной работы создано новое покрытие, в котором в качестве заполнителя использовали лом и бой периклазовых и периклазоуглеродистых огнеупорных изделий, связки – водную керамическую вяжущую суспензию (ВКВС) кремнеземистого состава [2]. Покрытие представляет собой смесь заполнителя и ВКВС. ВКВС добавляют в количестве 0,25 – 0,45 мл/кг молотого лома периклазовых огнеупоров, для придания смеси необходимой для нанесения покрытия консистенции и свойств.

Для исследования защитных свойств покрытия, имеющие консистенцию густой сметаны, наносили на образцы рельсовой стали Э76Ф поперечным сечением 10×10×30 мм. После нанесения покрытия на образцы их высушивали при температуре 40 – 60 °С. Толщина покрытия составляла 1 мм. Нагрев образцов проводили в электрической печи сопротивления СУОЛ-0,25.1/12,5-И1 с нагревателями из карбида кремния в атмосфере воздуха. Образцы нагревали до температур 1000, 1100, 1200 и 1250 °С и выдерживали при постоянной температуре в течение 60 мин. Температуру образца измеряли хромель-алюмелевой термпарой и многоканальным программным регулятором температур «Термодат 19Е2». Угар стали определяли гравиметрическим методом по потере массы образца.

В результате проведенных экспериментов установлено, что периклазоуглеродистое покрытие не оплавляется при нагреве до температур 1250 – 1280 °С и в этом температурном интервале обладает достаточно высокими защитными свойствами, снижая угар стали примерно в 2 раза. В частности, угар стали без покрытия, после выдержки в течение 60 мин при 1250 °С составляет 0,26 г/см², а с покрытием 0,14 г/см². После нагрева продукты взаимодействия окалина и покрытия относительно легко удаляются с поверхности металла, что снижает вероятность образования брака по вкатанной или вдавленной окалине. Разработанные покрытия приняты к внедрению в производство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология эмали и защитных покрытий / Л.Л. Брагина, А.П. Зубехина, Я.И. Белый и др. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ); Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 488 с.
2. Рециклинг твердых отходов в металлургии / К.А. Черепанов, С.М. Абрамович, М.В. Темлянцев, Е.Н. Темлянцева. – М.: Флинта: Наука, 2004. – 212 с.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абдрахманов Р.Р.	77	Москвин В.М.	50
Андреев С.М.	99,106,138	Мухина Е.Ю.	99
Арестов В.С.	38	Немых А.А.	82
Ахметов Т.У.	169	Обухова Т.Г.	158
Ахметов У.Б.	169	Огаров А.В.	4
Баженов Н.М.	65	Олендаренко О.Д.	193
Басков С.Н.	180, 187	Павлов А.С.	93
Блохин А.И.	65	Парсункин Б.Н.	106, 138, 158
Гребенникова В.В.	85, 99	Прохоров И.Е.	21, 27
Гуков Д.В.	138	Радионов А.А.	115
Давыдкин М.Н.	187	Рябчиков М.Ю.	93, 124, 138
Евстигнеев В.Л.	31	Рябчикова Е.С.	85, 132, 158
Ишметьев Е.Н.	106	Сергеев А.И.	65
Каракоцкая И.А.	24	Смирнов Е.В.	132
Коньков А.С.	187	Сучков А.В.	4
Корнилова И.Г.	77, 93	Темлянцев М.В.	193
Кочержинская Ю.В.	21, 27	Темлянцева Е.Н.	193
Линьков С.А.	115	Трофимов Л.М.	124
Лисиенко В.Г.	4	Усков С.А.	180
Логунов С.М.	38, 57	Хренов Е.А.	65
Логунова О.С.	38, 57	Шакшин В.В.	57
Майорова Т.В.	31	Ячиков И.М.	69
Малахов О.С.	115		
Мельникова О.И.	99		
Морозова В.А.	4		

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, А.В. Сучков, А.В. Огаров РАЗВИТИЕ МОДЕЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ	4
И.Е. Прохоров, Ю.В. Кочержинская ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДОМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ.....	21
И. А. Караоцкая ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.....	24
Ю.В. Кочержинская, И.Е. Прохоров СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	27
Т.В. Майорова, В.Л. Евстигнеев ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА С УЧЕТОМ РАБОТЫ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ГАЗОВ.....	31
О.С. Логунова, В.С. Арестов, С.М. Логунов ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛАВНОГО ПОСТА УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ.....	38
В.М. Москвин ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОДУШЕК ОПОРНЫХ ВАЛКОВ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ КВАРТО.....	50
О.С. Логунова, В.В. Шакшин, С.М. Логунов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ФОРМЫ НА ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ.....	57
А.И.Блохин, Е.А.Хренов, Н.М.Баженов, А.И.Сергеев АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАСКИСЛЕНИЯ СТАЛИ В АГРЕГАТЕ ПЕЧЬ-КОВШ.....	65

И.М. Ячиков

ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ВАННЕ РАСПЛАВА
ДППТ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ И ОТКЛЮЧЕНИИ ТОКА ДУГИ..... 69

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

И.Г.Корнилова, Р.Р. Абдрахманов

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ СУШИЛЬНОГО
БАРАБАНА..... 77

А.А. Немых

РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЕМ
ГОРЕЛОК БАШЕННОЙ ПЕЧИ АНГЦ С ЦЕЛЬЮ
УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ РАДИАНТНЫХ ТРУБ..... 82

В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ
ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ПЕРИОДОВ ДУТЬЯ ДЛЯ ГРУППЫ
БЛОКОВ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ..... 85

М.Ю. Рябчиков, И.Г. Корнилова, А.С. Павлов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ДЕФЕКТНОЙ
ПРОДУКЦИИ АГРЕГАТОМ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО
ЦИНКОВАНИЯ ОАО «ММК» С ПОМОЩЬЮ
НЕЙРОСЕТОВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА
МЕТАЛЛА..... 93

**С.М. Андреев, В.В. Гребенникова, Е.Ю. Мухина,
О.И. Мельникова**

РАСЧЁТ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ПО
ТЕПЛООВОМУ СОСТОЯНИЮ ГРЕЮЩЕЙ СРЕДЫ..... 99

С.М. Андреев, Е.Н. Ишметьев, Б.Н. Парсункин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО
ВАКУУМИРОВАНИЯ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
СТАТИСТИЧЕСКОГО ТИПА..... 106

А.А. Радионов, С.А. Линьков, О.С. Малахов

ПРЯМОТОЧНЫЙ ВОЛОЧИЛЬНЫЙ СТАН
КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ..... 115

М.Ю. Рябчиков, Л.М. Трофимов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
БЕСКОНУСНЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ В
ДОМЕННОМ ЦЕХЕ ОАО «ММК»..... 124

Е.С. Рябчикова, Е.В. Смирнов ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	132
Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, М.Ю. Рябчиков, Д.В. Гуков СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА.....	138
Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова, Т.Г. Обухова НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕЧИ.....	158
У.Б. Ахметов, Т.У. Ахметов ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	169
С.А. Усков, С.Н. Басков ИСПОЛЬЗОВАНИЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.....	180
М.Н. Давыдкин, А.С. Коньков, С.Н. Басков ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА LPC2148 В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВНОГО ПУСКА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КОМПРЕС- СОРНЫХ УСТАНОВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	187

ЭКОЛОГИЯ И ХИМИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ

О.Д. Олендаренко, Е.Н. Темлянцева, М.В. Темлянцев ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ.....	193
--	------------