

На правах рукописи

Газимов Руслан Тахирович

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОКАТКИ
РУЛОННОЙ МЕДНОЙ ПОЛОСЫ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (в металлургии).

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2007 г.

Работа выполнена на кафедре Компьютерные информационные и управляющие системы автоматизации Государственного технологического университета - «Московский институт стали и сплавов».

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Салихов Зуфар Гарифуллович

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Криводубский Олег Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Карабутов Николай Николаевич
кандидат технических наук, с.н.с.
Русаков Андрей Дмитриевич

Ведущая организация: ОАО «Союзцветметавтоматика»

Защита состоится 30 мая 2007 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д.212.132.07 в Государственном технологическом университете - «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного технологического университета - «Московский институт стали и сплавов».

Автореферат разослан 26 апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук,
профессор



Е.А. Калашников

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время в России и за рубежом наблюдается бурное развитие рынка электроэнергии: осуществляется масштабная реконструкция энергосистем, вводятся в эксплуатацию новые мощности. В связи с этим, за последние пять лет, резко возросла цена на медьсодержащие электротехнические элементы, в частности, на плоский медный прокат. По состоянию на апрель 2007 г. рыночная стоимость медной полосы составляет 250 000 – 300 000 руб./т.

Существенной составляющей себестоимости медного проката (порядка 45-55 %) являются затраты на производство. Поэтому снижение производственных затрат за счет автоматизации и оптимизации управления технологическими процессами производства медной полосы требует новых исследований и технических решений.

При анализе состояния автоматизации производства медной полосы выявлены недостатки действующих систем автоматического управления или АСУТП прокатки. Использование известных систем автоматизированного управления процессом прокатки не позволяет оперативно (в ритме с процессом прокатки) учитывать характеристики локальных деформаций полосы. Также в большинстве современных АСУТП не проводится комплексные оценивание и учет нестационарности характеристик прокатки от цикла к циклу. Все это в совокупности приводит к понижению качества готовой продукции и появлению обрезки до 15-20 % от ее общей массы.

Увеличение массы обрезки приводит к снижению производительности за счет возрастания рециркулирующих потоков (с соответствующими энергозатратами). В свою очередь изделия, не удовлетворяющие требуемым нормативам качества, реализуются заказчику по меньшей цене. Данные явления негативно отражаются на прибыли предприятия.

Исходя из вышеизложенного, в диссертации решается актуальная **задача улучшения качественных показателей работы прокатных**

станов за счет усовершенствования автоматизированной системы управления процессом прокатки медных полос.

Цель исследования. Целью настоящей диссертационной работы является снижение массы обрезки при обеспечении заданных показателей качества производимой рулонной медной полосы за счет создания адаптивной автоматизированной системы управления технологическим процессом прокатки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технические вопросы:

- изучение закономерностей влияния нестационарности характеристик прокатного оборудования на качественные показатели прокатываемой полосы (локальные искажения, объем обрезки);
- разработка методов и алгоритмов оперативного оценивания локальных искажений полосы в ритме с процессом прокатки;
- формирование функциональных схем, составляющих адаптивную АСУТП прокатки, и разработка алгоритмов функционирования ее элементов;
- разработка алгоритмов коррекции (улучшения) технологических режимов прокатки полосы от цикла к циклу на основании полученных оценок качества готовой полосы;
- разработка программного комплекса, реализующего полученные алгоритмы функционирования АСУТП прокатки и оценка эффективности его работы.

Методы исследования: *теория множеств* при формализации характеристик процесса прокатки; *численные методы* при выявлении закономерностей влияния параметров прокатного стана на формирование качественных показателей готовой полосы; *математическая статистика* при разработке методов контроля локальных искажений полосы; *методы идентификации систем, функциональный анализ* и *методы искусственного интеллекта* при разработке алгоритмов оперативного оценивания состояния прокатываемой полосы и выбора соответствующих режимов прокатки.

Автор выносит на защиту:

- формализацию закономерностей влияния нестационарности характеристик прокатного оборудования на качественные показатели прокатанной полосы;
- метод оценивания пространственного состояния координат полосы при оперативном контроле ее локальных искажений;
- функциональная схема адаптации работы прокатного стана (через коррекцию технологических режимов) на основании оценок состояния прокатанных полос;
- алгоритмы и программы рационального выбора технологических режимов прокатки при управлении работой стана от цикла к циклу.

Научная новизна полученных результатов:

- получили дальнейшее развитие методы математического описания (в пространственных и режимных координатах) изменения формы и геометрических размеров рулонной медной полосы в процессе прокатки, с использованием которых изучены закономерности влияния нестационарности характеристик работы стана при многоклетевой прокатке на качественные показатели прокатываемой полосы, что позволило получить систему связей между состояниями полосы и соответствующими им режимами прокатки;
- впервые разработаны модели оперативного оценивания локальных искажений полосы в процессе ее деформации, и формирования на их основе корректирующих воздействий на пространственные координаты состояния полосы;
- впервые с применением прогрессивных информационных технологий (правила ассоциативного связывания и принцип динамического стереотипа) разработана методика рационального выбора технологических режимов прокатки при управлении работой стана от цикла к циклу;

- усовершенствована функциональная схема АСУТП прокатки путем включения в контур управления следящего идентификатора с элементами интеллектуализации (системы ассоциативной памяти), что позволило обеспечить минимизацию массы обрезки за счет последовательной адаптации режимов прокатки к изменяющимся характеристикам клетей и стана.

Практическая значимость полученных результатов:

- предложенный в работе метод оперативного оценивания локальных искажений полосы при ее деформации, реализованный в виде алгоритма, позволяет сократить объем данных, хранимых в базе данных для описания технологического процесса, а также классифицировать в БД состояния прокатанной полосы по типам искажений для улучшения качества управляющих решений, принимаемых оператором;
- созданная схема идентификации системы управления прокаткой по состоянию полосы, позволяет осуществлять каскадный (от клетки к клетке) выбор режимов прокатки, что дает возможность своевременно улучшить качество прокатываемой полосы; т.е. уменьшить число возникающих локальных искажений и снизить возможный объем обрезки;
- разработанный ассоциативный алгоритм интеллектуализированной идентификации, в ходе технологического процесса (от цикла к циклу) позволяет накапливать и структурировать информацию о реализованных режимах прокатки, их эффективности, полученных оценках искажений полосы и объема обрезки. Системы ассоциативных связей (в банках данных) могут быть использованы для других станов и сортаментов (с предварительно внесенными поправками);
- разработанные процедуры накопления и структурирования информации, позволяют хранить ее в базе данных в явном виде, что дает возможность оператору корректировать условия работы системы в ритме с технологическим процессом.

Внедрение результатов. Разработанные компьютерные подсистемы оперативного учета локальных деформаций и рационального выбора режимов прокатки прошли опытно-промышленные испытания на "Артемовском заводе ОЦМ", что подтверждено соответствующим актом.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XXXII Международная конференция "Вопросы оптимизации вычислений" (2005, п. Кацивели, Крым, Украина);
- V Международная научно-техническая конференция "Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы" (2005, п. Дивноморское, Геленджик, Россия);
- V Международная научная молодежная школа "Нейроинформатика и системы ассоциативной памяти" (2005, п. Дивноморское, Геленджик, Россия);
- IX Международная научно-техническая конференция "Моделирование, идентификация, синтез систем управления" (2006, п. Канака, Крым, Украина);
- XXXIII Международная молодежная научная конференция "Гагаринские чтения" (2007, Москва).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 9 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованных литературных источников из 156 наименований на 15 страницах и приложений на 10 страницах. Общий объем работы - 202 страницы. Работа содержит 47 рисунков (из них 41 вынесены на 38 отдельных листов) и 12 таблиц (из них 3 вынесены на 2 отдельных листа).

Содержание работы

Во введении обозначена актуальность диссертационного исследования, сформулированы: задача, цель и вопросы исследования, а также результаты, выносимые на защиту. Выделены аспекты исследования, составляющие научную новизну, определена практическая значимость полученных результатов, приведены публикации и апробации результатов диссертационной работы.

В первом разделе проведен анализ состояния автоматизации прокатного производства, в ходе которого выявлено три основных направления усовершенствования АСУТП прокатки:

- разработка методов и систем оперативного контроля характеристик деформации прокатываемой полосы (измерительные комплексы);
- разработка методов автоматизированного определения управляющих режимов в реальном времени (от цикла к циклу) для технологического процесса (методы математического моделирования и идентификации процесса прокатки);
- разработка методов и систем автоматической адаптации параметров работы стана при условиях минимизации объема обрезки полос и их соответствии заданным показателям качества проката.

При исследовании литературных источников по каждому из перечисленных направлений были выявлены недостатки современных АСУТП прокатки:

- отсутствие методов комплексного оценивания и оперативного контроля характеристик прокатки;
- функциональные схемы существующих АСУТП прокатки не содержат в явном виде подсистем оперативной фиксации состояний прокатываемой полосы, в результате чего задача минимизации объема обрезки не может быть решена системой в реальном времени;
- отсутствие надежных и точных методов моделирования и идентификации процесса прокатки для оперативного выбора управляю-

щих режимов. Существующие модели носят исследовательский характер, и не обеспечивают своевременное принятие эффективных управляющих решений.

На основании анализа выявленных недостатков была поставлена задача диссертационной работы, предусматривающая рассмотрение следующих научно-технических вопросов:

- математическое описание закономерностей изменения формы и размеров полосы при прокатке с учетом нестационарности характеристик клетей;
- создание методов оперативного контроля и оценивания локальных искажений полосы в ритме процессом прокатки;
- определение принципов последовательного (от цикла к циклу) учета изменяющихся характеристик прокатки для формирования управляющих воздействий;
- разработка инженерных основ адаптации работы прокатного стана исходя из оценок состояния полосы;
- разработка подсистем и алгоритмов АСУТП прокатки, соответствующих данным принципам; их программная реализация.

Второй раздел посвящен комплексному анализу процесса прокатки медных полос для выявления закономерностей влияния параметров работы прокатного стана на качественные характеристики проката. В ходе исследования были выявлены основные показатели деформации полосы: η – коэффициент обжатия, β – коэффициент уширения, λ – коэффициент вытяжки, формализованы их взаимосвязи с фактическими размерами полосы, и определены закономерности изменения показателей деформации в зависимости от типа возникающих локальных искажений.

В связи с этим, для представления локальных искажений $N_k(q)$ предложено использовать наборы функций отклонений показателей деформации в каждой точке полосы:

$$N_k(q) = (\Delta\eta_k(y,z), \Delta\beta_k(z), \Delta\lambda_k(y)), \quad (1)$$

где q – номер технологического цикла, k – номер клетки, в которой осуществляется деформация, x, y, z – координаты полосы. Для численного расчета данных отклонений предлагается использовать следующие соотношения:

$$\Delta\eta_k(y', z') = \frac{\Delta h_k(y', z')}{\Delta h_{k-1}(y', z')}, \quad (2)$$

$$\Delta\beta_k(z') = \frac{\Delta b_k(z')}{\Delta b_{k-1}(z')}, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_k(y') = \frac{\Delta l_k(y')}{\Delta l_{k-1}(y')}, \quad (4)$$

где x', y', z' – приведенные координаты, используемые для сопоставления отклонений фактических геометрических размеров полосы от нормативных ($\Delta h_k(y, z)$, $\Delta b_k(z)$, $\Delta l_k(y)$), измеренных до и после прокатки в клетки. Данные отклонения рассчитываются согласно правилам:

$$\Delta h_k(y', z') = h_k(y', z') - h_k, \quad (5)$$

$$\Delta b_k(z') = b_k(z') - b_k, \quad (6)$$

$$\Delta l_k(y') = l_k(y') - l_k, \quad (7)$$

где h_k, b_k, l_k – нормативные толщина, ширина и длина полосы; $h_k(y, z), b_k(z), l_k(y)$ – фактические толщина, ширина и длина полосы, зафиксированные в каждой ее точке. На основании приведенных соотношений составлены логические правила оценки качества деформации в k -й клетки:

- если $\Delta\eta_k(y', z') > 1$, то на выходе из k -й клетки, в точке (y', z') увеличилось искажение полосы по толщине;
- если $\Delta\eta_k(y', z') = 1$, то в точке (y', z') искажение полосы по толщине не изменилось;
- иначе, в точке (y', z') искажение полосы по толщине уменьшилось.

Аналогичные заключения имеют место для $\Delta\beta_k(z')$ и $\Delta\lambda_k(y')$.

Для оценки качества прокатки полосы по стану в целом используется значение объема обреза ΔV , связанного с массой следующим соотношением:

$$\Delta m = \rho(g_j) \cdot \Delta V, \quad (8)$$

где $\rho(g_j)$ – плотность металла [кг/м³], зависящая от марки меди g_j .

Объем обрезки рассчитывается как криволинейный интеграл вида (9) по области $A_r(q)$ вида (10).

$$\Delta V = \int_{z a_r}^{z b_r} \int_{y l_r}^{y r_r} (h t_r(y, z) - h b_r(y, z)) dy dz + \int_{z a_r}^{z b_r} \int_{y l_r}^{y r_r} (h t_r(y, z) - h b_r(y, z)) dy dz, \quad (9)$$

$$A_r(q) = ((h b_r(y, z), h t_r(y, z)); (b r_r(z), b l_r(z)); (z a_r, z b_r)), \quad (10)$$

где представлена фактическая форма граней полосы: $z b$ – передней, $z a$ – задней, $b r(z)$ – правой, $b l(z)$ – левой, $h b(y, z)$ – нижней и $h t(y, z)$ – верхней; и нормативная: $y r$ – правой, $y l$ – левой. Форма граней полосы связаны с фактическими значениями размеров полосы $h_r(y, z)$, $b_r(z)$, $l_r(y)$, r – номер последней клетки. Для обеспечения требуемого качества прокатки, область $A_r(q)$ ограничивается сложной системой криволинейных поверхностей:

$$B_1 \subset A_r(q) \subset B_2, \quad (11)$$

рассчитываемых на основании нормативных размеров полосы (12) и допустимых по стандарту отклонений (13).

$$A_r = (h_r, b_r, l_r), \quad (12)$$

$$G = f(A_r) = ((\Delta h s, \Delta h i, s f l), (\Delta b s, \Delta b i, s c m), (p l)), \quad (13)$$

где, согласно стандартам: $\Delta h s$ – верхняя граница диапазона колебаний толщины полосы [мм]; $\Delta h i$ – нижняя граница диапазона [мм]; $s f l$ – допустимая неплоскостность (показатель относительных неровностей полосы) [10 мкм/м]; $\Delta b s$ – верхняя граница диапазона колебаний ширины полосы [мм]; $\Delta b i$ – нижняя граница диапазона [мм]; $s c m$ – допустимая серповидность (показатель искривленности полосы) [10 мкм/м]; $p l$ – предельная длина полосы [м], характеризует максимальную требуемую заказчиком длину полосы (устанавливается не всегда); h_r, b_r, l_r – нормативные толщина, ширина и длина полосы. На основании приведенных рассуждений были формализованы постановки задачи автоматизированного расчета технологических режимов прокатки клетки, стана в целом (на один техно-

логический цикл) и всей партии полос:

- для заданных условий прокатки в клети, выбрать такой режим ее работы, который позволит на выходе из нее максимально уменьшить искажения полосы (в сравнении с предыдущим циклом).
- по заданным начальным условиям прокатки (в виде характеристик раската), выбрать такой режим работы стана, при котором значение объема обрезки полосы будет минимальным.
- при определенных очередью раскатов условиях изготовления партии полос, обеспечить достижение нормативного объема (при соблюдении требуемых показателей качества полосы) обрезки за минимальное количество технологических циклов, реализуя процесс последовательной коррекции режима работы стана.

Последовательное решение поставленных задач лежит в основе принципов разработки АСУТП прокатки.

Третий раздел посвящен разработке методов и системы оперативного контроля локальных искажений полосы в процессе ее деформации. На основании разработанных методов сформировано пространство состояний \overline{SC} прокатываемой полосы.

При разработке системы оперативного контроля локальных искажений полосы была определены ее структура; подобраны типы измерителей, используемых для фиксации соответствующих геометрических характеристик. С использованием выбранных датчиков составлены комплексы межклетевого измерения геометрической формы полосы, установленные в межклетевых пролетах, что позволило фиксировать характеристики деформации полосы напрямую на выходе из каждой клети. Каждый межклетевой комплекс состоит из трех групп датчиков:

- $D_1 - D_{10}$ – лазерные измерители формы плоских граней, установленные в верхней и нижней частях приборной рамки в пяти "характерных" позициях (рис. 1), соответствующих пяти линиям оценивания искаженности полосы: центральной y_3 , левой y_1 и правой y_5

краевыми, левой y_2 и правой y_4 срединными; величина искажения полосы по этим линиям определяет характер искажения плоских граней ($hb(y,z)$ и $ht(y,z)$) по всей полосе.

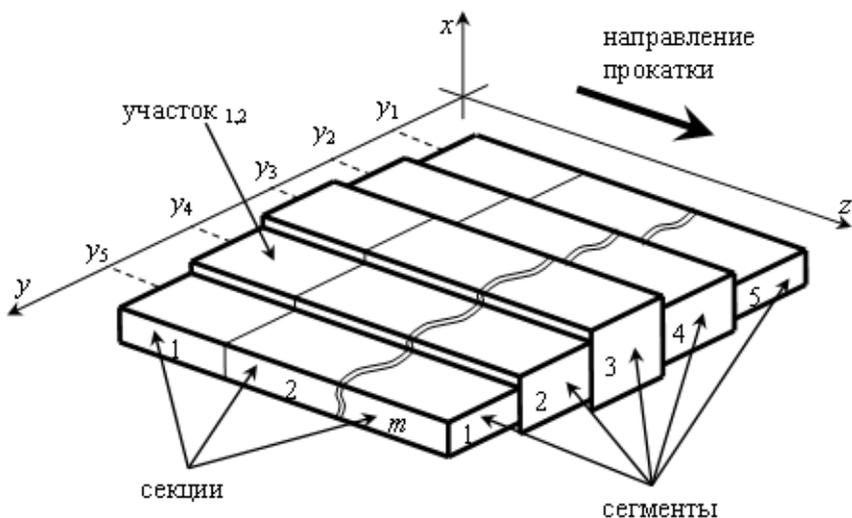


Рис. 1. Принцип пространственной декомпозиции образа полосы

- $D_{11} - D_{12}$ – оптико-электронные измерители формы боковых граней (кромки), установленные в верхней части приборной рамки в позициях, соответствующих нормативным координатам кромки полосы; позволяют фиксировать фактические координаты кромки ($br(z)$ и $bl(z)$).
- D_0 – лазерный доплеровский измеритель скорости движения центральной линии полосы в каждой ее точке, позволяя тем самым фиксировать локальные искажения удлинения полосы.

На основании анализа метрологических аспектов работы межклеточных измерительных комплексов определены размерности, шкалы и диапазоны проводимых геометрических измерений. Это позволило сформировать пространственно-временную схему фиксации формы по-

лосы, соответствующей выражению (10). Для оперативного оценивания локальных искажений полосы был предложен принцип декомпозиции множества координат полосы на участки в соответствии с рис. 1.

Размеры участков определяются исходя из анализа формы полосы, ее искривленности по каждой из "характерных" позиций $y_1 - y_5$. При сопоставлении нормативных размеров полосы с фактическими (измеренными) по каждому участку рассчитываются оценки искаженности полосы. Для оценивания искаженности плоских граней используются пять векторов стандартных оценок: неплоскостности (14),

$$\overline{fl}_i = (fl_{i1}, fl_{i2}, fl_{i3}, fl_{i4}, fl_{i5}), \quad (14)$$

выпуклости (15),

$$\overline{fh}_i = (fh_{i1}, fh_{i2}, fh_{i3}, fh_{i4}, fh_{i5}), \quad (15)$$

асимметрии (16),

$$\overline{fx}_i = (fx_{i1}, fx_{i2}, fx_{i3}, fx_{i4}, fx_{i5}), \quad (16)$$

погрешности оценивания выпуклости (17),

$$\overline{dhi} = (D_i(h_1), D_i(h_2), D_i(h_2), D_i(h_3), D_i(h_4), D_i(h_5)), \quad (17)$$

и погрешности оценивания асимметрии (18).

$$\overline{dxi} = (D_i(cx_1), D_i(cx_2), D_i(cx_2), D_i(cx_3), D_i(cx_4), D_i(cx_5)) \quad (18)$$

где i – номер секции. Для определения погрешностей оценивания используются дисперсии значений толщины h и координаты центральной оси sx по всей длине участка. Размерности векторов определены исходя из принципа декомпозиции множества координат полосы. Аналогично, пятью оценками фиксируется искаженность кромки секции:

$$bf_i = (cm_i, fb_i, fy_i, D_i(b), D_i(cy)) \quad (19)$$

где cm_i – серповидность, fb_i – поперечная раскатка, fy_i – поперечная асимметрия, $D_i(b)$ – погрешность оценивания раскатки, $D_i(cy)$ – погрешность оценивания поперечной асимметрии. Характеристики перечисленных оценок приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики оценок

оценка	обозн.	шаг	диапазон	
			a	b
неплоскостность, мкм/м	f_{ij}	10	0	6000
выпуклость, мкм	fh_{ij}	10	-100	100
асимметрия, мкм	fx_{ij}	10	-100	100
погреш. оценивания выпуклости, мкм	$D(h_j)$	10	0	100
погреш. оценивания асимметрии, мкм	$D(x_j)$	10	0	100
серповидность, мкм/м	cm_i	50	0	6000
поп. раскатка, мкм	fb_i	50	$-1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
поп. асимметрия, мкм	fy_i	50	$-1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
погреш. оценивания поп. раскатки, мкм	$D(b)$	50	0	$1 \cdot 10^5$
погреш. оценивания поп. асимметрии, мкм	$D(y)$	50	0	$1 \cdot 10^5$

С учетом представленных оценок, полный набор характеристик деформации секции имеет вид:

$$sc_i = \langle \overline{fl}_i, \overline{fh}_i, \overline{fx}_i, \overline{dh}_i, \overline{dx}_i, bf_i \rangle \quad (20)$$

С использованием набора sc фиксируется состояние деформируемой секции. Совокупность состояний секций определяет A_k – состояние полосы в целом, (21).

$$A_k = \bigcup_{i=1}^m sc_i \quad (21)$$

где m – количество секций.

Предложенная схема закрепления состояний позволяет сформировать пространство состояний секций (и полосы в целом):

$$\overline{SC} = \overline{FL} \cup \overline{FH} \cup \overline{FX} \cup \overline{DH} \cup \overline{DX} \cup \overline{BF}, \quad (22)$$

состоящее из характеристических подпространств: \overline{FL} – плоскостности, \overline{FH} – выпуклости, \overline{FX} – асимметрии, \overline{DH} – погрешности оценивания выпуклости, \overline{DX} – погрешности оценивания асимметрии, \overline{BF} – кромки.

Каждое из подпространств содержит множество всех возможных значений соответствующего вектора. Таким образом, любое состояние секции – есть элемент множества $\overline{SC} : \forall sc_i \Rightarrow sc_i \in \overline{SC}$.

В четвертом разделе, на основании предложенной системы характеристических подпространств определены принципы: учета изменяющихся характеристик прокатки, рационального выбора режимов; разработаны подсистемы и алгоритмы АСУТП прокатки, реализующие данные принципы.

При формализации пространства состояний \overline{SC} , каждому набору оценок sc_i вида (20) ставится в соответствие набор точек S_i вида (23).

$$S_i = (x_{1i}, x_{2i} \dots x_{6i}), \forall S_i \in \overline{SC}, \quad (23)$$

где каждая точка x_{ui} принадлежит u -му подпространству из (22). Для описания состояния всей полосы $A_k(q)$, наборы точек S_i объединяются по всем секциям аналогично (21).

На основании предложенного принципа организации пространства состояний полосы, ее прокатка рассматривается как последовательное преобразование состояний каждой секции $S_i(k)$ исходя из заданного режима прокатки RR_k :

$$\forall i = \overline{1, m} : S_i(k-1) \xrightarrow{RR_k} S_i(k), \quad (24)$$

где k – номер состояния в цепи преобразований (номер клетки). При решении задачи последовательного улучшения качества работы стана, режимы прокатки содержат наборы заданий для корректирующих воздействий на клеть:

$$RR_k(q) = (\Delta g_k(q), tls_k(q), bls_k(q), tts_k(q), bts_k(q)), \quad (25)$$

где: $\Delta g_k(q)$ - компенсатор раствора [мкм]; $tls_k(q)$ - продольное смещение верхнего рабочего вала [мм]; $bls_k(q)$ - продольное смещение нижнего рабочего вала [мм]; $tts_k(q)$ - поперечное смещение верхнего рабочего вала [мм]; $bts_k(q)$ - поперечное смещение нижнего рабочего вала [мм].

В соответствии с принципами организации технологического про-

цесса, все используемые режимы работы клетей хранятся в базе данных режимов прокатки \overline{RR} . Так что $\forall RR_k(q) : RR_k(q) \in \overline{RR}$.

Учитывая инерционную природу процессов деформации, при управлении прокаткой предложено использовать классы состояний $C_{\gamma(k)}$, соответствующие области рассеивания характеристик полосы:

$$C_{\gamma(k-1)} \xrightarrow{RR_k} C_{\gamma(k)} \quad (25)$$

где $\gamma(u, k-1)$ – индекс класса до деформации в k -й клетей, $\gamma(u, k)$ – индекс класса после деформации. Каждый класс характеризует однородные состояния полосы, и задан в системе из шести подпространств как пары:

$$C_{\gamma(k)} = ((x_{\gamma(1,k)}^*, \varsigma_{\gamma(1,k)}) \text{K} (x_{\gamma(6,k)}^*, \varsigma_{\gamma(6,k)})), \quad (26)$$

где $x_{\gamma(1,k)}^* \dots x_{\gamma(6,k)}^*$ – эталоны класса в каждом из подпространств, $\varsigma_{\gamma(1,k)} \dots \varsigma_{\gamma(6,k)}$ – радиусы рассеивания точек состояния в классе по каждому из подпространств.

Для реализации предложенного принципа описания процесса прокатки составлена вероятностная модель преобразований в пространстве состояний, основанная на методе ассоциативных связей. Согласно данному методу, каждой комбинации – пара классов состояний $C_{\gamma(k-1)}$ и $C_{\gamma(k)}$ (до и после прокатки в клетей) и режим работы клетей RR_k – соответствует набор a_η вида:

$$a_\eta = (\pi_\eta, \gamma(k-1), \gamma(k), v), \quad (27)$$

где η – индекс связи, π_η – весовой коэффициент связи, характеризующий эффективность использования режима $RR_k(v)$ при управлении прокаткой в текущих условиях (характеризуемых классами состояний $C_{\gamma(k-1)}$ и $C_{\gamma(k)}$), v – индекс хранения в базе \overline{RR} используемого режима, $\gamma(k-1)$ и $\gamma(k)$ – наборы индексов для классов состояний по каждому подпространству. Тогда модель прокатки – есть множество ассоциативных связей \overline{AC} , (28), описывающее все ситуации, возникавшие при управлении прокаткой на стане.

$$\overline{AC} = \sum_{\eta=1}^N a_{\eta} \quad (28)$$

где N – общее количество ассоциативных связей. Для формирования системы \overline{AC} используется принцип динамического стереотипа. В соответствии с этим принципом, в процессе прокатки характеристики классов выступают в качестве настраиваемых параметров модели B . Набор параметров дополняется системой приоритетов оператора P , содержащей ранжированный список связей, удовлетворяющих текущим условиям прокатки. С использованием предложенной модели разработан алгоритм идентификации процесса прокатки, подчиненный решению задачи минимизации обреза, реализованной в подсистемах АСУТП прокатки на трех уровнях:

- гармонизированный выбор режимов прокатки по клетям (рис. 2).
- рациональный выбор режимов прокатки по стану в целом (рис. 3).
- адаптация режимов при управлении от цикла к циклу (рис. 4).

где: БДП – блок декомпозиции параметров модели, БПР – блок поиска режимов, БМ – блок моделирования, БКР – блок композиции режимов, БИ – блок идентификации, БПН – блок параметрической настройки, БРОО – блок расчета объема обреза, ПВР – подсистема рационального выбора режимов, ПДР – подсистема декомпозиции режимов (на клетки), БДР – база данных для хранения режимов, САР – система адаптации режимов (основной элемент АСУТП).

Программная реализация подсистем среднего и нижнего уровней позволила получить численные оценки качества работы предложенной АСУТП прокатки. В ходе численных исследований полученных результатов были определены: среднее время выбора режима прокатки (92 сек, для полосы разделенной на 25 секций) среднее количество технологических циклов, за которое достигается установленное значение объема обреза (9 циклов). При анализе показателей объема обреза, получаемых до и после установки системы, было выявлено уменьшение объема обреза в среднем на 6,4 % для партии полос с экономическим эффектом 18000 у.е.

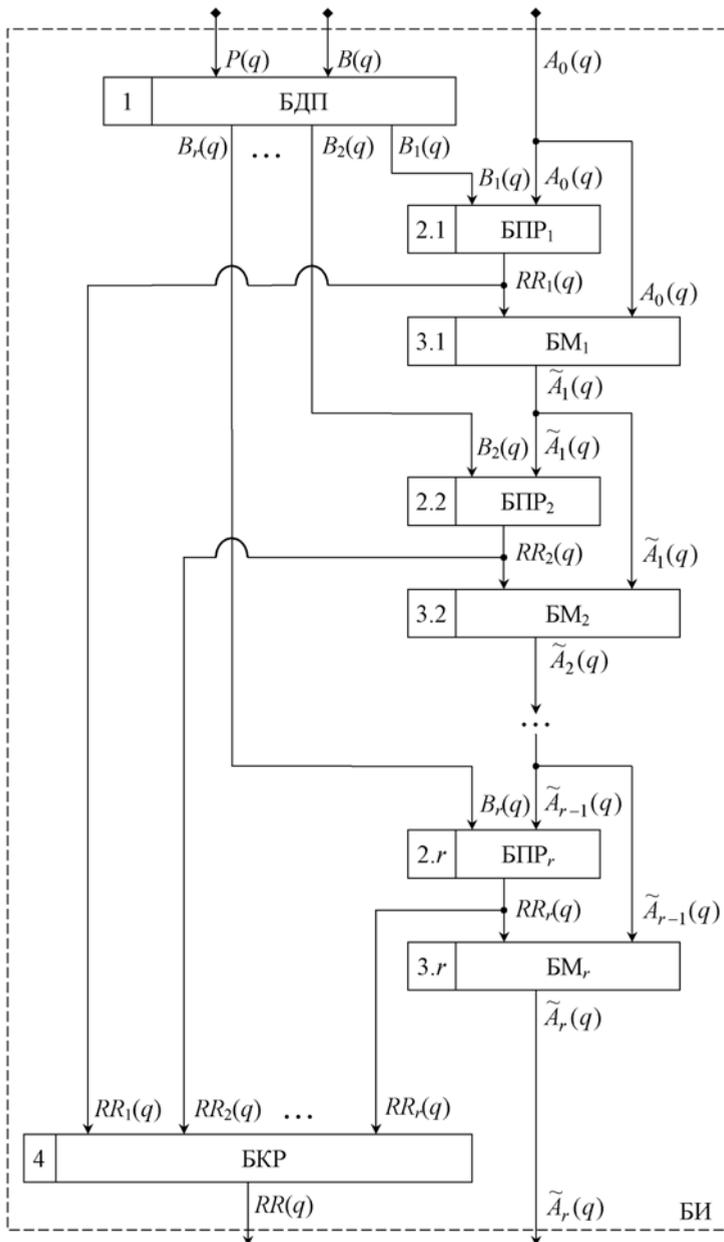


Рис. 2. Каскадная схема идентификации процесса прокатки

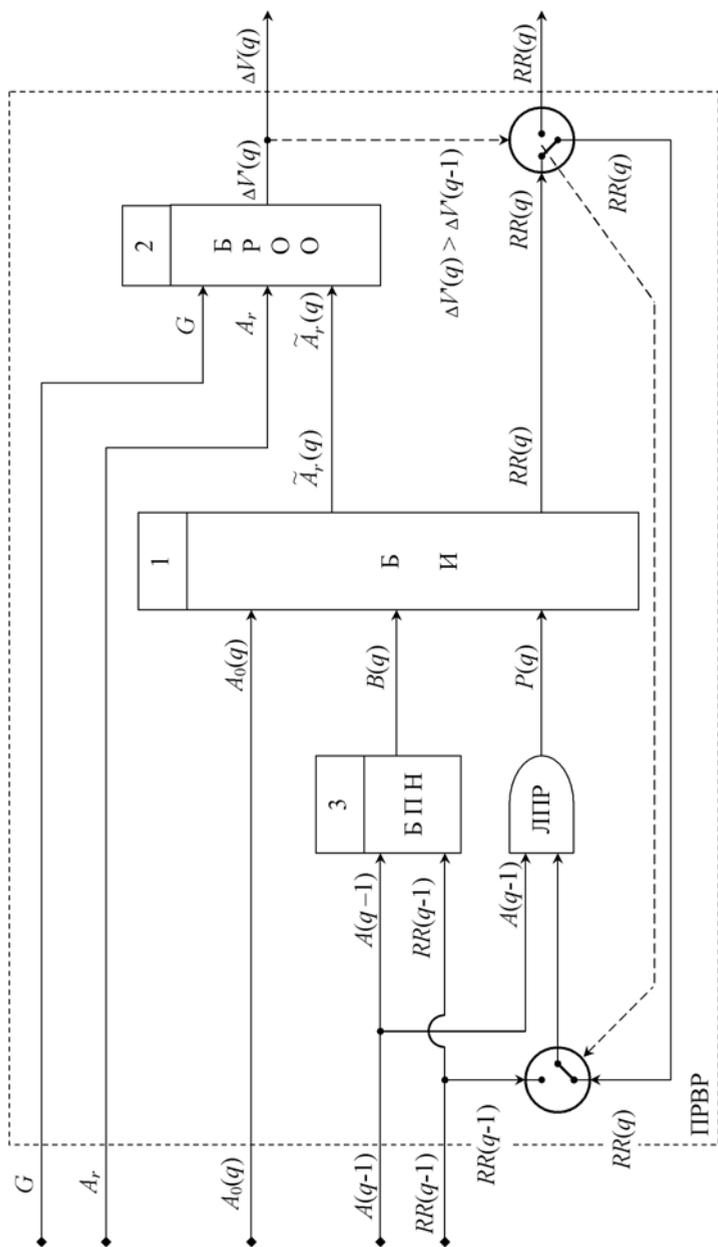


Рис. 3. Схема выбора режимов работы станa

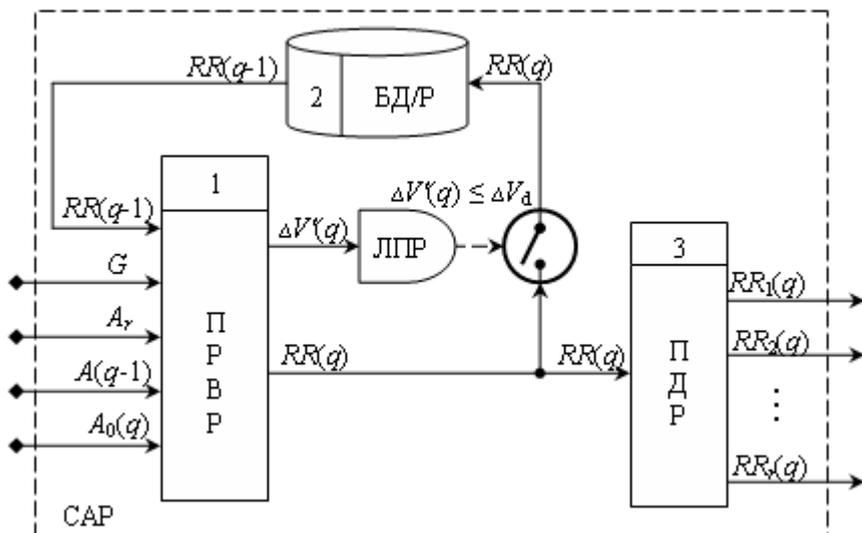


Рис. 4. Схема адаптации работы стана

Основные результаты и выводы

В представленной диссертации разработаны функциональные схемы, алгоритмы и специальное программное обеспечение, которые были использованы при реализации автоматизированной системы управления технологическим процессом прокатки медных полос, обеспечивающей снижение массы обрезки с получением требуемых показателей качества готового проката.

Получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведено исследование современного состояния автоматизации прокатного производства, позволившее выявить существующие недостатки систем, и подтвердить актуальность задачи разработки АСУТП прокатки, обеспечивающей снижение массы обрезки при соблюдении заданных показателей качества готового проката.

2. Изучены и формализованы закономерности влияния нестационарности характеристик прокатного оборудования на качественные показатели прокатанной полосы; определены основные показатели деформации; выявлены закономерности возникновения локальных искажений и их влияние на геометрические характеристики полосы; формализованы взаимосвязи между характеристиками прокатки и значениями объема обрезки, что позволило формализовать постановку задачи разработки адаптивной АСУТП прокатки рулонной медной полосы.
3. Разработаны методы и алгоритмы оперативного контроля локальных искажений полосы при ее деформации в процессе прокатки. Создана система комплексного измерения геометрических характеристик полосы в ритме с процессом прокатки; определены принципы оценивания локальных искажений полосы и составлены наборы оценок, характеризующие состояние полосы. На их основании сформировано пространство состояний полосы; определена схема фиксации составленных наборов характеристик прокатки, что позволило использовать для решения поставленной задачи метод следящей идентификации параметров системы с элементами интеллектуальности.
4. Определены принципы коррекции (улучшения) технологических режимов прокатки полосы (от цикла к циклу) на основании структурированной информации о реализованных режимах прокатки; разработаны методы рационального выбора режимов прокатки, реализующие процедуру идентификации системы с использованием прогрессивных информационных технологий (ассоциативные связи и динамический стереотип).
5. Разработаны функциональные схемы АСУТП прокатки, реализующие задачу минимизации объема обрезки на трех уровнях: гармонизированный выбор режимов прокатки по клетям, рациональный выбор режимов прокатки по стану в целом, адаптация работы

стана при управлении прокаткой от цикла к циклу. Разработаны алгоритмы функционирования АСУТП прокатки, позволившие решить поставленную задачу с использованием современных средств вычислительной техники.

6. Впервые разработан программный комплекс, состоящий из блоков численного расчета объема обрезки, системы управления базой данных (для хранения режимов), системы управления базой данных ассоциативных связей, реализующей алгоритмы ассоциативного моделирования и интеллектуализированной следящей идентификации, а также алгоритм параметрической настройки моделей.
7. Проведена проверка адекватности моделей и численный анализ работы системы, в ходе которого были определены качественные показатели работы системы. Использование разработанной системы позволило уменьшить объем обрезки в среднем на 6,4 % для партии полос, что подтверждено соответствующим актом опытно-промышленных испытаний.

Основные публикации по теме диссертации

1. Разработка модели размещения изображений в базах данных / Газимов Р.Т. // Радиоэлектроника и информатика. 2004. № 3. сс. 99-103.
2. Синтез структуры системы рационального размещения и поиска изображений / Криводубский О.А., Газимов Р.Т. // Искусственный интеллект. 2004. №4. сс. 511-520.
3. Задачи рационального управления банками изображений / Газимов Р.Т. // Труды международной конференция "Вопросы оптимизации вычислений (ВОВ-XXXII), посвященной памяти академика В.С. Михалевича. Киев: Институт кибернетики В.М. Глушкова НАН Украины, 2005. с. 55.
4. Разработка обобщенной информационной модели технологического процесса листового проката / Газимов Р.Т. // Искусственный ин-

теллект. 2005. № 3. сс. 356-359.

5. Система R-отношений для реализации ассоциативных связей в задаче оперативного управления технологическими процессами / Газимов Р.Т. // Нейроинформатика и системы ассоциативной памяти. Материалы Международной научной молодежной школы. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. сс. 217-221.
6. Принципы оперативного ассоциативного управления технологическими процессами / Газимов Р.Т. // Интеллектуальные и многопроцессорные системы-2005. Материалы Международной научной конференции. Т.3. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. сс. 99-102
7. Принцип управления прокаткой полосы на основании частных оценок ее качества / Криводубский О.А., Газимов Р.Т. // Моделирование, идентификация, синтез систем управления: Труды девятой международной научно-технической конференции. – Донецк: Изд. Института прикладной математики и механики НАН Украины, 2006. с. 16.
8. Итеративное управление процессом прокатки/ Газимов Р. Т. // "XXXIII Гагаринские чтения" Научные труды международной молодежной научной конференции в 8 томах. М.: МАТИ, 2007. Т.1, сс. 211-213.
9. Мультипозиционное оценивание качества медной полосы при автоматическом управлении процессом прокатки / Салихов З.Г., Криводубский О.А., Газимов Р.Т.// Изв. ВУЗов. Цветная Металлургия. 2007. № 6. сс. 68-78.

Соискатель



Р.Т. Газимов