

05 3.0
0- 31

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ОЛЕВСКИЙ АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ
ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ МЯГКОСОРТНЫМ
СТАНОМ (НМС)

Специальность 05.13.07 - "Автоматическое управление,
регулирование, управление технологическими процессами
(промышленность)"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1981

Работа выполнена на Челябинском ордена Трудового Красного Знамени и ордена Октябрьской Революции металлургическом заводе.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР доктор технических наук, профессор Черноруцкий Г.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук профессор Цыганков В.А.,
кандидат технических наук доцент Егоров В.С.

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургического машино - строения (ВИИМЕТМАШ).

Защита состоится II марта 1981 года, в 10 часов, на заседании специализированного совета К.053.13.04 в Челябинском политехническом институте: аудитория 244 (454044, Челябинск, 44 проспект им. В.И.Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " _ " _____ 1981 г.

Ученый секретарь специализированного совета *В.С.Жабреев* В.С.Жабреев



Общая характеристика работы

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Материалы партийных съездов, постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР постоянно указывают на необходимость интенсификации металлургического производства в том числе и прокатного. В диссертационной работе выполнены исследования, разработка и внедрение в производство ряда взаимосвязанных адаптивных автоматических систем, увеличивающих производительность мелкосортного прокатного стана.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Разработка и внедрение систем оптимального управления непрерывным мелкосортным станом. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: 1) формализация функционирования выходной части стана и разработка алгоритмов управления скоростью прокатки; 2) разработка имитационной модели стана и исследование эффективных алгоритмов раскря; 3) разработка САУ процессами транспортировки прутков, летучими ножницами, тормозным механизмом, рациональным раскряем; 4) разработка алгоритмов и синтез системы автоматического определения теоретического веса и среднего сечения проката; 5) внедрение и определение эксплуатационных характеристик и эффективности разработанных САУ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. 1. Выполнена идентификация закона движения прутков при разгоне и конечного их положения при торможении. Поставлена и решена задача настройки скоростей транспортировки и прокатки на предельно допустимые значения по условиям передачи прутков на холодильник. Определены ограничения накладываемые на работу тормозного механизма. 2. Выполнено исследование эффективности способов рационального раскря на летучих ножницах с помощью имитационно-математической модели ММС при оптимальном раскря на товарные длины методом Нелдера и Мида по интегральному экономическому критерию. 3. Разработаны принципы, способы и устройства выполнения арифметических операций с число-импульсными кодами, положенные в основу синтеза цифровых автоматов. Новизна и актуальность технических решений защищены II авторскими свидетельствами.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Разработаны адаптивные цифровые системы: 1. Равномерного раскря проката на летучих ножницах с прогнозом длины по принципу равенства коэффициента вытяжки для двух смежных заготовок, 2. управления летучими ножницами по принципу программно-временного автомата, 3. настройки стана на предельную скорость прокатки при любых фактических коэффициентах трения при разгоне и торможении прутков, 4. управления перекладкой прутков на холодильник

с блоками защиты от загибов передних и задних концов проката на входе холодильника. Разработана система автоматического определения теоретического веса товарных пакетов сортового проката в потоке НМС и контроля среднего фактического сечения.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. По два комплекта всех перечисленных систем внедрены на НМС 250-I, кроме того САУ рациональным раскромом внедрены на НМС 300-I Челябинского металлургического завода в период с 1973 по 1979 гг. и находятся в промышленной эксплуатации. По запросам институтов и заводов информация и технические отчеты по системам разосланы 14 предприятиям страны.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. Экономический эффект от внедрения устройств оптимального управления непрерывным мелкосортным станом только по используемому на стане 250-I ЧМЗ авторским свидетельствам составил 1,24 млн.руб./год.

ПУБЛИКАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основное содержание работы опубликовано в 21 печатной работе. Материалы диссертации доложены: на IV международной конференции стран-членов СЭВ и СФРЮ по автоматизации производственных процессов и управления в черной металлургии (г.Запорожье, 1971г.); на VI международной конференции стран-членов СЭВ и СФРЮ по автоматизации производственных процессов и управлению в черной металлургии (г.Будапешт, 1979г.); в всесоюзной межзаводской школе "Обобщение опыта внедрения и эксплуатации средств и систем автоматизации на предприятиях черной металлургии (г.Челябинск, 1974г.); на всесоюзном научно-техническом совещании "Опыт разработки и внедрения АСУ прокатными станами (г.Киев, 1979г.); на всесоюзной конференции "АСУ ТП в черной металлургии (прокатное производство)" (г.Челябинск, 1976г.); на семинаре "Повышение точности прокатки и экономии металла в прокатном производстве (г.Челябинск, 1977г.); на VI областной научно-технической конференции молодых специалистов и ученых предприятий и организаций черной металлургии (г.Златоуст, 1979г.); на XXXI научно-технической конференции Челябинского политехнического института им.Ленинского комсомола (г.Челябинск, 1978г.). Работы по экономии черных металлов на НМС 250-I отражены в цветном короткометражном научно-популярном фильме "Челябинский вариант", народной киностудии ЧМЗ - фильм.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (156 наименований, приложений, изложена на 154 страницах машинописного текста с 17 таблицами в тексте, иллюстрирована 31 рисунком. Приложение 3 на 78 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. НМС является высокопроизводительными поточными линиями, обеспечивающими народное хозяйство широкой номенклатурой металлопроката. Наиболее совершенными и распространенными в отечественной металлургии являются НМС 250, автоматизации которых посвящена настоящая диссертация. Повышение качества проката и производительности НМС приносит большой народнохозяйственный эффект, поэтому этим вопросам посвящены значительные работы ведущих НИИ и ВУЗов, таких как: ИИИМЕТМАШ, Челябинский, Донецкий и Ждановский политехнические институты, ДМЕТИ, БНИИЧермет, НИИЧермет, ИЧМ, КИА, ОПП Уралчерметавтоматика. Однако большинство этих работ до последнего времени носило локальный характер. Наиболее эффективно комплексное решение проблем автоматизации. Обзор АСУ ТП НМС, приведенный в работе, показывает ведущее место задач управления механизмами выходной части стана в функциях ЭВМ. В тоже время ни в одной из известных АСУ ТП НМС не ставилась целевая функция настройки стана на предельную, технически обоснованную скорость прокатки. Как известно из работ Григорьева В.К., Уткина Г.С. возможности НМС 250 недоиспользуются по мощности нагревательных средств и нагрузке главных приводов, причем производительность на трудоёмких профилях определяется только возможностями передачи проката на холодильник. Для решения этой задачи диссертационная работа посвящена вопросам координационного управления механизмами выходной части стана. Использование в отечественной и зарубежной практике ряда конкурирующих способов раскроя (равномерный раскрой, раскрой на крат, раскрой по установке) и противоречивость оценки их эффективности в литературе свидетельствуют о необходимости совершенствования способов раскроя и методов исследования их эффективности. При управлении двухбарабанными летучими ножницами, команды на сведение и разведение ножей должны формироваться при их определенном угловом положении, функционально связанным со скоростью прокатки. Нарушение этой зависимости вызывает аварийные ситуации и брак по прокату. Задачей транспортировки является создание разрывов между торцами смежных прутков. Необходимая величина разрывов определяется конструкцией тормозных механизмов и точностью управления ими. С ростом величины разрывов облегчаются условия передачи прутков на холодильник, но увеличивается путь их торможения, и быстро наступает предел допустимой скорости прокатки. САУ и САР величины разрыва не существует. Задачей управления перекладкой проката на холодильник является

определение момента включения тормозного механизма с целью исключения аварийных ситуаций на входе холодильника. На отечественных НМС наибольшее распространение получил способ включения тормозного механизма от реза летучих ножниц с регулируемой оператором выдержкой времени. Из зарубежной практики известен способ включения тормозного механизма от величины пути прутка. Известны работы Егорова В.С., Стахно В.И. по совершенствованию способа временного управления. Однако все известные САУ имеют общий недостаток - настройку управления тормозным механизмом методом "проб и ошибок", что сопряжено с потерями проката и простоями стана.

2. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ НАСТРОЙКИ СТАНА НА ПРЕДЕЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ПРОКАТКИ. Управление величиной разрыва между торцами смежных прутков и прогнозирование конечного их положения после торможения требует знания законов разгона и торможения проката. Идентификация законов движения выполнялась по данным статистического исследования, включавшего контроль времени прохождения задним торцом прутков участков пути известной длины в районах разгона и торможения.

Экспериментальные исследования выявили, что закон разгона прутков на выходе стана с достаточной для решения поставленной задачи точностью описывается уравнением, полученным на основе принципа Д Аламбера,

$$\frac{dV(t)}{dt} = \rho [V_p - V(t)]; \quad (1)$$

решение (1) дает: $V(t) = V_p - (V_p - V_n) e^{-\rho t}; \quad (2)$

$$S(t) = V_p t + \frac{1}{\rho} (V_p - V_n)(e^{-\rho t} - 1), \quad (3)$$

где $\rho = g \mu_p$, μ_p - коэффициент трения при разгоне, $V(t)$, $S(t)$ - скорость и путь прутка, V_p, V_n - скорость рольганга, прокатки.

Неизвестные параметры ρ и V_p определялись решением системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} V_p T_0 + \frac{1}{\rho} (V_p - V_n)(e^{-\rho T_0} - 1) &= S_0 \\ V_p T_1 + \frac{1}{\rho} (V_p - V_n)(e^{-\rho T_1} - 1) &= S_1 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где T_i - время движения на известном участке S_i . Проверка точности идентификации осуществлялась по дополнительной точке исследования $\Delta = S_2 - S_2(T_2)$. Погрешность составила 0,16%. Идентификация закона торможения по априорным моделям равнозамедленного и экспоненциального движения дала неудовлетворительные результаты. Поэтому конечное положение прутков было рассмотрено как многомерная безинерционная модель

$$M\{S_i | V_p, a\} = b_0 + b_1 V_p + b_2 a, \quad (5)$$

где b_i , $i=0,1,2$ - коэффициенты множественной регрессии, определя-

лись методом наименьших квадратов, a - ускорение замедления. Коэффициент множественной корреляции $R_{S_t | V_p, a} = 0,806$. Остаточная дисперсия, связанная с влиянием всех неучтенных факторов составила $M\{D\{S_t | V_p, a\}\} = 0,865$. Точность прогноза конечного положения прутков S_t по контрольной матрице наблюдений, не использовавшейся при определении \hat{b}_i : $M\{S_t'\} = -0,809m$, $G\{S_t'\} = 0,8m$ удовлетворяет требованиям настройки стана на предельную скорость прокатки.

Из осциллограмм подъема тормозных клапанов и графиков движения прутков определены аварийные границы по загибу заднего и переднего концов прутков на входе холодильника

$$\left. \begin{aligned} S(t) &\geq S_p - \tau_1 V(t) \approx S_p - \tau_1 V_p, \\ S_n &< S_p - \tau_2 V_n, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где S_p - участок разгона (от реза - до начала торможения), S_n - путь переднего торца следующего прутка, τ_1, τ_2 - время от выдачи команды на торможение до подъема клапанов на высоту - начала торможения, - образования канала скольжения для следующего прутка. Это значит, что команда на выключение тормозного механизма должна лежать в интервале

$$\text{где } T_{c\delta \max} > T_{c\delta} \geq T_{c\delta \min}, \quad (7)$$

где $T_{c\delta \max} = \frac{S_p - \tau_2 V_n}{V_n}$, $T_{c\delta \min}$ можно получить решением уравнения

$$S_p - \tau_1 V_p = V_p T_{c\delta \min} + \frac{1}{\rho} (V_p - V_n) (e^{-\rho T_{c\delta \min}} - 1).$$

Интервал (7) для различных профилей и соотношений скорости прокатки и транспортировки составляет $0,12 \pm 0,4$ сек. Так как всякая попытка повысить скорость прокатки, требует изменения V_p и $V_{c\delta}$, то она сопряжена с потерями металла и простоями стана, поэтому при ручном управлении процессами повышение производительности выше некоторого эмпирически устанавливаемого предела становится нерентабельным.

Предельную скорость роллганга можно определить из конструктивных размеров стана

$$L_k - S_T - \ell_{n \max} = \varepsilon, \quad (8)$$

где L_k - размер стана от оси летучих ножиц до ограждения за холодильником, S_T из (5), $\ell_{n \max}$ - максимальная длина прутка, определяемая алгоритмом рационального раскроя, ε - запас на случайные выбросы параметров движения прутков.

С учетом (5)

$$V_{p \max} = \frac{L_k - \hat{b}_0 - \hat{b}_2 a - \ell_{n \max} - \varepsilon}{\hat{b}_1}. \quad (9)$$

В момент выдачи команды на включение тормозного механизма минимальный временной разрыв между смежными торцами прутков должен быть равен τ_2 :

$$\frac{S_{c\delta}(t) - S_n = \tau_2 V_n^*,}{V_p T_{c\delta} + \frac{1}{\beta} (V_p - V_n^*) (e^{-\rho T_{c\delta}} - 1) - V_n^* T_{c\delta}} = \tau_2, \quad (10)$$

где V_n^* - максимальная скорость прокатки для заданного значения V_p . После простых преобразований абсолютно максимальная скорость прокатки с учетом (9) равна

$$V_{nmax} = \frac{L_k - \beta_0 - \beta_2 a - l_{nmax} - \epsilon}{\beta_1} \cdot \frac{A}{A + \tau_2},$$

$$A = T_{c\delta} + \frac{1}{\beta} (e^{-\rho T_{c\delta}} - 1). \quad (11)$$

Минимальный коэффициент обгона скорости роллганга над скоростью прокатки

$$K = \frac{V_{pmax}}{V_{nmax}} = 1 + \frac{\tau_2}{A}. \quad (12)$$

Для случая выравнивания передних торцов проката аналогичные рассуждения дают

$$V_{nmax} = \frac{L_k - \beta_0 - \beta_2 a - l_{nmax} - \epsilon}{\beta_1} \cdot \frac{A}{A + \tau_2} - \frac{(L_{max} - L_{min}) \beta}{nA + \tau_2}, \quad (13)$$

где L_{max}, L_{min} - предельные значения длины заготовок, β - коэффициент вытяжки стана, n - число прутков из одной заготовки.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ САУ РАЦИОНАЛЬНЫМ РАСКРОЕМ ПРОКАТА НА НМС. Суммарная длина проката в пучке на выходе линии холодной резки (ЛХР) превращается в товарный прокат мерной, немерной длины и обрезь, имеющих свою стоимость $C_p = C_1 S_{1p} + C_2 S_{2p} + C_3 S_{3p}$, где C_p - стоимость пучка, отражающая качество двухстадийного раскroя; S_{1p}, S_{2p}, S_{3p} - соответственно длины "меры", "нормали" и обрезки в Q - см пучке; C_1, C_2, C_3 - стоимость 1т "меры", "нормали", обрезки.

$$Q = \frac{C_1 S_{1p} + C_2 S_{2p} + C_3 S_{3p}}{C_1 S_p}, \quad S_p = S_{1p} + S_{2p} + S_{3p}. \quad (14)$$

Критерий Q - оценка раскroя на реальном стане по отношению к идеальному, дающему 100% "меры". С целью выделения в чистом виде влияния раскroя на летучих ножницах необходимо оптимизировать раскroй на ЛХР. Пусть l_i - перемещение ножа гильотинных ножниц ЛХР на i - см реze пучка прутков. Тогда $L_o = [l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n]$ однозначно определяет качество порезки $Q = Q[L]$. Для решения задачи оптимизации при любом значении l_m , ее удобней формулировать

$$Q_{pz}^* = \max_x Q_{pz}(K),$$

$$K = [K_1, \dots, K_i, \dots, K_n]^T, \quad K_i = \frac{\ell_i}{\ell_n}, \quad 0 < K_i \leq \frac{\ell_{max}}{\ell_n}. \quad (15)$$

Вследствие скачкообразного изменения стоимости функция (14) имеет разрывы первого рода, и для решения (15) невозможно применение методов оптимизации, использующих производную. Из поисковых методов был применен поиск по деформируемому многограннику (метод Нелдера и Мида). Начальный многогранник выбирался в виде регулярного симплекса, имеющего вершину $K_0 = [K_{01}, K_{02}, \dots, K_{0n}]^T$ полученную по эвристическому алгоритму, имитирующему работу резчика линии холодной резки

$$K_{0i} = \begin{cases} \frac{D_F - E \left| \frac{D_F}{\ell_n} \right| \ell_{max}}{\ell_n} & \text{при } D_F > \ell_{max}, \\ \frac{D_F + \ell_{min}}{\ell_n} & \text{при } D_F < \ell_{min}, \\ \frac{\ell_{max}}{\ell_n} & \text{при } \ell_{min} < D \leq \ell_{max}, \end{cases} \quad (16)$$

где D_F - разброс передних концов проката $[M]$, ℓ_{max} , ℓ_{min} - максимальная и минимальная длина немерного прутка по ГОСТ, $\ell_{max} \geq 2\ell_{min}$.

Так как функция качества (14) оказалась мультилокальной, то с целью поиска глобального экстремума метод деформируемого многогранника был модернизирован в лаборатории АСУ ТП ЧМЗ. Основные принципы модернизации заключаются в следующем:

1. Вследствие свойства "многогранника" запоминать точки поиска с лучшими значениями функции, вершины многогранника должны находиться в областях притяжения этих экстремумов;

2. Выполнение п.1 возможно, если диаметр многогранника больше областей притяжения локальных экстремумов.

$$D = \frac{2}{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \|K_i - K_c\|,$$

где $K_i = [K_i^{(1)}, K_i^{(2)}, \dots, K_i^{(n)}]^T$ - i -ая вершина, K_c - центр тяжести всех вершин, n - размерность поиска. При этом на точки K_i накладывается ограничение

$$\|K_i - K_c\| \geq \frac{D^{(*)}}{4}.$$

$D^{(*)}$, $D^{(*)}$ - минимальный и максимальный диаметры многогранника.

Из топологии задачи $D^{(*)} = 0,3D^{(*)}$, $D^{(*)} = K_{max}$.

3. Для поддержания размеров многогранника

$$D^{(*)} \leq D_w \leq D^{(*)}, \quad W = 1, 2, \dots \quad (17)$$

до определенного шага поиска $W \leq N$ запрещаются операции "редукция" и "сжатие", а коэффициент отражения α подбирается из (17).

4. В процессе поиска при "неудачном" "отражении" осуществляется случайный поиск вокруг точки отражения до нахождения точки, значение функции в которой "лучше", чем в какой-то вершине многогранника, радиус случайного поиска ограничен $R \leq \frac{D^{(5)}}{\alpha}$.

Исследование эффективности различных типов раскроя выполнено на имитационной модели продвижения заготовок через НМС 250 применительно к стержневой арматурной стали класса А-III, № I2+22. Модель содержит блоки, имитирующие работу механизмов выходной части стана: измерителя длины раскатов, летучих ножиц, тормозного механизма, набор сменных моделей рационального раскроя, математические модели разгона и торможения прутка с настройкой скоростей транспортировки и прокатки на предельные значения по (9, II), блоки учета проката и оптимизации холодной резки. Входом модели является случайный дискретный процесс длин заготовок. Выходом - значение функции Q_{p2}^* (I4), где $Z = 6+I2$ м, $p = 1, 2, \dots, 10$. Рассмотрены модели раскроя:

1. равномерный (на графиках обозначен 2) $l^p = \frac{L_{3i} \cdot \gamma}{n}$; расчетная длина, приведенная к барабанам ножиц

$$\left. \begin{aligned} l_1^p &= \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{360} + m_1 \right) \frac{S_5}{\alpha} - l_0, \\ l_j^p &= \left(\frac{\varphi_j - \varphi_{j-1}}{360} + m_j \right) \frac{S_5}{\alpha}, \\ l_n^p &= L_{3i} \cdot \gamma - \sum_{j=1}^{n-1} l_j^p, \end{aligned} \right\} \quad (I8)$$

где l_1^p, l_j^p, l_n^p - расчетные длины первого, j -го, последнего прутков из i -ой заготовки; φ_0, φ_j - угловые положения ножей в момент начала отсчета длины первого и j -го прутков; m_1, m_j - число целых оборотов ножиц на первом и j -ым прутках; S_5, α - диаметр барабана и коэффициент обгона скорости ножей; l_0 - опережение начала отсчета первого прутка;

2. раскрой на крат (на графиках обозначен 3)

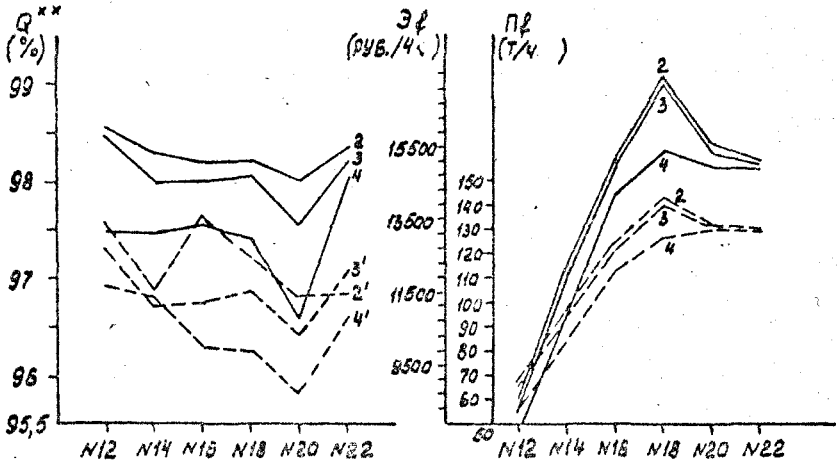
$$L_{3i} \gamma = n_1(C_1 l_m + \Delta l) + n_2(C_2 l_m + \Delta l) + (C_2 l_m + \Delta l + l_{ост}), \quad (I9)$$

где $n = n_1 + n_2 + 1$ - заданное число прутков из заготовки, C_1, C_2 - число "мер" в соответствующем прутке, Δl - припуск на длину каждого прутка, компенсирующий рассеяние при торможении.

3. раскрой по уставке (на графиках обозначен 4) $l^p = m_{уст} \cdot \frac{S_5}{\alpha}$,

где $m_{уст}$ - заданное число оборотов барабана ножиц. Длины последнего и первого прутков смежных заготовок определяются путем логического анализа в момент появления заднего торца заготовки на расстоянии l_0 до линии реза. Блок VII осуществляет для каждого варианта раскроя при каждой мере учет проката мерной, немерной длины и обрезки

по критериям исключающим применение ручного труда сортировщиц, определяет эффективность порезки (I4) для ручного и оптимального раскрыя на линии холодной резки (рис.1), вычисляет производительность /т/час/ и /руб/час/ (рис.2).



4. РАЗРАБОТКА АСУ ТП ВЫХОДНОЙ ЧАСТИ ИМС. В основу построения системы положен принцип "живучести" технических средств, предполагающий наличие максимального числа функционально самостоятельных САУ, при условии окупаемости каждой из них. Повышенная надежность локальных САУ должна обеспечиваться минимизацией аппаратных затрат, резервированием, автоматическим самоконтролем, повышенной ремонтоспособностью за счет средств профилактического контроля, диагностических программ и инструкций. Технологические параметры, подлежащие обработке в локальных САУ, изменяются в число-импульсной форме. При традиционном выполнении арифметических операций с параллельными кодами, необходимо использовать дополнительное оборудование для преобразования число-импульсного кода в параллельный и передачи последнего в процессор. При этом время измерения параметров равно времени прокатки заготовки, а время расчета управляющих воздействий - паузе между заготовками. Так как станы загружаются заготовками "стык в стык", то требуется высокое быстродействие процессоров при низком КПД их использования. С целью устранения этих недостатков при одновременном снижении аппаратных затрат в 3-4 раза разработаны способы и устройства выполнения арифметических операций с число-импульсными кодами в любой системе счисления.

Устройства число-импульсной арифметики предназначены для выполнения арифметических операций с двумя операндами, один из которых задан параллельным кодом, а другой поступает в число-импульсном.

Сложение:

$$K + Z = \begin{cases} K + \sum_{i=1}^z 1 & \text{при } K + Z < p, \\ K + \sum_{i=1}^z 1 - p & \text{при } K + Z > p, \end{cases}$$

где K - операнд, заданный параллельным кодом, Z - операнд, заданный число-импульсным кодом, p - полная емкость счетчика.

Вычитание: из числа $K = a_n \cdot 10^{n-1} + \dots + a_2 \cdot 10^1 + a_1 \cdot 10^0$ нужно вычесть число-импульсный код Z

$$A_i = 10^{n-1} [a_{n(i-1)} + 9 + \Pi_{(n-1)i}] + \dots + 10^1 [a_{2(i-1)} + 9 + \Pi_{1i}] + [a_{1(i-1)} + 9] = A_{i-1} + (p-1) = A_{i-1} - 1 \rightarrow p.$$

$$K - Z = K + \sum_{i=1}^z (p-1) = K - \sum_{i=1}^z 1 + \rightarrow \sum_{i=1}^z p,$$

где $\rightarrow p$ - переполнение счетчика, A_i - результат на i -м импульсе числа Z , a_{ij} - содержимое j -го разряда при i -м импульсе числа Z , $\Pi_{(j-1)i}$ - перенос из $(j-1)$ -го разряда на i -м импульсе Z . Вычитание 1 осуществляется путем одновременного число-импульсного занесения во все разряды числа "К" 9 импульсов.

Умножение:

$$A_i = A_{i-1} + K = 10^{n-1} [a_{n(i-1)} + a_n + \Pi_{(n-1)i}] + \dots + 10 [a_{2(i-1)} + a_2 + \Pi_{1i}] + [a_{1(i-1)} + a_1] \\ K \cdot Z = \sum_{i=1}^z K.$$

Произведение формируется путем суммирования в каждую декаду выходного счетчика соответствующего разряда числа K на каждый импульс Z .

Деление: число-импульсный код Z нужно разделить на параллельный код K . Нормализуем "К" к виду $K = A, a_1, a_2, \dots, a_n$, где $A = 0,9$ - одноразрядное целое число, a_i - дробный разряд. Деление осуществляется на целое число A . Избыточность частного периодически компенсируется. При каждом приращении частного на 10 ошибка составляет a_i импульсов делителя Z , при приращении частного на 10^2 дополнительная ошибка равна a_2 импульсов и т.д. При делении на трехразрядный делитель устройство должно разлагать число-импульсный код Z по алгоритму:

$$Z = \sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{Z}{Aa_1a_2}]}{[Aa_1a_2]} [(10A + a_1)10 + a_2] + \sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{R_1}{Aa_1}]}{[Aa_1]} [10A + a_1] + \sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{R_2}{A}]}{[A]} A + R_3 = \\ = \underbrace{\sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{Z}{Aa_1a_2}]}{[Aa_1a_2]} 100A + \sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{R_1}{Aa_1}]}{[Aa_1]} 10A + \sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{R_2}{A}]}{[A]} A}_{\text{I}} + \underbrace{\sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{Z}{Aa_1a_2}]}{[Aa_1a_2]} (10a_1 + a_2)}_{\text{II}} + \underbrace{\sum_{i=1}^z \frac{E[\frac{R_1}{Aa_1}]}{[Aa_1]} a_1 + R_3}_{\text{III}},$$

I - часть импульсов, использованная на формирование частного, II - часть импульсов, использованная для компенсации погрешностей, III - остаток, составляющий часть абсолютной погрешности деления. Величина абсолютной погрешности не зависит от порядка частного, что позволяет достигать сколь угодно малой погрешности.

5. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ УСТРОЙСТВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НМС.

САУ рациональным раскромом. В соответствии с результатами исследования эффективности раскроа принят алгоритм равномерного раскроа, отличающийся тем, что отсчет длины следующего прутка начинается с момента выдачи команды на рез предыдущего (а не с момента его фактического реза), что, как показали приведенные в работе исследования, исключает существенное укорочение последнего прутка. С целью повышения точности прогноз длины проката осуществляется на основе гипотезы о равенстве коэффициента вытяжки для двух смежных заготовок
$$L_{ik} = \frac{L_i \cdot \delta_{i-1}}{\psi_{i-1}},$$

где L_{ik} - расчетная длина k-го прутка из заготовки L_i , δ_{i-1} - коэффициент вытяжки предыдущей заготовки. Коэффициент вытяжки измеряется в относительном масштабе

$$\frac{\psi_{i+1}}{\psi_{i+1} \cdot n} = \frac{\psi_i}{\psi_i}; \quad \frac{\psi_{i+1}}{\psi_{i+1} \cdot n} = \frac{\psi_i}{\psi_i \cdot n}, \quad (20)$$

где ψ_i, ψ_i - углы поворота выходной чистовой и входной черновой клетей, $\frac{\psi_i}{\psi_i \cdot n}$ - коэффициент вытяжки i-ой заготовки приведенный к длине прутка. САУ содержит накопитель углов поворота черновой клетки с асинхронной передачей информации по командам индикатора наличия проката на выходе стана, блок число-импульсного деления, компаратор кодов, реализующий алгоритм (27), блок защиты от дополнительных резов для случая удлинения последнего прутка, блок самоконтроля. Статистический анализ погрешностей раскроа, приведенный в работе, свидетельствует, что систематические ошибки при раскроме 16-х профилей имеют место только на первых и последних прутках. Величина их функционально связана со скоростью прокатки и зависит от места установки индикатора перед летучими ножницами. В работе представлен алгоритм расчета оптимального расстояния, которое для сортамента НМС 250 ЧМЗ составляет 4,55 м, при этом $|\Delta l| \leq 2,6$ м. Среднеквадратичные отклонения составляют $0,8 + 1,7\%$, а за вычетом систематических погрешностей первых и последних прутков $0,8 + 1,2\%$. САУ, введенные в промышленную эксплуатацию на НМС 250 в 1973 г. и на НМС 300-2 в 1975 г. показали высокие эксплуатационные характеристики.

САУ летучими ножницами должна рассчитывать угол включения ножей, при скоростях прокатки 8-20 м/сек так, чтобы исключить "недорезы" и обеспечить зазор между режущими кромками ножей за один оборот до и

после реза больший, чем высота разрезаемого профиля, при отсутствии датчиков требующих ручной настройки. Учитывая ограниченность поля случайных реализаций вектора помехи $\rho = f(\Delta P, \Delta \dot{t}_k) = 0,18-0,24$ сек, была принята структура разомкнутой САУ, реализующей управление по возмущению. Анализ функционирования САУ с построением областей безопасности и поля возможных реализаций управления показал, что программно-временной автомат обеспечивает высокое качество управления при колебаниях давления в сети пневмопривода $1,5 + 5,5$ кг/см², разбросе времени коммутации на 10% и скорости барабанов до 25 м/сек, пока не достигнутой в практике прокатного производства. Алгоритм преобразования скорости в угол реза имеет вид:

$$t_{\rho} = m \tilde{t}_H - t_I, \quad m = \begin{cases} E \left[\frac{t_1}{\tilde{t}_H} \right] & \text{при } R = 0, \\ E \left[\frac{t_1}{\tilde{t}_H} \right] + 1 & \text{при } R \neq 0, \end{cases}$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} t_1 - \tilde{t}_H &\leq t_1 + t_2 \frac{H - (h + \Delta h)}{H}, \\ t_{2max} &= t_I - t_1, \\ t_I + \tilde{t}_H &\geq t_{II} + t_4 + t_5 \frac{h + \Delta h}{H}, \end{aligned} \right\} (2I)$$

где t_{ρ} - угол реза во временном масштабе, \tilde{t}_H - время одного оборота барабанов ножниц, t_I, t_{II} - программные уставки на сведение и разведение ножей, t_2, t_5 - время работы пневмопривода при сведении и разведении ножей, t_1, t_4 - время коммутации при сведении и разведении ножей. Использование временных координат позволило ограничиться единственным датчиком - индикатором наличия ножей в плоскости реза.

Два комплекта САУ, содержащие блоки автоматического самоконтроля и резервные полуккомплекты, введены в промышленную эксплуатацию в 1975 и 1976 гг. и имеют высокие эксплуатационные показатели.

САУ процессами транспортировки прутков (рис.3) обеспечивает возможность настройки предельной скорости прокатки средствами ручного управления или локальной автоматики при любых текущих значениях коэффициентов трения при разгоне и торможении без измерения этих параметров. Используется раздельная настройка на предельные значения скорости рольганга прямо по величине \mathcal{E} (8) и прокатки с помощью устройства измерения V_{nmax} . САУ работает следующим образом. С помощью САУ тормозным механизмом I4, настраивает процесс торможения так, чтобы он начинался при достижении задними торцами начала активной зоны торможения (линия ав). С помощью блока управления приводом рольганга II начинает увеличивать скорость роликов 5. При этом увеличивается ки-

него торца прутка L_c , по достижении которой включают тормозной механизм, блокировки переднего конца L_y и заднего конца L_x . При достижении передним торцом прутка индикатора, установленного на холодильнике, интегрируют скорость ролганга, до совпадения пути переднего торца с координатой L_c . Одновременно при достижении задним торцом прутка (передним торцом следующего прутка) индикатора, установленного перед холодильником, интегрируют скорость ролганга до совпадения пути с L_x (скорость прокатки до совпадения - с L_y). Команды на включение тормозного механизма формируют при $L_c \wedge L_x$. При ситуациях $L_x \wedge L_c$, $L_y \wedge L_c$, уставка сброса L_c не выполняется, САУ включает тормозной механизм по блокировкам, исключая аварийные ситуации, одновременно сигнализируя оператору о необходимом направлении смещения L_c . Таким образом, за счет отказа от выравнивания торцов в период настройки, САУ помогает оператору найти безопасный интервал управлений и поддерживать его при изменяющихся режимах. Исследование точности выравнивания торцов проката на холодильнике выявило:

$$\sigma_{пк} = 0,35 + 0,45 \text{ м}, \quad \sigma_{зк} = 0,31 + 0,52 \text{ м}.$$

Две САУ тормозным механизмом промышленно эксплуатируются на НМС 250 ЧМЗ с 1973 г. и показали высокую эффективность и хорошие эксплуатационные характеристики.

Важнейшей функцией автоматизированной системы оперативного учета производства (АСОУП) является автоматическое определение теоретической массы товарных пакетов сортового проката в технологической линии НМС. Устройство обеспечивает автоматический отбор, с заданной периодичностью, контрольных пакетов прутков на выходе стана, измерение их суммарной длины, сопровождение через холодильник и линию холодной резки до весового кармана, взвешивание контрольного пакета и определение переводного коэффициента " λ ", по которому определяются длина и теоретическая масса всех товарных пакетов до следующего контрольного. Число-импульсный процессор выполняет алгоритм:

$$\lambda = \frac{L_c}{P_c}; \quad L_i = P_c \cdot \lambda; \quad P_{mi} = L_i \rho; \quad \delta S = \lambda \rho, \quad (23)$$

где λ - длина 1 кг проката; L_i, P_{mi} - длина и теоретическая масса текущего пакета, ρ - теоретический вес погонного метра, δS - отклонение фактического среднего сечения от номинала. Устройство введено в промышленную эксплуатацию с 1974 г. и обеспечило прокатку всего сортамента НМС в минусовом поле допуска с экономией ~ 25 тыс. т. проката в год.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Идентификация законов движения проката обеспечивается, с достаточной для решения поставленной задачи точностью, дифференциальным уравнением первого порядка на участке разгона и уравнением линейной регрессии на участке торможения.
2. Для достижения предельной скорости прокатки необходима предварительная настройка предельной скорости транспортировки на участке разгона прутков.
3. Предельная скорость транспортировки определяется конструктивным размером стана от оси летучих ножиц до ограждения за холодильником, пропорциональна коэффициенту трения торможения и обратно пропорциональна длине прутков.
4. Имитационная модель НМС, содержащая математические модели движения проката и блок оптимизации раскроя на заказные размеры по интегральному экономическому критерию, позволяет осуществить обоснованный выбор алгоритмов и структуры САУ и оценить их эффективность на стадии проектирования.
5. Равномерный раскрой проката на летучих ножницах обеспечивает достижение наиболее высоких показателей: скорости прокатки, выхода мерных длин и значений интегрального показателя качества, позволяя экономить ~ 218 руб/час по сравнению с раскроем на крат и ~ 933 руб/час по сравнению с раскроем по уставке (по результатам моделирования).
6. С целью снижения требований к быстродействию технических средств локальных САУ, совмещения процессов измерения технологических параметров с их математической обработкой при одновременном снижении аппаратных затрат в 3 + 4 раза целесообразно использовать принципы и устройства число-импульсной арифметики.
7. САУ летучими ножницами по принципу программно-временного автомата, использующего единственный датчик - сведения ножей в плоскости реза и преобразователь скорости ножиц в угол выльчания, обеспечивает высокое качество реза при скорости ножиц до 25 м/сек и колебаниях давления в сети пневмопривода $1,5 + 5,5$ кг/см².
8. САУ процессом транспортировки прутков, используя автоматический цифровой измеритель текущей и предельно допустимой скорости прокатки и информацию о достижении передними торцами прутков предельного уровня в конце холодильника, обеспечивает возможность раздельной последовательной настройки скоростей роллганга и прокатки до значений, близких к технически обоснованному пределу при любых

фактических коэффициентах трения при разгоне и торможении прутков без измерения этих нестационарных параметров.

9. Алгоритм функционирования САУ тормозным механизмом по пространственным координатам торцов прутков с контролем ограничений на их положения позволяет исключить аварийные ситуации на входе холодильника.

10. Алгоритм вычисления длины 1 кг прутка любого профиля по контрольным пакетам проката 2,4 + 3,8 км. позволяет автоматизировать процесс измерения теоретической массы товарных пакетов и среднего сечения проката, обеспечивая точность контроля 0,3%.

11. Длительная промышленная эксплуатация (от 1 до 7 лет) подтвердила высокую надежность систем, достигаемую резервированием, автоматическим самоконтролем и средствами профилактического контроля. Автоматизация выходной части НМС позволила повысить скорость прокатки на 4,5 + 20%, сэкономить более 20000 т проката в год, ликвидировать брак "по хвостам", снизить простои и обрезь, освободить часть персонала от тяжелых физических операций, повысить интеллектуальность труда операторов.

В результате выполнения работы осуществлена формализация процессов функционирования выходной части стана, разработаны алгоритмы управления скоростью прокатки, имитационная модель НМС, исследована эффективность алгоритмов раскрыя, синтезированы и внедрены САУ процессами транспортировки прутков, лостучими ножницами, тормозным механизмом и система автоматического определения теоретической массы проката; тем самым по мнению автора, цель работы - теоретическое обоснование и практическое подтверждение возможности интенсификации производственных процессов на НМС средствами оптимального автоматического управления механизмами выходной части стана - достигнута. Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. А.Б.Олевский, Г.Коголь, С.Лисин. Комплекс технических средств автоматического определения теоретического веса листового проката - СССР, Запорожье, 1971-19с. IV Международная конференция стран-членов СЭВ и СФРЮ по автоматизации производственных процессов и управления в черной металлургии(сентябрь 1971 г.): докл. III/4.
2. Олевский А.Б., Коголь Г.Н. Системы автоматического определения теоретического веса листового проката на агрегатах резки. - Бюллетень ЦНИИЧМ, 1971, № 10 (654) с. 44 - 46.
3. А.с. № 412488 (СССР). Устройство для определения теоретического веса проката /А.Б.Олевский, Г.Н.Коголь, В.С.Тарасова, И.С.Левит-

- ский. - Оpubл. в Б.И., 1974, № 3.
4. А.с. № 346801 (СССР). Реверсивный двоично-десятичный счетчик. /Г.Н.Коголь, А.Б.Олевский. - Оpubл. в Б.И., 1972, № 23.
 5. А.с. № 488207 (СССР). Устройство для деления в число-импульсном коде. /А.Б.Олевский, Г.Н.Коголь, - Оpubл. в Б.И., 1975, № 38.
 6. А.с. № 489596 (СССР). Устройство к прокатному стану для раскроя проката летучими ножницами. /А.Б.Олевский, А.Р.Омельницкий, Г.Н.Коголь, Л.Е.Ямпольский, Ю.М.Кузнецов. - Оpubл. в Б.И., 1975, № 40.
 7. А.с. № 496619 (СССР). Устройство для автоматического определения теоретического веса товарных пакетов сортового проката. /А.Б.Олевский, Л.Е.Ямпольский, Г.Н.Коголь, Ю.М.Кузнецов, А.И.Елкин, В.В.Беденко. - Оpubл. в Б.И., 1976, № 43.
 8. Олевский А.Б., Коголь Г.Н. Устройство для выполнения арифметических операций в системах автоматического управления металлургическими агрегатами. - М: Черметинформация, 1976, серия 15, выш. I - 22 с.
 9. А.с. № 498053 (СССР). Устройство автоматического управления скоростью транспортировки проката. /А.Б.Олевский, Ю.Г.Андрианов, Л.Е.Ямпольский, А.И.Елкин, В.В.Беденко. - Оpubл. в Б.И., 1976, № 1.
 10. Олевский А.Б. Опыт разработки и внедрения АСУ хвостовой части мелкосортного стана 250. - Челябинск, ИТО ЧМ, 1976, с.18-19. Конференция "Автоматизированные системы управления технологическими процессами в черной металлургии (прокатное производство) (1-2 июня, 1976, Челябинск). Тез. докл.
 11. А.с. № 546789 (СССР). Устройство для автоматического определения теоретического веса товарных пакетов сортового проката. /А.Б.Олевский, Л.Е.Ямпольский, А.И.Елкин, В.В.Беденко, Ю.М.Кузнецов, Г.Н.Коголь. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 6.
 12. А.с. № 563202 (СССР). Устройство автоматического управления механизмами перекладки проката на холодильник мелкосортного стана. /Л.Е.Ямпольский, А.Б.Олевский, Ю.М.Кузнецов, А.И.Елкин, В.В.Беденко. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 24.
 13. Олевский А.Б., Марков В.Ф., Коголь Г.Н. Адаптивная система стандартизации нагрева подката в проходной печи на входе широкополосного стана. - В кн. Научные основы автоматизации процессов обработки металла давлением, Киев, Наукова Думка, 1977, с.59-66.
 14. А.с. № 590732 (СССР). Параллельный двоично-десятичный квадратор. /Г.Н.Коголь, А.Б.Олевский. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 4.

15. А.с. № 602251 (СССР). Устройство автоматического управления механизмами переладки проката на холодильник мелкосортного прокатного стана. /А.Б.Олевский, Ю.Г.Андрянов, Г.Н.Коголь, А.И.Елкин, И.А.Кац. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 14.
16. А.с. № 604636 (СССР). Система автоматического управления ножницами для обрезания концов проката. /А.Б.Олевский, Е.С.Салитренко, Ю.А.Танеев, Г.Н.Коголь, В.Ф.Марков. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 16.
17. Коновалов Ю.В., Галкин Д.П., Додока В.Г., Горский Л.Б., Франценок И.В., Заугольников Д.Н., Ананьевский М.Г., Манцилин Г.И., Олевский А.Б., Корнеева Н.И. Повышение точности листовой прокатки. - М.: Металлургия, 1978. - 296с.
18. А.Б.Олевский, Ю.М.Кузнецов, Е.К.Барсуков, Г.Н.Коголь, Я.Р.Сапир, В.В.Беденко. АСУ ТП непрерывного мелкосортного стана типа 250. VI Международная конференция стран-членов СЭВ и СФРЮ по автоматизации производственных процессов и управления в черной металлургии (март 1979 г.): докл. - Будапешт, ВНР, 1979. - II с.
19. Всесоюзное совещание "Опыт разработки и внедрения АСУ прокатными станами (Киев, 10-13 сентября 1979 г.): тез. докл. /Кузнецов А.Б., Олевский А.Б., Кац И.А. Определение и исследование эффективных средств автоматизации прокатного производства методом имитационного моделирования на примере непрерывного мелкосортного стана 250.- М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, Приборы, средства автоматизации и системы управления, 1979, ТС-12, с.18.
20. VI областная научно-техническая конференция молодых специалистов и ученых предприятий и организаций черной металлургии (Златоуст, ноябрь 1979 г.). тез. докл. /Соломович Б.Г., Олевский А.Б. Система автоматического контроля текущей и предельной скорости прокатки на мелкосортном стане. - Златоуст, 1979. - с.76-77.
21. Олевский А.Б., Кузнецов А.Б. Исследование эффективности рационального раскроя проката на НМС. - Сталь, 1980, № 2, с.122-124.

Олевский Александр Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ
ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ МЯКОСОРТНЫМ
СТАНОМ (НМС)**

**Специальность 05.13.07 - "Автоматическое управление,
регулирование, управление технологическими процессами
(промышленность)"**

Техн. редактор Миних А.В.

**ФЕОС11. Подписано к печати 29/1-81 г. Формат бумаги 60x90 1/16,
Объем 1,25 п.л., I уч.-изд.л. ЧИИ. Тарах 100 экз. Заказ 22/127.**