

30X

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР  
Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ДУБИНСКИЙ Феликс Семенович

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ МЕЛКОСОРТНОМ  
СТАНЕ

Специальность 05.16.05 -  
"Обработка металлов давлением"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1975

Диссертационная работа выполнена на кафедре "Обработка металлов давлением (прокатка)" и в проблемной лаборатории "Новые технологические процессы прокатки" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор В.Н.Выдрин.

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент П.Н.Амосов.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Н.В.Литовченко;  
кандидат технических наук В.А.Алешин.

Ведущее предприятие – Челябинский металлургический завод.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1975 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1975 г.

в 15 часов, на заседании Совета металлургического факультета по при-  
суждению ученых степеней при Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола.

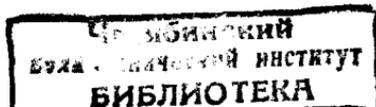
Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу:  
454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76, Челябинский поли-  
технический институт имени Ленинского комсомола, ученому секретарю  
Совета института, тел. 39-39-64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
доцент, кандидат технических наук

*В. Гончар*

В.Н. ГОНЧАР



## Общая характеристика работы

Актуальность работы. В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-75 г. г. наряду с задачей увеличения выпуска проката особое внимание уделено вопросам улучшения качества и повышения точности прокатываемых изделий.

В постановлении ЦК КПСС об автоматизации процессов черной металлургии от 17 августа 1972 года указывается на то, что осуществление комплексной автоматизации технологических процессов является одним из решающих факторов успешного выполнения технико-экономических задач, поставленных XXIV съездом нашей партии перед металлургами страны.

Это связано с тем, что повышение производительности технологических процессов, повышение качества продукции, уменьшение потерь производства, совершенствование технологических процессов и т.п. тесно связано с применением современных методов автоматического управления.

Разработке и внедрению автоматических систем управления предшествует большой объем теоретического и экспериментального исследования прокатного стана как объекта управления (регулирования).

Цель работы. Проведение теоретического и экспериментального исследования непрерывного мелкосортного стана для повышения точности проката и создания основных предпосылок для разработки алгоритмов автоматического управления процессом прокатки на стане.

Научная новизна. Впервые для непрерывной прокатки сортового металла разработана математическая модель процесса прокатки, включающая описание очага деформации, электропривода и межклетевых промежутков, которая позволяет проводить анализ работы стана в режиме прокатки с натяжением и наличием свободной петли в межклетевых промежутках стана. Получены статистические модели, описывающие взаимосвязь основных технологических параметров процесса.

Реализация математической модели процесса непрерывной прокатки проведена на ЭВМ "Минск-22".

Практическая ценность. Получена экспериментальная оценка влияния основных технологических параметров на процесс непрерывной прокатки и точность геометрических размеров прокатываемого профиля. В результате исследования износа валков разработана график смены калибров,

позволяющий оперативно планировать время переходов, перевалок и потребность стана в валках.

В результате статистического анализа результатов экспериментального исследования получены достоверные статистические модели связи параметров в межклетевых промежутках, модели износа и размеров профиля в зависимости от основных технологических факторов. Результаты расчета по полученным зависимостям представлены в виде номограмм.

Реализация математической модели стана на ЭВМ позволила выполнить анализ переходных процессов определить передаточные коэффициенты стана по различным возмущающим и управляющим воздействиям.

Реализация работы. Результаты исследования использованы на непрерывном мелкосортном стане 250 Челябинского металлургического завода для усовершенствования технологического процесса прокатки, сужения фактического поля допусков, уменьшения количества брака и вторых сортов, уменьшения времени простоев стана при перевалках и настройках и т.п.

Основные результаты теоретического и экспериментального исследования закладываются в алгоритмы автоматического управления процессом прокатки с помощью вычислительной машины, внедрение которой будет осуществляться на мелкосортном стане 250 ЧМЗ.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены:

1. На XXIV-XXVIII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, Челябинск, 1971-1975 г.г.
2. На II и У научно-технических конференциях молодых специалистов Челябинского металлургического завода, Челябинск, 1968 и 1970 г.г.
3. На IX городской научно-практической конференции "Новую технику и прогрессивную технологию в производство", Челябинск, 1972.
4. На II Всесоюзной научно-технической конференции "Теоретические проблемы прокатного производства", Днепропетровск, 1972 г.
5. На I Всесоюзной научно-технической конференции "Применение ЭВМ в металлургии", Москва, 1973 г.
6. На Всесоюзном научно-техническом семинаре "Повышение точности прокатки на сортовых и листовых станах", Челябинск, 1974 г.

Публикация. Основное содержание работы опубликовано в 5 статьях.

Объем работы. Диссертация содержит 138 страниц машинописного текста, 76 рисунков, 34 таблицы, список использованной литературы из 127 наименований и приложение.

## Экспериментальное исследование процесса прокатки на непрерывном мелкосортном стане

Исследованию процесса непрерывной прокатки сортового металла, влиянию технологических параметров на точность изделий, вопросам настройки непрерывных станов посвящены работы А.И.Целикова, А.П.Чемарева, В.В.Выдрина, Н.В.Литовченко, В.Т.Жадана, М.С.Мутьева и других.

Экспериментальная часть данной работы выполнена на непрерывном мелкосортном стане 250 Челябинского металлургического завода. При исследовании широко использованы методы математического планирования эксперимента. Анализ полученных в работе экспериментальных данных выполнен с помощью математико-статистических методов.

Проведен статистический анализ фактического поля допусков при прокатке на стане круглых и периодических профилей. Построены частотные графики распределения размеров проката.

Исследование режима натяжений и скоростного режима проводили при прокатке круглых и арматурных профилей, доля которых в общем объеме производства стана составляет 75-80%.

При исследовании осциллографировали следующие параметры: натяжение полосы в межклетевых промежутках чистовой группы стана, скорость и ток приводных двигателей клетей, давление металла на валки, температуру раската и геометрические размеры готового проката.

Проведено осциллографирование режимов настройки стана на заданный профиль в каждой из бригад стана. Выявлено влияние субъективного фактора на качество настройки стана. Показано, что при прокатке одного и того же профиля в различных бригадах натяжение полосы может отличаться в 1,5-2,0 раза, что существенно отражается на точности проката. В результате анализа отобраны и рекомендованы наиболее оптимальные варианты настройки скоростного режима стана.

Режим рассогласования скорости валков смежных клетей создавался искусственно оператором поста управления путем изменения уставок системы управления скоростью двигателя.

В результате исследования режима натяжений и скоростного режима получен ряд обобщающих зависимостей между параметрами процесса. Зависимости удельного натяжения полосы от величины рассогласования скорости валков клетей достаточно близка к линейной.

Показано, что рассогласование скорости валков в последнем межклетевом промежутке на 3–3,5% вызывает дополнительное натяжение в полосе 26–30 мН/м<sup>2</sup> и утяжку готового профиля по ширине, что выводит его за пределы минусового поля допуска.

На изменение высоты готового изделия рассогласование скорости валков в пределах I–8% существенного влияния не оказывает, что свидетельствует о достаточно высокой жесткости клетей чистовой группы.

Получена зависимость момента двигателей клетей, образующих межклетевой промежуток стана, от величины натяжения полосы в этом промежутке в виде уравнений регрессии.

$$M_1 = 0,4620 - 0,0332\delta \quad \text{и} \quad M_2 = 0,4947 + 0,0101\delta. \quad (1)$$

Обобщенная зависимость утяжки чистового профиля от натяжения полосы также описана уравнением регрессии

$$-\Delta\delta = 0,0339 + 0,3397\delta. \quad (2)$$

Определены доверительные интервалы полученных зависимостей.

Проведено экспериментальное исследование перемещения нажимных винтов на устойчивость процесса прокатки и изменение размеров готового профиля. Показано, что использование полученных зависимостей дает возможность определить, на каких клетях и на какую величину необходимо изменить положение нажимных винтов для получения требуемых размеров готовой полосы.

Статистический анализ температурных режимов прокатки на стане показал значительные отклонения температуры нагрева металла как по длине раската (до 50°C), так и различных полос в течение смены (до 100°C и выше). Проведен анализ вида и формы кривых нагрева раската за черновой и чистовой группами стана. Температура на выходе из стана связана с температурой за клетью 7 зависимостью вида

$$T_{23}^{\circ} = a_0 + a_1 \cdot T_7^{\circ}. \quad (3)$$

Коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  выражения (3) определены для различных профилей из сортамента стана. Исследование изменения температуры металла по мере прохождения его по клетям стана показало следующее.

I. Наиболее интенсивное понижение температуры поверхностных слоев раската (в среднем на 80°C) происходит в клетях I–7 черновой группы стана.

2. В клетях 8-II промежуточной группы потери тепла компенсируются разогревом полосы за счет пластической деформации, и температура полосы стабилизируется.

3. В клетях чистовой группы стана за счет высоких скоростей деформации, как правило, наблюдается повышение температуры раската на 30-50°C.

4. С увеличением профилеразмера полосы температура конца прокатки повышается.

Для определения влияния температурного режима на энергопараметры и размеры готового профиля в одну и две нитки прокатывались заготовки с различной температурой нагрева.

Получены уравнения регрессии, описывающие зависимость исследуемых факторов и показана теснота связи между ними в условиях двухниточного непрерывного стана.

Исследование влияния температуры нагрева заготовок в обеих печах стана на геометрические размеры чистового профиля было проведено с применением методов математического планирования эксперимента.

Математически это влияние выражается зависимостью

$$Y = 41,3228 - 0,0219X_1 + 0,013X_2, \quad (4)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  - температура металла, соответственно, на контролируемой и смежной нитках прокатки.

Данное уравнение адекватно описывает исследуемый процесс.

Результаты расчетов по полученным выражениям представлены в виде номограмм.

Отдача валков является важной и в то же время достаточно доступной для анализа и контроля величиной. В условиях двухниточной прокатки определение этой величины приобретает еще большее значение. Отдачу валков рабочих клетей определяли измерением образцов - свидетелей из легкодеформируемых металлов, прокатанных в холостом и рабочем режимах. Исследована величина отдачи валков всех клетей стана при одно- и двухниточной прокатке различного профильного и марочного сортамента.

Исследовано также влияние числа одновременно прокатываемых ниток на размеры готового профиля. При смене числа ниток прокатки изменение размеров подката к чистовой группе клетей составляет 0,3-0,5 мм. Такое изменение размеров подката меняет скоростной режим и режим натяжений в стане и оказывает существенное влияние на размеры готового

профиля. Специфика работы двухниточного стана обуславливает постоянное изменение числа ниток прокатки. При переходе с двух- на односточную прокатку без подстройки скоростного режима утяжка готового профиля составляет 0,2–0,3 мм. Таким образом, в условиях двухниточного стана при постоянном изменении числа одновременно прокатываемых ниток, даже при плотной загрузке стана металлом на готовом профиле неизбежны участки раската, прокатанные в односточном режиме, а их размеры отличаются от размеров основной массы металла. Частичное устранение этого явления возможно следующими способами.

1. Установкой на стане калибрующих устройств.
2. Введением системы автоматической коррекции настройки стана.
3. Внедрением процесса бесконечной прокатки.

#### Статистическое исследование параметров межклетевых промежутков стана

До недавнего времени при исследовании процесса непрерывной прокатки сортовой стали слабо применялись математико-статистические методы – действенный инструмент анализа и исследования процесса прокатки.

В данной работе приводятся результаты статистического исследования параметров межклетевых промежутков чистовой группы мелкосортного стана 250. Статистические методы позволили оценить надежность экспериментальных данных и достоверность выводов, более углубленно выполнить анализ результатов исследования, устранить влияние субъективного фактора на результаты обработки и, наконец, построить вероятностные зависимости между исследуемыми параметрами, которые учитывают специфические особенности данного прокатного стана. При исследовании регистрировали натяжение полосы во всех межклетевых промежутках и токовоме нагрузки всех клетей чистовой группы, температуру раската, величину рассогласования скорости вальков смежных клетей и геометрические размеры раската при прокатке различных профилей.

В результате статистического анализа экспериментальных данных определен диапазон изменения нагрузки и скорости приводных двигателей клетей, а также натяжений полосы между клетями чистовой группы стана.

Исходный материал для анализа получен в результате проведения пассивного эксперимента, т.е. осциллографированием параметров стан

функционирующего в нормальных условиях, в течение длительного времени, охватывающего прокатку всего профильного сортамента. На основании экспериментальных осциллограмм для каждого цикла прокатки полосы по известным соотношениям были определены значения среднеквадратичных токов двигателей клетей, эквивалентные по условиям нагрева действительным токам электродвигателей прокатных клетей.

Из сравнения полученных результатов анализа с данными действующего оборудования видно, что электродвигатели чистовых групп стана имеют значительный запас по мощности, позволяющий обеспечить прокатку сортамента из высоколегированных марок стали и большего исходного сечения заготовок, а также повысить скорость прокатки на стане. Определен диапазон изменения натяжений полосы в межклетевых промежутках чистовой группы при прокатке круглых и арматурных профилей.

Установлено, что натяжение полосы между клетями при прокатке арматурной стали в 1,5-2,0 раза выше, чем при прокатке круглого профиля.

Проведен анализ зависимости между основными параметрами процесса прокатки (натяжение полосы, моменты приводных двигателей клетей, образующих межклетевые промежутки, температура раската и геометрические размеры готового профиля).

Для всех пяти межклетевых промежутков чистовой группы получены зависимости между натяжениями полосы, моментами двигателей клетей и температурным режимом прокатки.

Предварительный анализ экспериментальных данных позволил модель взаимозависимости перечисленных переменных процесса выразить в виде полинома первой степени без учета межфакторных взаимодействий:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (5)$$

Для каждого из межклетевых промежутков (МКП) эти зависимости имеют вид:

$$\text{МКП-1: } \sigma = 3,8160 - 0,00092 T^\circ - 14,7912 M_1 + 5,4325 M_2 ; \quad (6)$$

$$\text{МКП-2: } \sigma = 4,7048 - 0,0008 T^\circ - 18,3340 M_1 + 3,7938 M_2 ; \quad (7)$$

$$\text{МКП-3: } \sigma = 2,5100 - 0,0005 T^\circ - 5,1203 M_1 + 1,7940 M_2 ; \quad (8)$$

$$\text{МКП-4: } \sigma = 5,5441 - 0,00021 T^\circ - 23,8010 M_1 + 9,4201 M_2 . \quad (9)$$

Зависимость связи параметров для МКП-5 приведена ранее.

Определены доверительные интервалы коэффициентов уравнений регрессии и проведена проверка их значимости. Коэффициенты множественной корреляции полученных выражений достаточно высоки и превышают критическую величину. На этом основании можно сделать вывод о

значительной тесноте связи между последующими параметрами.

Физическая интерпретация зависимостей (6) — (9) следующая: понижение температуры нагрева раската вызывает появление натяжения в междетевых промежутках, которое уменьшает момент двигателей предшествующих и увеличивает момент двигателей последующих клетей, образующих данный промежуток. В свою очередь, момент двигателей также зависит от изменения температурного режима.

Для удобства практического использования полученные выражения представлены в виде номограмм из выравненных точек с искусственным бинарным полем.

Определены уравнения регрессии, описывающие совместное влияние натяжения полосы и температурного режима прокатки на изменение ширины круглого профиля. Например, для прокатки круга диаметром 25 мм это уравнение имеет вид

$$b = 30,1070 - 0,39276 - 0,0044T^{\circ} \quad (10)$$

По величине коэффициента множественной детерминации ( $R^2 = 0,7357$ ) можно судить о том, что 74% колебаний горизонтального диаметра круглого профиля можно объяснить изменением температурного режима прокатки и режима натяжений полосы в последнем междетевом промежутке стана.

Результаты вычисления коэффициентов парной корреляции, объясняющих взаимодействие исследуемых параметров, приведены в таблице.

Таблица.

Характеристика линейных парных связей

| Пара признаков       | Коэффициент парной корреляции ( $r$ ) | Ошибка коэффициента ( $\sigma_r$ ) | Критерий значимости ( $t_r$ ) | Табличное значение критерия значимости |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|
| $b, \bar{b}$         | -0,8059                               | 0,0701                             | -11,4959                      | 2,069                                  |
| $b, T^{\circ}$       | 0,2037                                | 0,1917                             | 1,0624                        | 2,069                                  |
| $\bar{b}, T^{\circ}$ | -0,5556                               | 0,1382                             | -4,0186                       | 2,069                                  |

Таким образом, при прокатке на непрерывных станах изменение температуры нагрева металла влияет на величину натяжения ( $r_{bT} = -0,5556$ ), которое в значительно большей степени и противоположно по знаку направленности, чем изменение температурного режима влияет

на изменение ширины профиля ( $\gamma_{об} = -0,8059$ ;  $\gamma_{от} = 0,2037$ ), частично или полностью компенсируя влияние температурного режима.

Зависимость между отклонением ширины ( $\Delta b$ ) и высоты ( $\Delta h$ ) готового профиля и степенью рассогласования скорости валков последнего межклетевого промежутка стана имеет вид

$$\Delta b = 0,1509 - 0,0897 \cdot \Delta h - 0,1628 \left( \frac{\Delta p}{p} \right). \quad (II)$$

В работе проведено экспериментальное исследование процесса передачи натяжения полосы вдоль линии стана по ходу и против хода прокатки. Методика исследования заключалась в измерении натяжения раската во всех межклетевых промежутках чистовой группы стана при обычном режиме прокатки и при наличии возмущающих воздействий на входе и выходе чистовой группы. Показано, что передача натяжения вдоль линии стана по ходу прокатки происходит со слабым затуханием (приращение натяжения перед группой и в последнем межклетевом промежутке составило соответственно 15 и 10  $\text{мН/м}^2$ ). В то же время при приложении возмущения на выходе из стана натяжение передается вдоль линии стана против хода прокатки с интенсивным затуханием (приращение натяжения в чистовом и первом межклетевых промежутках составили 25,7 и 4,0  $\text{мН/м}^2$ ).

Полученные данные могут быть использованы как для анализа процесса непрерывной прокатки, так и для отладки математической модели стана.

#### Экспериментальное исследование износа рабочих валков на промышленном стане

Исходя из задач настоящей работы, проведение экспериментального исследования преследовало следующие цели:

- 1) изучение характера износа по контуру калибра;
- 2) исследование динамики износа;
- 3) разработку рационального графика смены калибров клетей стана;
- 4) получение математической модели износа в зависимости от основных технологических параметров.

Определение износа по всему периметру калибра осуществляли с помощью оттисков по методике, разработанной на кафедре прокатки Челябинского политехнического института. Для измерения величины износа в любой точке его периметра был разработан и изготовлен специ-

альный инструмент, позволяющий быстро и достаточно точно определить износ калибра. В каждой из исследуемых клетей сделано от 80 до 160 оттисков износа калибров через определенные промежутки времени, что позволило построить частотный график распределения величины износа. Анализ контура изношенных калибров показывает достаточно симметричный износ по ширине овальных и круглых калибров без существенного искажения их первоначальной формы.

В результате исследования динамики износа калибров показано, что наиболее интенсивный рост выработки наблюдается в начальный период работы калибра. В дальнейшем интенсивность выработки калибров уменьшается. Это говорит о целесообразности увеличения количества проката с каждого калибра до достижения оптимальной выработки, допустимой зазором между валками или качеством проката.

Замеры всех изношенных калибров по длине бочки валков показали большую неравномерность износа, что, естественно, увеличивает расход валков.

Разработана методика определения удельного расхода валков при износе калибров во время прокатки, а также при ремонте валков в вальцетокарной мастерской.

Статистический анализ результатов исследования позволил описать зависимость износа калибров ( $\Delta$ ) от количества прокатанного в нем металла ( $G_K$ ), диаметра ( $D$ ) и твердости валков ( $HВ$ ), а также температурно-скоростного режима прокатки ( $I$ ). Так, для калибров клетки 6 такая зависимость имеет вид

$$\Delta = 8,3830 + 0,398 \cdot G \cdot 10^{-3} - 0,0102D - 0,0143(HB) + 0,1163 \cdot I. \quad (I2)$$

Полученные выражения относятся к классу уравнений пятого номографического порядка и для удобства практического использования реализованы номограммами из выравненных точек и двумя развитыми бинарными полями.

Результаты исследования позволили разработать рациональный график смены калибров клетей стана. Стабилизация переходов и перевалок позволяет:

- а) сократить время на переходы, перевалки и настройку стана;
- б) увеличить количество прокатанного металла на каждом комплекте валков;
- в) снизить расход валков;
- г) уменьшить брак и выход вторых сортов на стане.

Разработана методика определения необходимого парка валков стана для выполнения производственной программы.

Математическое описание процесса прокатки  
в чистой группе непрерывного мелкосортного стана х)

Математическое моделирование и автоматическое управление непрерывными прокатными станами оказались возможными на базе достижений теории непрерывной прокатки, большой вклад в развитие которой внесли видные советские ученые: А.И.Целиков, А.П.Чекмарев, В.Н.Выдрин, Н.Н.Дружинин, А.С.Филатов, В.П.Полухин и другие.

Автором разработана математическая модель процесса прокатки в чистой группе клетей непрерывного мелкосортного стана, которая включает:

- 1) технологические уравнения, связывающие параметры процесса в очаге деформации и условие постоянства секундных объемов;
- 2) уравнения динамики электропривода клетей;
- 3) уравнения межклетевых промежутков.

Количество клетей чистой группы стана в соответствии с калибровкой может изменяться от четырех до шести.

Принятая структура  $\Pi$  - клетевых стана приведена на рис. I.

Для выбора исходных технологических уравнений был проведен расчет по шести различным зависимостям для определения давления металла на валки, по шести зависимостям - для расчета уширения и трем - для опережения.

В основу выбора расчетных зависимостей для составления математического описания заложен принцип наибольшей теоретической обоснованности и наилучшей сходимости расчетных величин с экспериментальными данными.

Сравнительный анализ показал, что для условий прокатки в чистой группе мелкосортного стана наиболее соответствуют требованиям методики А.П.Чекмарева - для расчета уширения, В.Н.Выдрине - для расчета опережения, М.И.Бровмана - В.И.Эюзина - для расчета давления металла на валки.

---

х) Раздел выполнен при научной консультации доцента к.т.н. Федосиенко А.С.

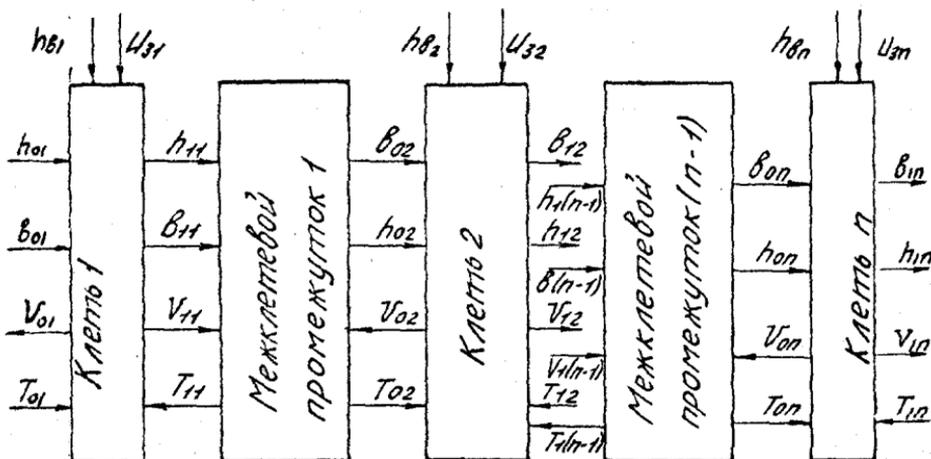


Рис. 1. Структурная схема  $n$  - клетового стана

Высоту полосы на выходе из очага деформации определяли с помощью известного выражения А.Ф.Головина-Р.Симса.

Если принять регулятор скорости идеальным, то динамику электропривода рабочих валков можно описать уравнением движения электродвигателя под действием заданного напряжения с учетом наклона механической характеристики.

$$T_{эм} \cdot \frac{dn}{dt} + n = K_g \cdot U_3 - \frac{1}{\beta} \cdot M_c \quad (13)$$

Для вывода уравнений межклетевых промежутков процесс транспортного запаздывания опишем выражением

$$L_{ок} + \int_0^{t-\tau_k} v_{k1}(t) dt - \int_0^{t-\tau_k} v_{0(k+1)}(t) dt = \int_{t-\tau_k}^t v_{0(k+1)}(t) dt, \quad (14)$$

где  $L_{ок}$  - длина раската в межклетевом промежутке;  
 $v_{k1}$  - скорость выхода металла из  $k$  - й клетки;  
 $v_{0(k+1)}$  - скорость входа металла в  $(k+1)$ -ю клетку;  
 $\tau_k$  - время транспортного запаздывания.

Физическая интерпретация выражения (14) заключается в следующем: количество металла, определяемое длиной  $L_{ок} + \int_0^{t-\tau_k} v_{k1} dt - \int_0^{t-\tau_k} v_{0(k+1)} dt$ , находящаяся между клетями в момент времени  $(t - \tau_k)$ , к моменту времени  $t$  полностью проходит через  $(k+1)$ -ю клетку.

С учетом чередования клеток с вертикальным и горизонтальным

расположением валков размеры раската на входе и выходе межклетового промежутка связаны следующей зависимостью

$$\left. \begin{aligned} v_{0(k+1)}(t) &= h_{1k}(t - \tau_k); \\ h_{0(k+1)}(t) &= v_{1k}(t - \tau_k). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Чтобы не разрешать уравнение (14) относительно  $\tau_k$ , удобно, с точки зрения дальнейшей реализации модели на ЭВМ, рассматривать величины  $v_{1k}, h_{1k}, v_{0(k+1)}, h_{0(k+1)}$  не прямыми функциями времени, а функциями аргументов

$$L_{1k} = \int_0^* v_{1k}(t) dt \quad \text{и} \quad L_{0(k+1)} = \int_0^* v_{0(k+1)}(t) dt.$$

Таким образом, можно записать  $v_{1k} = f[L_{1k}]$ ;

$$h_{1k} = f[L_{1k}]; \quad v_{0(k+1)} = \varphi[L_{0(k+1)}]; \quad h_{0(k+1)} = \varphi[L_{0(k+1)}].$$

Используя введенные обозначения, выражение (14) можно переписать в виде

$$L_{1k}(t - \tau_k) = L_{0(k+1)}(t) - L_{0k}. \quad (16)$$

Тогда уравнения (15) можно записать иначе

$$\left. \begin{aligned} v_{0(k+1)}[L_{0(k+1)} - L_{0k}] &= h_{1k}[L_{1k}]; \\ h_{0(k+1)}[L_{0(k+1)} - L_{0k}] &= v_{1k}[L_{1k}]. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Как объект автоматического управления непрерывный мелкосортный стан характеризуется рядом регулируемых параметров (толщина и ширина полосы на выходе из стана и т.п.), регулирующими воздействиями (положение нажимных винтов, скорость вращения валков и др.), а также различными возмущающими воздействиями.

Очаг деформации, согласно принятым исходным зависимостям, может быть описан системой вида

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= f(h_0, D); \\ v_1 &= f(h_0, v_0, h_1, T_0, T_1); \\ D &= f(h_0, v_0, h_1, v_1, T_0, T_1); \\ M &= f(h_0, v_0, h_1, v_1, T_0, T_1); \\ L &= f(h_0, v_0, h_1, v_1, T_0, T_1); \\ v_0 &= f(h_0, v_0, h_1, v_1, T_0, T_1). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

В рабочем диапазоне изменения параметров процесса прокатки под воздействием возмущений допустима линеаризация исходной системы уравнений.

Линеаризовав зависимость (13), применив к полученному выражению преобразование Лапласа, уравнение движения электродвигателя при нулевых начальных условиях преобразовали в уравнение скорости полюса, выходящей из очага деформации.

$$T_{эм} \cdot \Delta \dot{U}_1 + \Delta U_1 - T_{эм} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial t} \left( \frac{\partial i}{\partial h_0} \cdot \Delta \dot{h}_0 + \frac{\partial i}{\partial \delta_0} \cdot \Delta \dot{\delta}_0 + \frac{\partial i}{\partial T_0} \cdot \Delta \dot{T}_0 + \frac{\partial i}{\partial T_1} \cdot \Delta \dot{T}_1 + \frac{\partial i}{\partial h_8} \cdot \Delta \dot{h}_8 \right) - \frac{\partial U_1}{\partial t} \left( \frac{\partial i}{\partial h_0} \cdot \Delta \dot{h}_0 + \frac{\partial i}{\partial \delta_0} \cdot \Delta \dot{\delta}_0 + \frac{\partial i}{\partial T_0} \cdot \Delta \dot{T}_0 + \frac{\partial i}{\partial T_1} \cdot \Delta \dot{T}_1 + \frac{\partial i}{\partial h_8} \cdot \Delta \dot{h}_8 \right) = (19)$$

$$= \frac{\partial U_1}{\partial t} \cdot K_g \cdot \Delta U - \frac{\partial U_1}{\partial t} \cdot \frac{1}{\beta} \left( \frac{\partial M}{\partial h_0} \cdot \Delta \dot{h}_0 + \frac{\partial i}{\partial \delta_0} \cdot \Delta \dot{\delta}_0 + \frac{\partial M}{\partial T_0} \cdot \Delta \dot{T}_0 + \frac{\partial M}{\partial T_1} \cdot \Delta \dot{T}_1 + \frac{\partial M}{\partial h_8} \cdot \Delta \dot{h}_8 \right),$$

где  $\Delta \dot{U}_1 = \frac{d(\Delta U_1)}{dt}$  — условная символическая запись.

Каждая клетка непрерывного стана взаимодействует с рядом стоящими клетками посредством переменных  $h_0, \delta_0, U_0, T_0, h_1, \delta_1, U_1, T_1$ . Остальные переменные величины (такие, как  $D, M, i$ ) непосредственно во взаимодействии клеток не участвуют. Поэтому целесообразно, линеаризовав уравнения, образующие математическое описание стана (18) и (19), разделив переменные на входные и выходные и разрешив уравнения относительно выходных переменных, применив к полученным выражениям преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, несложными преобразованиями свести систему уравнений одной клетки к виду

$$\Delta \dot{h}_1 = \frac{\partial h_1}{\partial h_0} \cdot \Delta \dot{h}_0 + \frac{\partial h_1}{\partial \delta_0} \cdot \Delta \dot{\delta}_0 + \frac{\partial h_1}{\partial T_0} \cdot \Delta \dot{T}_0 + \frac{\partial h_1}{\partial T_1} \cdot \Delta \dot{T}_1 + \frac{\partial h_1}{\partial h_8} \cdot \Delta \dot{h}_8 ; \quad (20)$$

$$\Delta \dot{\delta}_1 = \frac{\partial \delta_1}{\partial h_0} \cdot \Delta \dot{h}_0 + \frac{\partial \delta_1}{\partial \delta_0} \cdot \Delta \dot{\delta}_0 + \frac{\partial \delta_1}{\partial T_0} \cdot \Delta \dot{T}_0 + \frac{\partial \delta_1}{\partial T_1} \cdot \Delta \dot{T}_1 + \frac{\partial \delta_1}{\partial h_8} \cdot \Delta \dot{h}_8 ; \quad (21)$$

$$T_{эм} \cdot \Delta \dot{U}_1 = \Delta U_1 + Y_1 \cdot \Delta \dot{h}_0 + Y_3 \cdot \Delta \dot{\delta}_0 + Y_5 \cdot \Delta \dot{T}_1 + Y_7 \cdot \Delta \dot{T}_0 + Y_9 \cdot \Delta \dot{h}_8 + \frac{\partial U_1}{\partial t} \cdot K_g \cdot \Delta U + Y_2 \cdot \Delta \dot{h}_0 + Y_4 \cdot \Delta \dot{\delta}_0 + Y_6 \cdot \Delta \dot{T}_1 + Y_8 \cdot \Delta \dot{T}_0 + Y_0 \cdot \Delta \dot{h}_8 ; \quad (22)$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \frac{\partial U_0}{\partial U_1} \cdot \Delta \dot{U}_1 + \frac{\partial U_0}{\partial h_1} \cdot \Delta \dot{h}_1 + \frac{\partial U_0}{\partial \delta_1} \cdot \Delta \dot{\delta}_1 - \frac{\partial U_0}{\partial h_0} \cdot \Delta \dot{h}_0 - \frac{\partial U_0}{\partial \delta_0} \cdot \Delta \dot{\delta}_0 . \quad (23)$$

Здесь, как и в (19),

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{d(\Delta U_1)}{dt} , \quad \Delta \dot{\delta}_1 = \frac{d(\Delta \delta_1)}{dt}$$

и т.д. — условная символическая запись.

Система линейных дифференциальных уравнений (20)+(23) содержит технологические коэффициенты ( $\frac{\partial h_1}{\partial h_0}$ ,  $\frac{\partial v_1}{\partial h_0}$  и т.д.), характеризующие влияние различных возмущений и натяжений на параметры процесса прокатки. Эти коэффициенты представляют собой частные производные функций вида

$$\begin{aligned} h_1 &= \mathcal{Y}(h_0, v_0, T_0, T_1, h_0); \\ v_1 &= \mathcal{Y}(h_0, v_0, T_0, T_1, h_0); \end{aligned}$$

в правые части которых входят лишь входные переменные клетки. Так как получить такие функции в явном виде невозможно, то коэффициенты  $\frac{\partial h_1}{\partial h_0}$ , ... находят как частные производные неявных функций.

В чистовой группе клеток непрерывного мелкосортного стана возможны два режима прокатки: без натяжения полосы в межклетевых промежутках и с натяжением полосы.

Линеаризуя уравнения (17), приняв натяжение между клетями нулевым, сведем систему уравнений межклетевого промежутка для случая прокатки с петлей к виду

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{v}_0(k+1)[L_0(k+1) - c_{0k}] &= \Delta \dot{h}_{1k}[L_{1k}] \\ \Delta \dot{h}_0(k+1)[L_0(k+1) - c_{0k}] &= \Delta \dot{v}_{1k}[L_{1k}] \\ \Delta \dot{T}_0(k+1) &= 0 \\ \Delta \dot{T}_{1k} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Для случая прокатки с натяжением полосы система уравнений межклетевых промежутков будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{v}_0(k+1)[L_0(k+1) - c_{0k}] &= \Delta \dot{h}_{1k}[L_{1k}] \\ \Delta \dot{h}_0(k+1)[L_0(k+1) - c_{0k}] &= \Delta \dot{v}_{1k}[L_{1k}] \\ \Delta \dot{T}_0(k+1) &= \Delta \dot{T}_{1k} \\ \Delta \dot{v}_0(k+1) &= \Delta \dot{v}_{1k} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Совокупность уравнений вида (20)+(23), записанных для каждой из шести клеток стана, и уравнений (24) или (25), записанных для каждого из пяти межклетевых промежутков, образует систему из 38 уравнений, описывающую процесс прокатки в чистовой группе клеток непрерывного мелкосортного стана.

Для анализа установившегося процесса прокатки нет смысла решать систему 38 дифференциальных уравнений. В этом случае, приняв при выводе уравнения скорости оператор дифференцирования  $S = 0$ , положив в уравнения (14) и (15)  $\mathcal{E} = 0$  и используя основное

свойство дифференциала, перейдем непосредственно к приращениям функций. В этом случае вместо системы (20)+(23) и (24) или (25) получим систему 38 уравнений статики.

С использованием матричного представления системы уравнений клетки и межклетевого промежутка разработана методика вычисления передаточных коэффициентов стана, которые достаточно полно описывают свойства стана и являются основой их аналитического исследования.

Анализ процесса прокатки в чистовой группе непрерывного мелко-сортового стана с помощью математической модели осуществляли на ЭВМ "Минск-22" вычислительного центра Челябинского политехнического института.

Программа анализа включает следующие элементы:

- 1) статический расчет номинальных значений параметров процесса прокатки и расчет настройки стана на заданный профиль;
- 2) расчет коэффициентов системы линейных уравнений стана;
- 3) расчет характеристик переходного и установившегося процессов.

Программа реализации математической модели стана составлена в машинных командах для ЭВМ "Минск-22", а также на языке "Алгол-60".

При расчете номинальных значений параметров процесса прокатки по заданным значениям размеров подката и скорости полосы на выходе из стана определялись и выдавались на печать параметры для всех клеток чистовой группы стана в установившемся режиме, принятом за исходный ( $h_1, v_1, G_1, P, U_1, F_1, M_0, M_{np}, \Delta v, \Delta h$  и т.д.), а также величина транспортных запаздываний  $T_k$ .

Кроме программы для определения параметров процесса прокатки, был разработан алгоритм и составлена программа статического расчета настройки стана на заданный профиль. В результате расчета настройки стана определяем значения зазора между валками и оборотов электродвигателя каждой из клеток группы для получения профиля с размерами необходимой точности. Блок-схема расчета настройки стана показана на рис.2. Выполнены расчеты параметров процесса и настройки стана для прокатки различного профильного и марочного сортамента стана.

Частные производные, являющиеся коэффициентами или входящие в коэффициенты системы линейных уравнений стана, определялись с помощью численных методов.

При анализе переходных процессов система дифференциальных уравнений стана разрешалась относительно производных искомым отклонений переменных и интегрировалась при подаче на соответствующий вход системы внешнего воздействия. В связи с тем, что реализация внешних воз-

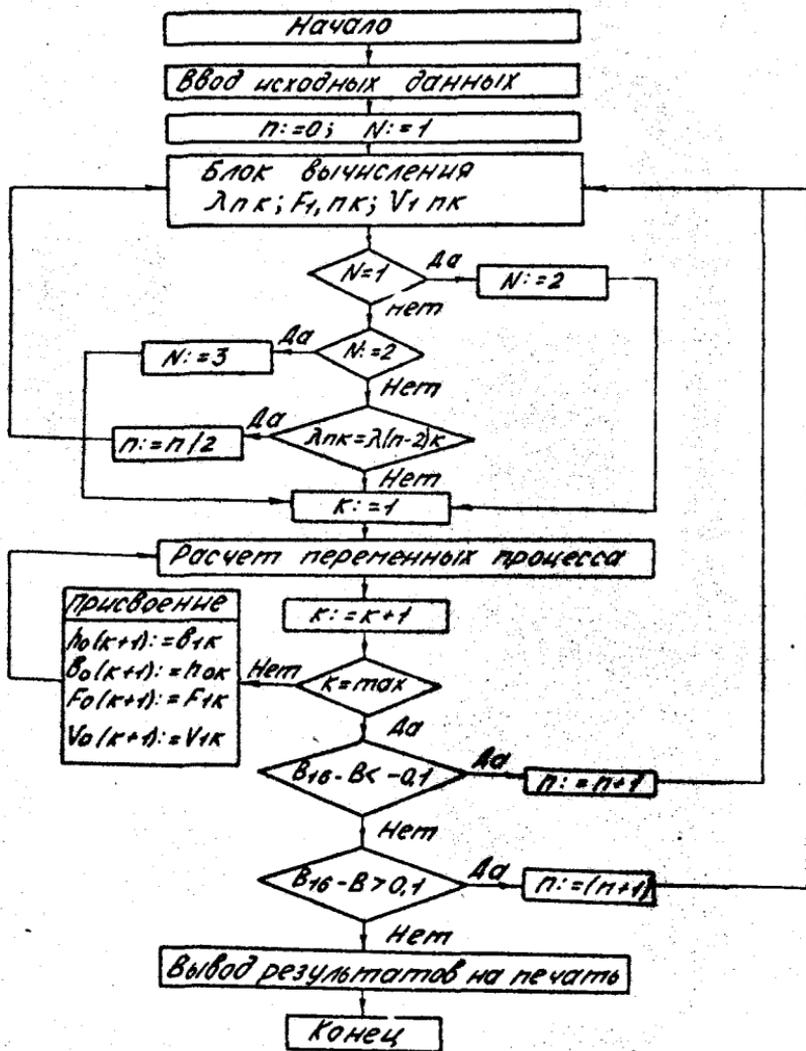


Рис.2. Блок-схема расчета настройки стана

действий с помощью скачкообразного импульса связана с определенными трудностями при дифференцировании, в настоящей работе заданные внешние воздействия осуществляли в виде экспоненциальной зависимости

$$\Delta h = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (26)$$

где  $K$  - коэффициент, характеризующий численную величину воздействия;  
 $t$  - время интегрирования;  
 $T$  - постоянная времени.

В таком случае при дифференцировании выражения (26) по времени имеем

$$\frac{d(\Delta h)}{dt} = \dot{\Delta h} = \frac{K}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (27)$$

Блок-схема реализации на ЭВМ уравнений межклеточных промежутков показана на рис.3.

Интегрирование системы выполняли методом Рунге-Кутты с шагом интегрирования 0,01 с. и выдачей на печать значений переменных на каждом шаге. Продолжительность интегрирования выбирали равной  $2(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5)$  с. Результаты анализа переходных процессов при некоторых внешних воздействиях представлены в виде графиков.

Составлена программа и проведены расчеты передаточных коэффициентов стана по различным возмущающим и управляющим воздействиям. В этом случае для расчета использовали систему уравнений статики в виде системы линейных уравнений в приращениях переменных, полученную из системы линейных дифференциальных уравнений. Левая часть такой системы уравнений (выходные параметры), представленная в матричном виде, записывается в виде квадратной матрицы 38 порядка, правая часть - внешние воздействия - в виде прямоугольной матрицы с 38 строками и 16 столбцами.

Для решения этой системы линейных уравнений использовали метод перекрестного умножения.

Расчитанные величины передаточных коэффициентов стана по различным возмущающим и управляющим воздействиям представлены в виде таблиц. Передаточные коэффициенты стана используются при разработке алгоритмов автоматического управления станом с помощью ЭВМ.

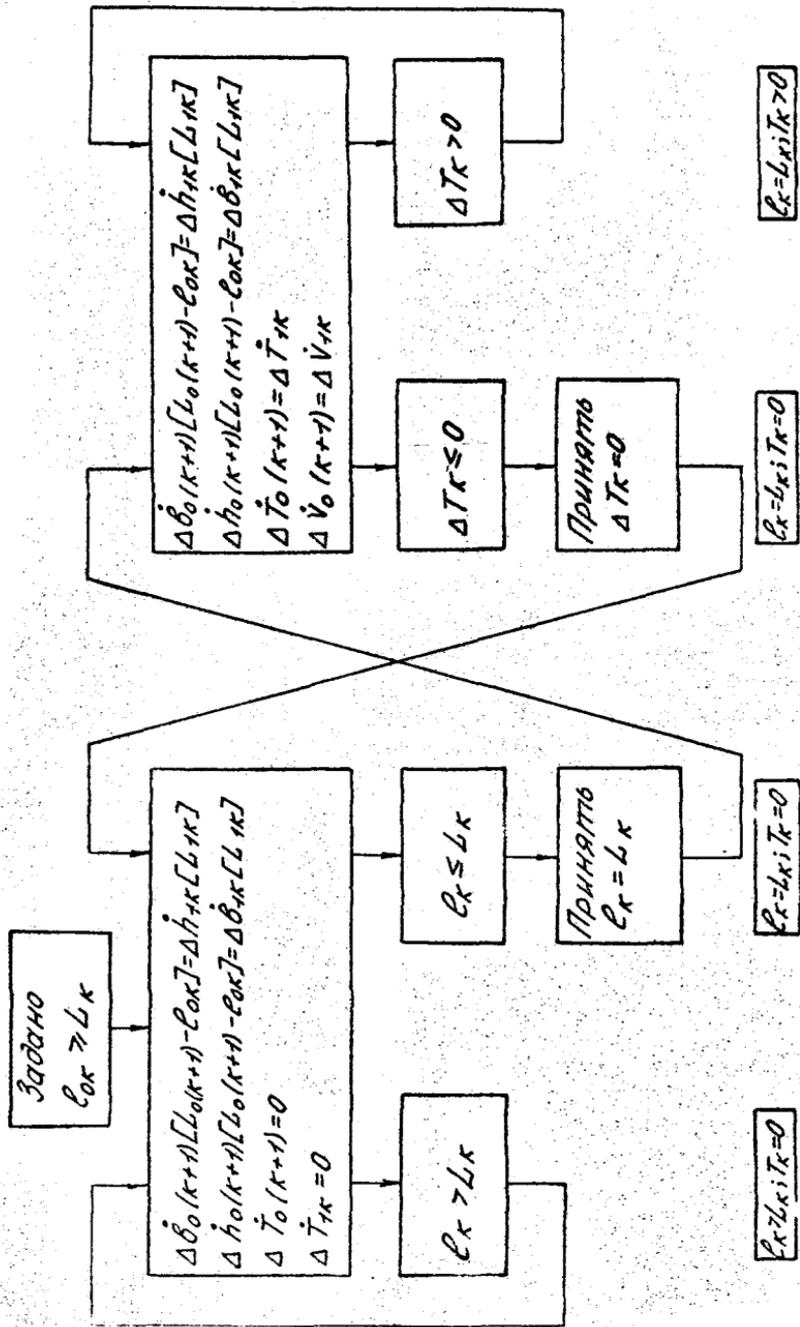


Рис. 3. Блок-схема реализации уравнений межсегментных промежуточных

## Основные выводы

1. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование процесса прокатки на непрерывном мелкосортном стане.
  2. Разработана математическая модель чистой группы стана, учитывающая основные особенности процесса непрерывной сортовой прокатки.
  3. С помощью математической модели на ЭВМ "Минск-22" выполнен анализ установившегося и переходного процессов в стане.
  4. Разработана методика и определены передаточные коэффициенты стана по различным возмущающим и управляющим воздействиям.
  5. Экспериментально определено влияние различных технологических факторов на процесс прокатки и точность геометрических размеров прокатываемых профилей. Полученные зависимости описаны уравнениями регрессии.
  6. Определено влияние перемещения нажимных винтов на устойчивость процесса и изменение размеров готового профиля.
  7. Получены зависимости, описывающие взаимовлияние параметров межклетевых промежутков чистой группы стана. Результаты расчета представлены в виде номограмм.
  8. Разработан и внедрен инструмент для замера износа калибров.
  9. Разработан и внедрен рациональный график смены калибров клетей стана.
  10. Получена статистическая модель для определения износа калибров в зависимости от основных технологических факторов.
- Результаты исследования внедрены на непрерывном мелкосортном стане 250 Челябинского металлургического завода для усовершенствования технологического процесса прокатки, сужения поля допусков, уменьшения количества брака и вторых сортов, снижения расхода валков, сокращения времени простоев при перевалках и настройках стана.
- Экономический эффект внедрения составил 137 тыс. руб.
- Основные положения работы используются в алгоритмах автоматического управления процессом прокатки с помощью вычислительной машины, внедрение которой на стане предполагается в 1976 году.
- Ожидаемый экономический эффект внедрения ЭВМ, согласно предварительным расчетам, составляет 430 тысяч рублей.

Основное содержание работы опубликовано в следующих статьях.

1. Износ валков на непрерывном мелкосортном стане 250. "Металлург", 1972, № 7.
2. Исследование сортовой непрерывной прокатки с помощью ЭВМ. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Теоретические проблемы прокатного производства", Днепропетровск, 1972.
3. Исследование режимов натяжений на непрерывном мелкосортном стане 250 ЧМЗ. "Известия вузов, Черная металлургия", 1974, № 8.
4. Анализ на ЭВМ математической модели непрерывного сортового стана. - Сб. "Применение ЭВМ в металлургии", № 82, М., 1974.
5. Исследование настройки непрерывного мелкосортного стана. - Сб. "Прокатное производство", № 130, Челябинск, 1974.