

УДК 658.52.011.56;621.771.06

А. Н. Миронов, канд. техн. наук О. Е. Потап, канд. техн. наук И. Г. Тригуб

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск*

## МЕТОД НЕПРЯМОЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ НАТЯЖЕНИЯ ПРОКАТА В ОДНОНИТОЧНОЙ ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО МЕЛКОСОРТНОГО СТАНА

*Основной задачей автоматизации непрерывных мелкосортных станов является настройка и поддержание рационального скоростного режима прокатки, а также минимизация потерь металла. В статье проанализированы проблемы управления скоростным режимом прокатки на непрерывных мелкосортных станах и рассмотрены существующие методы оценки уровня натяжения проката. Полученные в ходе исследований результаты компьютерного имитационного моделирования подтвердили идею использования сигнала напряжения  $\sigma_{рп}$  с выхода регулятора петли в промежутке между группами клетей в качестве информации о величине суммарной вытяжки в непрерывной черновой группе клетей. Предложен метод не прямой оценки величины натяжения в черновой группе клетей НМС.*

**Ключевые слова:** непрерывный мелкосортный стан, натяжение, вытяжка, прокат, автоматизация, черновая группа клетей.

### Введение

Сортамент выпускаемой продукции на непрерывных мелкосортных прокатных станах (НМС) включает в себя широкий спектр профилей [1]. В авиастроении мелкосортный профиль востребован при производстве профиля для пластин коллектора — одного из основных и наиболее ответственных узлов тягового двигателя постоянного тока. При недостаточно высоком качестве обработки пластин коллектора, нестабильности геометрических размеров сечения, а также в случае наличия на их поверхностях вмятин и выступов, неизбежно искрение щеток и повреждение двигателя. К причинам столь низкого качества пластин можно отнести влияние ряда технологических возмущений в ходе прокатки (изменение температуры, размеров и механических свойств заготовки). Необходимо комплексное изучение, анализ и совершенствование существующих способов управления технологическим процессом прокатки.

### Состояние вопроса и постановка задачи

Наиболее эффективным каналом управления поперечными размерами при производстве мелкосортных профилей на НМС является корректировка скорости вращения валков клетей [1]. Подстройка скоростного режима прокатки невозможна без оценки величины натяжения проката [2]. Сложность корректировки скорости вращения валков в зависимости от изменения величины натяжения заключается в отсутствии соответствующих измерителей фактических разме-

ров проката и величины натяжения [1, 2]. Целью данной работы является определение величины натяжения проката при изменении возмущающих параметров процесса прокатки в однониточной черновой группе клетей НМС.

### Анализ публикаций по теме исследования

Анализ литературных источников показывает, что исследователи уделяют наибольшее внимание проблемам управления скоростным режимом однониточных чистовых групп клетей [1-5]. Значительно меньше изучены вопросы управления скоростным режимом прокатки в черновой группе клетей. Вместе с тем оценка величины натяжения в черновой группе клетей позволит усовершенствовать работу системы автоматического регулирования скорости (САРС) вращения валков и таким образом минимизировать нестабильность площади поперечного сечения подката на входе в чистовую группу клетей. На НМС в САРС применяется не прямой метод оценки величины натяжения [4], основанный на измерении якорного тока электродвигателей, изменение которого пропорционально изменению усилия и момента прокатки. Недостаток метода заключается в скачкообразном изменении усилия и момента прокатки, которое вызвано колебаниями температуры проката, размеров его поперечного сечения по длине, влиянием натяжения при заходе полосы в следующую клеть.

Существует метод регулирования натяжения по изменению величины якорного тока с ограничением времени регулирования [5]. При прокатке на двухниточных станах применение дан-

ного метода осложняется дополнительным изменением усилия и момента прокатки, вызванного заполнением соседней нитки полосой.

Исходя из перечисленных недостатков известных методов оценки и регулирования натяжения, разработка и внедрение альтернативного, более точного, метода оценки является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит усовершенствовать работу САРС вращения валков черновой группы клетей.

**Описание исследования**

Известно, что при увеличении натяжения площадь поперечного сечения уменьшается из-за неполного заполнения калибров металлом [3]. Это приводит к увеличению вытяжки прокатываемой полосы  $\lambda$  — отношению площади поперечного сечения заготовки  $S_z$  к площади поперечного сечения проката  $S_7$  на выходе из седьмой клетки черновой группы (рис. 2)

$$\lambda = \frac{S_z}{S_7} \tag{1}$$

Кривая изменения площади поперечного сечения  $S_7(t)$  по длине проката (рис. 1) принимает характерную «лыжеобразную» форму, так как передний и задний концы проката из-за действия натяжения будут иметь большее поперечное сечение, чем его середина, что, в свою очередь, связано с большим натяжением в середине проката и меньшим натяжением на краях [4].

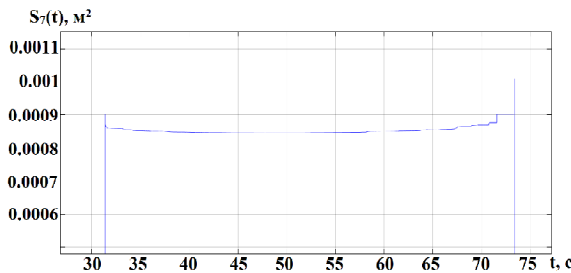


Рис. 1. Кривая изменения площади поперечного сечения проката на выходе из черновой группы клетей

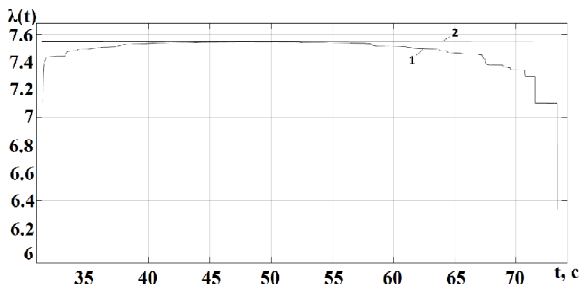


Рис. 2. Кривые изменения коэффициента вытяжки: 1 — при прокатке с натяжением; 2 — при прокатке без натяжения

Технологически затруднительно непосредственно измерить вытяжку прокатываемой заготовки [6]. Поэтому для решения поставленной задачи может быть использована информация о величине свободной петли проката в промежутке между черновой и чистовой группами клетей [2, 4]. Изменения вытяжки будут проявляться в изменениях величины этой петли  $\Delta l_n$ , в связи с чем для анализа изменения вытяжки была предложена идея использования сигнала напряжения  $u_{pn}$  с выхода регулятора петли (РП) системы автоматического регулирования петли (САРП) в промежутке между группами клетей (рис. 3) [4].

Ввиду сложности проведения экспериментальных исследований на реальном промышленном объекте анализ взаимосвязи между напряжением  $u_{pn}$  и вытяжкой  $\lambda$ , с учетом влияния возмущающих воздействий на сигнал  $u_{pn}$ , выполнен на известной динамической модели процесса прокатки в черновой группе непрерывного мелко-сортового стана [7].

Фрагмент структурной схемы модели (рис. 4) [7] содержит подсистемы моделирования процесса

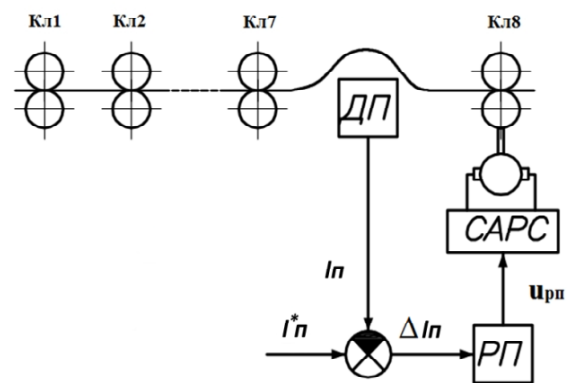


Рис. 3. Система автоматического регулирования петли:  $I_n^*$  — заданное значение длины стрелы петли,  $I_n$  — фактический размер стрелы петли (сигнал от датчика петли ДП),  $\Delta I_n$  — рассогласование, поступающее на вход РП

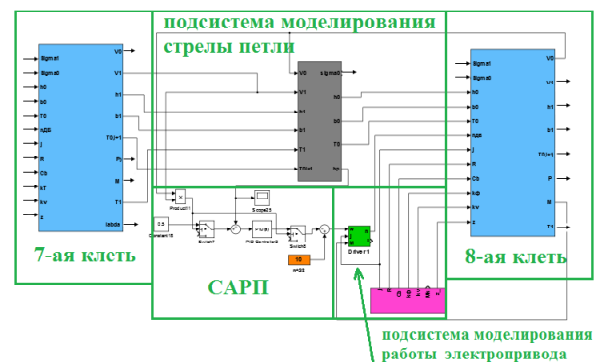


Рис. 4. Фрагмент схемы динамической модели в пакете MATLAB Simulink

деформации металла в последней черновой (7-я клеть) и первой чистовой клетях (8-я клеть), подсистему моделирования изменения стрелы петли металла в межклетевом промежутке, подсистему моделирования работы электропривода чистовой клетки с системой подчиненного регулирования частоты, а также модель САРП.

Динамическая модель реализована в Matlab/Simulink. В качестве задающих воздействий использованы входные параметры прокатки профиля  $\varnothing 8$  мм в черновой и чистовой группах клетей мелкосортного стана 250-1 ОАО «Арселор Миттал Криковой Рог» [7]. При этом в качестве технологических возмущений заданы линейное изменение температуры по длине заготовки (от 1175 °С до 1125 °С), а также изменение размеров заготовки в пределах  $\pm 5\%$  [7]. Полученные в результате моделирования осциллограммы изменения суммарной вытяжки  $\lambda$  и напряжения на выходе регулятора петли  $u_{pn}$  приведены на рис. 5 [4].

Анализ характера изменения этих параметров выполнен путем сопоставления («наложения») указанных осциллограмм (см. рис. 5) [4]. Поскольку значения суммарной вытяжки  $\lambda$  и напряжения на выходе регулятора петли  $u_{pn}$  отличаются на порядок, для сопоставления осциллограмм введен коэффициент масштабирования значений выходного напряжения регулятора петли по оси ординат.

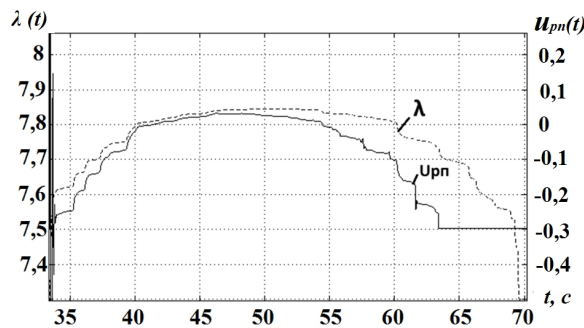


Рис. 5. Осциллограммы изменения суммарной вытяжки  $\lambda$  и напряжения на выходе регулятора петли  $u_{pn}$

Выполненная авторами работы [4] адаптация и анализ характера изменения осциллограмм вытяжки  $\lambda$  и напряжения  $u_{pn}$  позволяют судить об их качественном соответствии. Это свидетельствует о наличии взаимосвязи между напряжением на выходе регулятора петли и суммарной вытяжкой в непрерывной черновой группе клетей.

Сигнал напряжения  $u_{pn}$  с выхода регулятора петли имеет ступенчатую форму (рис. 5). Каждый переход характеризует момент входа полосы в  $i$ -ю клеть и имеет различное значение, что объясняется влиянием натяжения. Для последующей локализации очага роста натяжения проката необходима оценка величины на выходе из каждой клетки. Эта задача технически реализуема путем применения датчиков наличия проката в каждой клетки. Результат имитационного моделирования работы этих датчиков для получения временных диаграмм нахождения полосы в каждой клетки представлен на рис. 6.

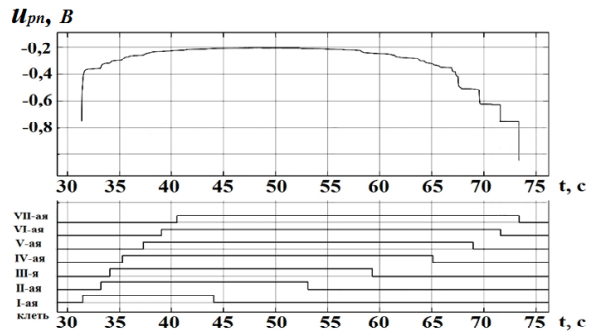


Рис. 6. Временная диаграмма нахождения полосы в клетях

Изменение вытяжки  $\lambda$ , а, следовательно, и сигнала с выхода регулятора  $u_{pn}$ , связано с изменением натяжения под действием внешних возмущающих факторов (изменения геометрических размеров подката и температуры).

Для анализа изменения натяжения и оценки влияния основных технологических возмущений

Таблица 1 – Пример плана однофакторного эксперимента для седьмой клетки

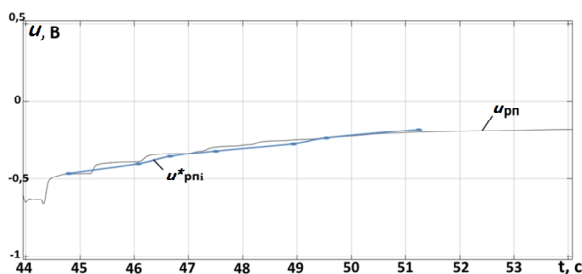
| № | Температура $T$ , °С | Высота $h$ , м | Ширина $b$ , м | Скорость валков $\omega_7$ , об/с | Натяжение $\sigma_{67}$ , Н/мм <sup>2</sup> | Сигнал напряжения $u_{pn}$ , В |
|---|----------------------|----------------|----------------|-----------------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | 1150                 | 0,08           | 0,08           | 6,02                              | 18,91                                       | -0,3                           |
| 2 | 1125                 | 0,08           | 0,08           | 6,02                              | 20,36                                       | -0,216                         |
| 3 | 1175                 | 0,08           | 0,08           | 6,02                              | 17,55                                       | -0,384                         |
| 4 | 1150                 | 0,076          | 0,08           | 6,02                              | 19,7  | -0,246                         |
| 5 | 1150                 | 0,084          | 0,08           | 6,02                              | 18,19                                       | -0,349                         |
| 6 | 1150                 | 0,08           | 0,076          | 6,02                              | 21,59                                       | -0,122                         |
| 7 | 1150                 | 0,08           | 0,084          | 6,02                              | 16,34                                       | -0,485                         |
| 8 | 1150                 | 0,08           | 0,08           | 5,8                               | 19,95                                       | -0,225                         |
| 9 | 1150                 | 0,08           | 0,08           | 6,23                              | 17,87                                       | -0,377                         |

на величину сигнала с выхода регулятора петли  $u_{pn}$  использованы методы планирования эксперимента. Разработан график планов экспериментов для каждой из семи клетей (табл. 1), и проведены машинные эксперименты на вышеуказанной динамической модели процесса прокатки в черновой группе НМС. В результате получена система уравнений – линейная многомерная математическая модель, которая связывает напряжение с выхода регулятора петли  $u_{pni}$  (в момент появления проката в  $i$ -й клетке) с температурой  $T$ , размерами заготовки (шириной  $h$  и высотой  $b$ ) и скоростью вращения валков клетки  $\omega_i$ .

Коэффициенты линейной модели определены на основе обработки данных всех машинных экспериментов методами многомерной линейной регрессии (методом наименьших квадратов).

$$\left. \begin{aligned} u_{pn1}^* &= -0,003 \cdot T - 12,88 \cdot h - 45,38 \cdot b - 0,35 \cdot \omega_1 + 10,35 \\ u_{pn2}^* &= -0,003 \cdot T - 13,63 \cdot h - 47,13 \cdot b - 0,31 \cdot \omega_2 + 10,53 \\ u_{pn3}^* &= -0,003 \cdot T - 14 \cdot h - 48,59 \cdot b - 0,05 \cdot \omega_3 + 9,16 \\ u_{pn4}^* &= -0,003 \cdot T - 13 \cdot h - 50,4 \cdot b - 0,06 \cdot \omega_4 + 9,03 \\ u_{pn5}^* &= -0,003 \cdot T - 14 \cdot h - 50 \cdot b - 0,03 \cdot \omega_5 + 8,95 \\ u_{pn6}^* &= -0,003 \cdot T - 15 \cdot h - 52,3 \cdot b - 0,16 \cdot \omega_6 + 9,96 \\ u_{pn7}^* &= -0,003 \cdot T - 14,9 \cdot h - 51,9 \cdot b - \omega_7 + 16,14 \end{aligned} \right\} (2)$$

Таким образом, полученная система уравнений (2) позволяет вычислить значения напряжения с выхода регулятора петли  $u_{pni}$  (в момент появления проката в  $i$ -й клетке) для заданных параметров прокатки [7]. Прогнозируемый график изменения  $u_{pni}^*$  при заполнении прокатом семи клетей черновой группы для заданных параметров ( $T = 1150$  °С,  $h = 0,08$  м,  $b = 0,08$  м) представлен на рис. 7.



**Рис. 7.** Изменение напряжения с выхода регулятора петли  $u_{pn}$  при заполнении прокатом семи клетей:  
 $u_{pn}$  – измеренное,  $u_{pni}^*$  – прогнозируемое (расчетное)

Предлагаемый метод не прямой оценки состоит в сравнении прогнозируемого (расчетного) значения сигнала  $u_{pni}^*$  с измеренным на выходе регулятора петли  $u_{pn}$  (см. рис. 7).

$$\Delta u_{pni} = u_{pn} - u_{pni}^* \quad (3)$$

По величине рассогласования (3) можно косвенно оценить величину натяжения проката в каждом межклетевом промежутке.

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Полученные в ходе исследований результаты компьютерного имитационного моделирования подтвердили идею использования сигнала напряжения  $u_{pn}$  с выхода регулятора петли САРП в промежутке между группами клетей для оценки суммарной вытяжки в непрерывной черновой группе. Получена временная диаграмма наличия полосы в каждой клетке черновой группы, проанализирован характер изменения вытяжки на выходе из каждой клетки. Предложен метод не прямой оценки величины натяжения в черновой группе клетей НМС. Дальнейшие исследования метода будут проведены при моделировании процесса двухниточной прокатки.

### Список литературы

1. Пустыльник М. П. Системы регулирования межклетевых усилий на однониточных сортовых прокатных станах / М. П. Пустыльник, В. Н. Куваев, А. П. Егоров // АСУТП и средства автоматизации черной металлургии на базе микропроцессорной техники. – М.: Металлургия, 1986. – С. 74–79.
2. Егоров В. С. Модель передачи межклетевых усилий по стану при непрерывной сортовой прокатке / В. С. Егоров, О. Е. Потап // Теоретические проблемы прокатного производства: тез. докл. IV Всесоюз. науч.-техн. конф., Ч. I. – Днепропетровск, 1988. – С. 203–205.
3. Бадюк С. И. Текущее состояние сортопрокатного производства Украины / С. И. Бадюк, Д. Г. Паламарь, В. Г. Раздобреев // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – № 46. – С. 116–126.
4. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография / А. С. Бешта, В. Н. Куваев, О. Е. Потап, А. П. Егоров. – Днепропетровск: Журфонд, 2014. – 283 с., ил.
5. А. с. 1397110 (СССР). Устройство стабилизации натяжения проката на непрерывном стане / А. П. Егоров, В. С. Егоров, М. П. Пустыльник В. И. Стахно, В. С. Ткачев (СССР). –

- № 4097500 ; заявл. 16.07.1986 ; опубл. 23.05.1988 ; Бюл. № 19.
6. Миронов А.Н., Потап О.Е., Тригуб И.Г., Современные проблемы производства проката на непрерывных мелкосортных станах. — Днепропетровск: Системные технологии: 2016. — С. 68-72.
7. Потап О. Е. Информационное обеспечение системы принятия решений о качестве настройки режима прокатки в черновой группе клетей мелкосортного стана / Потап О. Е., Егоров А. П., Меледин Н. В. // Інформаційне забезпечення систем прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах. — Донецьк. — 2013. — С. 315–323.

Поступила в редакцію 18.05.2016

**Миронов О.М., Потап О.Ю., Тригуб І.Г. Метод непрямої оцінки величини натягу прокату в одностандовій чорновій групі клітей безперервного дрібносортового стану**

*Основним завданням автоматизації безперервних дрібносортовних станів є налагодження та підтримка раціонального швидкісного режиму прокатки, а також мінімізація втрат металу. У статті проаналізовано проблеми управління швидкісним режимом прокатки на безперервних дрібносортовних станах і розглянуто існуючі методи оцінки рівня натягу прокату. Отримані під час досліджень результати комп'ютерного імітаційного моделювання підтвердили ідею використання сигналу напруги  $u_{рп}$  з виходу регулятора петлі проміжку між групами клітей в якості інформації про величину сумарної витяжки в безперервній чорновій групі клітей. Запропоновано метод непрямої оцінки величини натягу в чорновій групі клітей БДС.*

**Ключові слова:** безперервний дрібносортовний стан, натяг, витяжка, прокат, автоматизація, чорнова група клітей.

**Mironov A., Potap O., Trigub I. The indirect method of estimating the value of the tension in the single-stranded roughing mill continuous light-section mill**

*The main task of the automation of continuous small-section mill is to set up and maintaining a rational high-speed mode of rolling, as well as the minimization of metal losses. The article analyzes the problems of management of high-speed rolling mode on continuous small-section mills and reviewed the existing methods of valuation rolling tension level. The results of the computer simulation were obtained. It was confirmed the idea of using the output signal voltage  $u_{рп}$  from loop controller between groups stands as information about the amount of total stretching in cages continuous roughing group.*

**Key words:** continuous small-section mill, tension, extractor hood, rolling, automation, roughing mill stands.