

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

В статье освещены вопросы описания механизма взаимодействия между прокатными клетями стана непрерывной холодной прокатки через прокатываемую полосу. Произведено описание прокатываемой полосы как объекта управления с упругими и демпфирующими свойствами. Рассмотрены особенности формирования натяжения в межклетьевом промежутке. Отмечено влияние на межклетьеовое натяжение позиций валков взаимодействующих клеток. Затронут вопрос соотношения скоростей вращения прокатных валков в смежных клетях с учетом опережения. Полученное математическое описание позволило создать модель для исследования свойств рассматриваемой системы. Произведено математическое моделирование в пакете Matlab 2011, приложение Simulink. Результаты моделирования сопоставлены с реальными осциллограммами работы клеток №3 и 4 стана 2030 ПХПП «НЛМК». Осциллограммы работы стана сняты программой FADEX.

**Ключевые слова:** упругость, холодная прокатка, натяжение, опережение, моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Прокатные станы холодной прокатки являются высокопроизводительными агрегатами с высокой степенью автоматизации. Для поддержания конкурентоспособности выпускаемой продукции к качеству прокатываемой полосы предъявляются серьезные требования. Обеспечение качества полосы зависит от точности поддержания технологических параметров прокатки. Оптимизация систем управления этих параметров зачастую невозможна на рабочем стане, поэтому важно максимально адекватно описывать объект управления, что позволит методами математического моделирования и теории автоматического управления синтезировать нужную САУ технологического параметра.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Одним из основных параметров прокатки является натяжение в межклетьевом промежутке. Оно характеризует взаимосвязь электромеханических систем предыдущих и последующей клеток. Однако следует принимать во внимание, что натяжение между клетями создается через стальную полосу, которую следует рассматривать как упругий элемент. Такой взгляд на формирование натяжения описан в литературе [1, 2]. Упругость полосы принято называть упругостью второго рода. Упругости в линиях прокатных станов зачастую оказывают влияние на динамику протекания технологических процессов и процессов в системах электропривода [8, 9, 11, 14].

Межклетьеовое натяжение описывается следующим выражением [2]:

$$F_{\Sigma} = F' + F'' + F''' \quad (1)$$

где  $F' = -\frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot d'(t)$  – компонента натяжения, создаваемая ГНУ предыдущей клетью;

$d'(t)$  – раствор валков предыдущей клетки;  $K_1, T_1$  – технологический коэффициент и постоянная времени;

$F'' = \frac{K_2}{T_2 \cdot p + 1} \cdot d''(t)$  – компонента натяжения, созда-

ваемая ГНУ клетки;  $d''(t)$  – раствор валков клетки;  $K_2, T_2$  – технологический коэффициент и постоянная

времени;  $F''' = \left( \frac{C_{i+1}}{p} + B_{i+1} \right) \cdot [v_{i+1} - v_i \cdot (1 + \varepsilon_{i+1})]$  –

компонента натяжения, создаваемая разностью скоростей  $i+1$ -й и  $i$ -й клетями, в которой  $C_{i+1}$  – жесткость полосы;  $B_{i+1}$  – коэффициент демпфирования;  $v_i$  – скорость полосы  $i$ -й клетки;  $v_{i+1}$  – скорость полосы  $i+1$ -й клетки;  $\varepsilon_{i+1}$  – относительное удлинение полосы в межклетьевом промежутке.

Жесткость полосы [3]

$$C_{i+1} = \frac{h_i \cdot b \cdot E}{L_{i+1}} \quad (2)$$

где  $h_i$  – толщина полосы в межклетьевом промежутке;  $b$  – ширина полосы в межклетьевом промежутке;  $L_{i+1}$  – длина полосы в межклетьевом промежутке;  $E$  – модуль упругости полосы.

Относительное удлинение полосы определяется по формуле [2]

$$\varepsilon_{i+1} = \frac{1}{L_{i+1} \cdot C_{i+1}} \cdot \frac{1}{\left( 1 + \frac{B_{i+1}}{C_{i+1}} \cdot p \right)} \cdot F''' \quad (3)$$

Скорость полосы на выходе из клетки [3]:

$$v_i = v_i^* \cdot (1 + S_i) \quad (4)$$

где  $v_i^*$  – скорость валка;  $S_i$  – опережение металла на выходе из валков.

Соотношение линейной скорости валка и угловой, об/мин:

$$v_{i+1}^* = \frac{\pi \cdot R \cdot n_{i+1}}{30} \quad (5)$$

Определим опережение по формуле Головина-Дрездена [4]

$$S_{i+1} = \gamma_{hi+1}^2 \cdot (R/h_{i+1}) \quad (6)$$

где  $\gamma_{ni/i+1}$  – нейтральный угол в межвалковом промежутке.

Линейные скорости валков соотносятся следующим образом [4]:

$$(1 + S_{i+1}) \cdot v_{i+1}^* \cdot h_{i+1} \cdot b_{i+1} = v_i^* \cdot h_i \cdot b_i \cdot (1 + S_i), \quad (7)$$

где  $h_i, h_{i+1}$  – толщины металла на выходе  $i$ -й и  $i+1$ -й клеток.

Последнее уравнение выражает основной принцип непрерывной прокатки: постоянство объема металла, проходящего в межклетевых промежутках в единицу времени. Данный принцип позволяет рассчитывать базовое значение задания на скорость вращения прокатных электроприводов [5, 6]. Однако финальное задание на скорость вращения привода клетки зависит от множества факторов и представляет собой сумму добавок от различных регуляторов в зависимости от принципа построения и точек воздействия систем регулирования технологических параметров стана.

Расчет задания скорости на привод клетки производится вычислительной машиной верхнего уровня совместно с основными технологическими параметрами прокатного стана [7].

Обобщим полученные формулы:

$$\begin{cases} F_{\Sigma} = F^{\cdot} + F^{\ddot{}} + F^{\ddot{}}; \\ F^{\cdot} = -\frac{\kappa_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot d^{\cdot}(t); \\ F^{\ddot{}} = \frac{\kappa_2}{T_2 \cdot p + 1} \cdot d^{\ddot{}}(t); \\ F^{\ddot{}} = \left( \frac{C_{ii+1}}{p} + B_{ii+1} \right) \cdot [v_{i+1} - v_i \cdot (1 + \varepsilon_{i+1})]; \\ C_{ii+1} = h_i \cdot b \cdot E / L_{i,i+1}; \\ \varepsilon_{i+1} = \frac{1}{L_{i,i+1} \cdot C_{ii+1}} \cdot \frac{1}{\left( 1 + \frac{B_{ii+1}}{C_{ii+1}} \cdot p \right)} \cdot F^{\ddot{}}; \\ v_i = v_i^* \cdot (1 + S_i); \\ S_{ii+1} = \gamma_{ni/i+1}^2 \cdot (R / h_{ii+1}); \\ (1 + S_{i+1}) \cdot v_{i+1}^* \cdot h_{i+1} \cdot b_{i+1} = v_i^* \cdot h_i \cdot b_i \cdot (1 + S_i); \\ v_{i/i+1}^* = \frac{\pi \cdot R_1 \cdot n_{i/i+1}}{30}. \end{cases} \quad (8)$$

Структурная схема взаимосвязанных электро-механических систем прокатных клеток представлена на рис. 1.

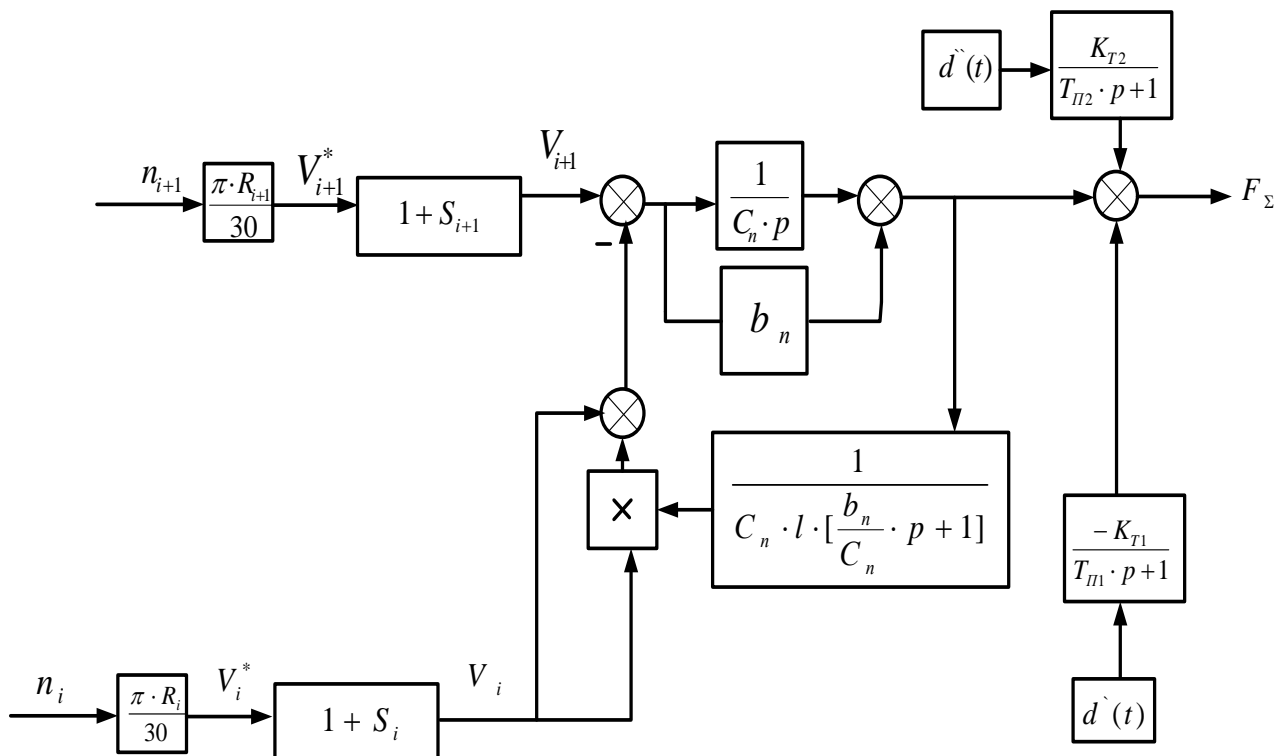


Рис. 1. Структурная схема

В качестве входных воздействий используются угловые скорости валков прокатных клетей  $i$ ,  $i+1$  и положения нажимных механизмов.

Произведем моделирование в пакете Matlab согласно структурной схеме на примере реального объекта: рассмотрим взаимодействие клетей №3 и 4 стана бесконечной холодной прокатки 2030 НЛМК. Однако в качестве входных воздействий будут уже линейные скорости валков.

На **рис. 2, 3** представлены графики линейных скоростей.

Графики позиций гидронажимных механизмов представлены на **рис. 4, 5**.

На **рис. 6** представлены графики натяжений: полученного в ходе моделирования и снятый с реального объекта.

На **рис. 6** видно, что смоделированное натяжение имеет высокую сходимость со средним значением реального натяжения, однако в динамических режимах имеется некоторое расхождение, обусловленное общей перестройкой и адаптацией системы управления верхнего уровня стана «2030», вызванное прохождением «толстой головы» - сварного шва, связывающего два рулона.

В режиме прохождения «толстой головы», зачастую, не соблюдается необходимая толщина, а также остальные параметры прокатки, такие как усилие прокатки, натяжение и др. Участки рулона до и после

сварного шва, по технологическим условиям, не являются ликвидной продукцией и подлежат вырубке и переплавке.

Полученный способ учета взаимосвязи электро-механических систем прокатных клетей через полосу позволит синтезировать адаптивные системы управления технологическими параметрами прокатки и перспективными системами электропривода [10, 12, 13].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было произведено математическое описание механизма взаимодействия двух прокатных клетей стана холодной прокатки на основе представления о прокатываемом материале как об упругости.

Натяжение между исследуемыми клетями, полученное в ходе моделирования, имеет высокую сходимость с реальным натяжением. Однако в динамическом режиме имеется некоторое отклонение, связанное с особенностями работы АСУТП стана «2030» при прохождении «толстой головы» прокатываемого рулона. Однако данная особенность не вносит существенных погрешностей в общий характер исследуемых процессов.

Сопоставление графиков моделирования и реальных графиков позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели.

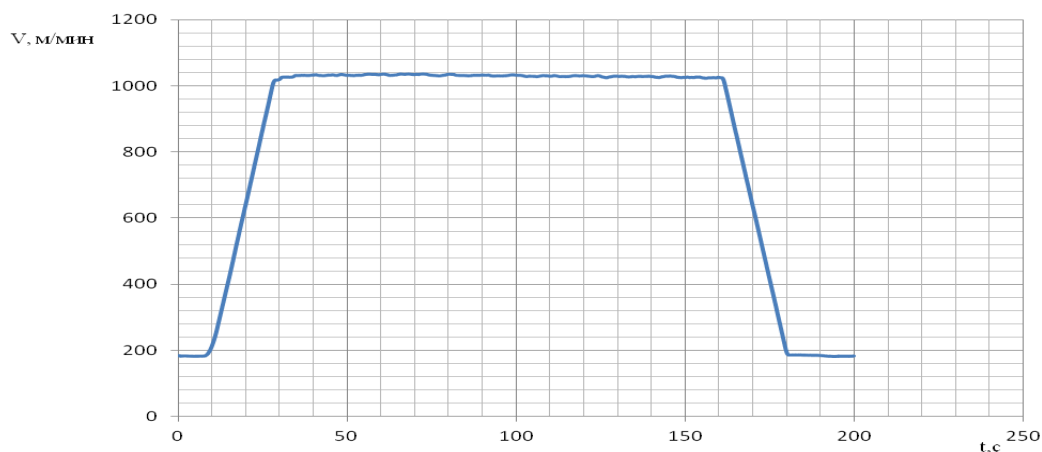


Рис. 2. Линейная скорость валков клетки №4

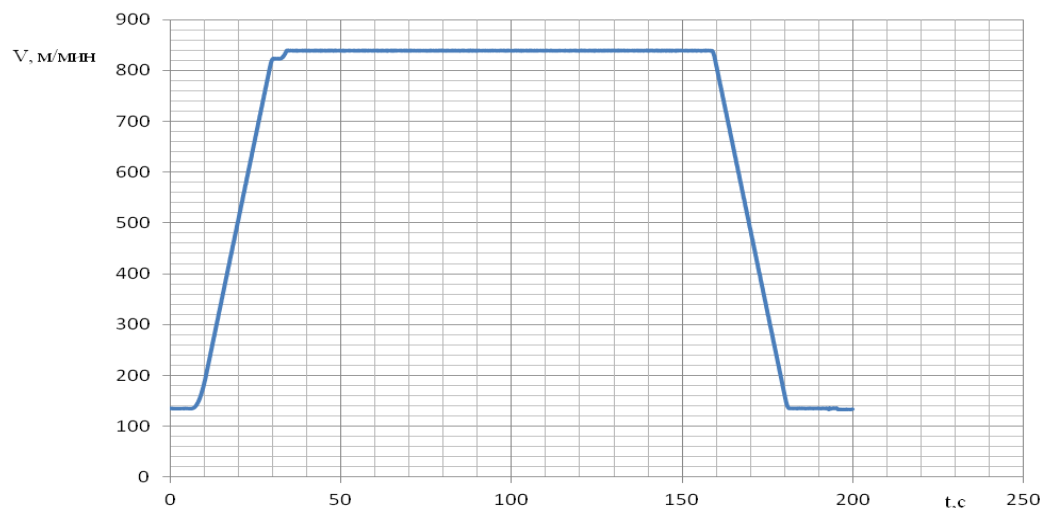


Рис. 3. Линейная скорость валков клетки №3

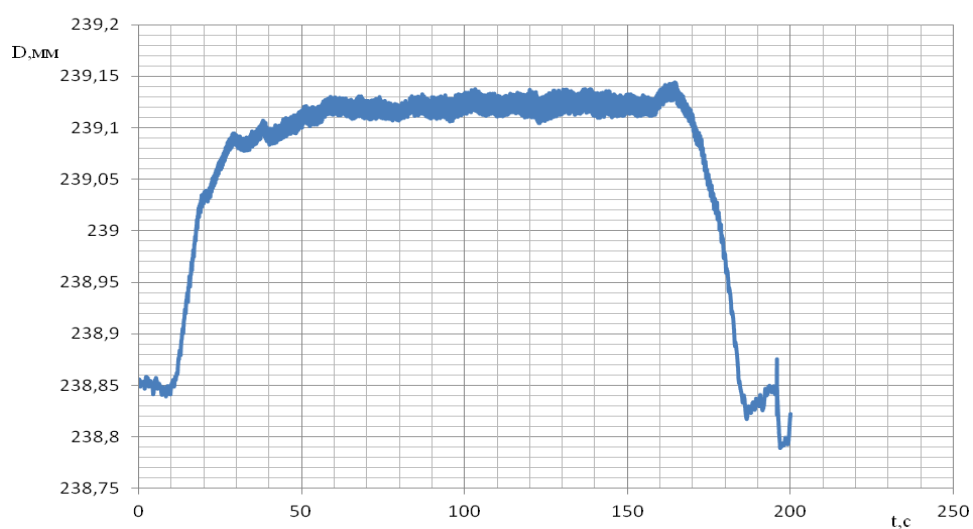


Рис. 4. График изменения позиции ГНУ клетки №4

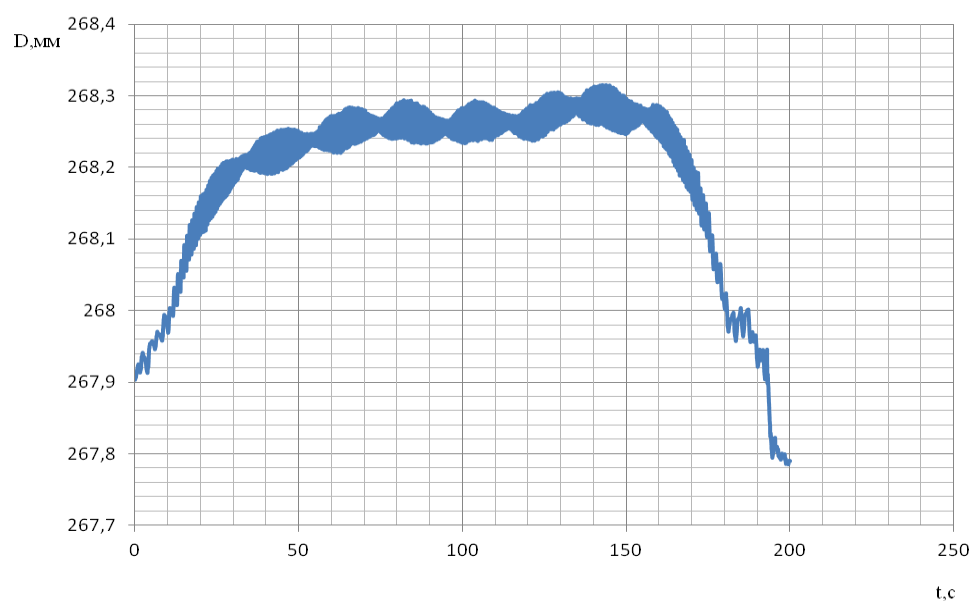


Рис. 5. График изменения позиции ГНУ клетки №3

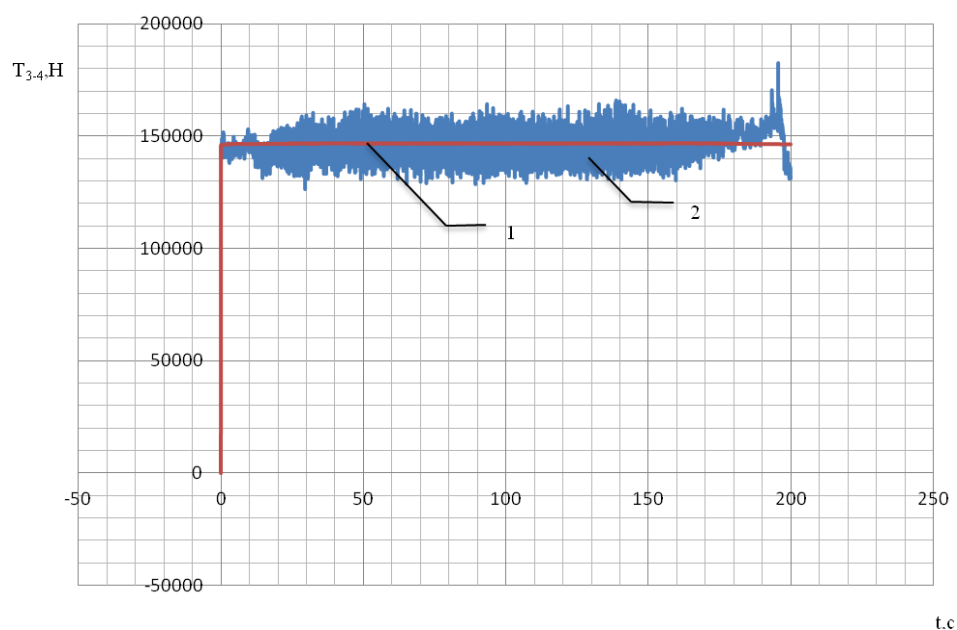


Рис. 6. Графики натяжения между клетями №3 и 4:  
1 - натяжение, полученное в ходе моделирования;  
2 - натяжение, снятое с реального объекта

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями : учеб. для вузов. Л.: Энергия, 1979. 160 с.
2. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 576 с.
3. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М: Металлургия, 1975. 328 с.
4. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки: учеб. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
5. Коцарь С. Л. Динамика процессов прокатки. М.: Металлургия, 1997. 256 с.
6. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. Теория прокатки: справочник. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
7. Бройдо Б.С. Синтез систем автоматического управления непрерывными станами холодной прокатки. М.: Металлургия, 1978. 160 с.
8. Иванченко Ф.К., Красношарпа В.А. Динамика металлургических машин. М.: Металлургия, 1983. 295 с.
9. Лехов О.С. Динамические нагрузки в линии приво-

да обжимных станов. М.: Машиностроение, 1975. 184 с.

10. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Оценка соотношения составляющих момента нагрузки при расчете вращающего момента электродвигателя // Электрика. 2012. №10. С. 31-33.
11. Мещеряков В.Н., Мигунов Д.В. Математическое моделирование способа снижения динамических нагрузок электропривода черновой клети прокатного стана // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. №3. С. 21-26.
12. Мещеряков В.Н., Байков Д.В. Иммитационная модель асинхронного электропривода на базе матричного преобразователя частоты // Вестник ЛГТУ. 2015. №3(25). С. 12-18.
13. Автоматическая система управления синхронным электроприводом черновой клети прокатного стана для режима работы с минимизацией потерь энергии / Мещеряков В. Н., Мигунов Д.В., Мещерякова О.В. // Вести высш. учебных заведений Черноземья. 2012. №1. С. 23-28.
14. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971. 380 с.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL OF INTERCONNECTED ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF STANDS OF CONTINUOUS COLD ROLLING MILL

Meshcheryakov V.N., Tolcheev V.M.

The article describes the algorithm of interaction between rolling stands of a mill of continuous cold rolling through the rolled strip. There is a description of the processed strip as an object of control with elastic and damping properties. Features of interstand tension forming are considered. The influence of rolls position of the adjacent stands on the interstand tension was studied. The authors analyzed the interrelation of speeds of rolls rotation in the adjacent stands taking forward slip into account. The obtained mathematical description made it possible to develop a model to study the properties of considered system. The mathematical modelling was performed in 2011 Matlab package using Simulink application. The results of modelling are compared with real oscillograms of stand no.3 and stand no.4 operating at 2030 PHPP mill of «NLMK». Oscillograms of the mill operation were taken using FADEX program.

**Keywords:** elasticity, cold rolling, tension, forward slip, modeling.

REFERENCES

1. Bortsov U.A., Sokolovsky. G. G. *Tiristonye sistemy elektroprivoda s uprugimi svyaziami: uchebnik dlya vuzov* [Thyristor Systems of Electric Drive with Elastic Linkage], Leningrad, *Energiya* [Energy], 1979, 160 p.
2. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. *Avtomatizirovannyi elektroprivod tipovykh promyshlennyykh mekhanizmov : uchebnik dlya vuzov* [Automated Electric Drive of Typical Industrial Mechanisms and Technological Complexes]. Moscow, Publishing centre Academy, 2007, 576 p.
3. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak object avtomatizatsyi* [Continuous Mills as Object of Automation], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1975, 328 p.
4. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotjan S.E. *Teoriya prodolnoy prokatki* [Theory of Longitudinal Rolling], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1980, 320 p.
5. Kotsar S.L. *Dinamika protsessov prokatki* [Dynamics of Rolling Processes], Moscow, Metallurgy, 1997, 256 p.
6. Tselikov A.I., Talanov D.A., Zyuzin V.I. *Teoriya prokatki* [The Theory of Rolling], Moscow, Metallurgy, 1982, 335 p.

7. Broydo, B.S. *Sintez system avtomaticheskogo upravleniya nepreryvnymi stanami choldnoy prokatki* [Synthesis of Automatic Control of Continuous Cold Rolling Mills], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1978, 160 p.

8. Ivanchenko F.K., Krasnoschapka V.A. *Dinamika metallurgicheskikh mashin* [Dynamics of Metallurgical Machines], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1983, 295 p.

9. Lekhov O.S. *Dinamicheskiye nagruzki v privodakh obzhimnykh stanov* [Dynamic Loads in the Drive Line of Cogging Mills], Moscow, Mechanical engineering, 1975, 184 p.

10. Meshcheryakov V.N., Didenko, E.E. *Otsenka sostavlyayushchikh momenta nagruzki pri raschete sostavlyayushchikh momentov elektroprivoda* [Evaluation of the Ratio of Components of the Load Torque when Calculating the Torque of the Motor], *Elektrika* [Electrical], 2012, no.10, pp. 31-33.

11. Meshcheryakov V.N., Migunov D.V. *Matematicheskoe modelirovanie sposoba snizheniya dinamicheskikh nagрузок elektroprivoda chernovoy kleti prokatnogo stana* [Mathematical modeling of the method of dynamic loads reduction of the actuator roughing stand rolling mill], *Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrical complexes and systems management], 2011, no.3, pp. 21-26.

12. Meshcheryakov V.N., Baikov V.D. *Imitatsionnaya model asinkhronnogo elektroprivoda na baze matrichnogo preobrazovatelya chastoty* [Simulation Model of the Asynchronous Electric Drive on The Basis of the Matrix Frequency Converter], *Vestnik LGTU* [Bulletin of the LSTU], 2015, no.3(25), pp. 12-18.

13. Meshcheryakov V.N., Migunov D.V., Meshcheryakova O.V. *Avtomaticheskaya sistema upravleniya sinkhronnym elektroprivodom chernovoy kleti prokatnogo stana dlya rezhima raboty s minimizatsiey poter energii* [The automatic control system of synchronous electric roughing stand rolling mill for minimizing energy losses], *Vestnik vysschikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya* [News of Higher Educational Institutions of Chernozem region], 2012, no.1, pp. 23-28.

14. Klyuchev V.I. *Ogranicheniye dinamicheskikh nagрузок elektroprivoda* [Limitation of dynamic loads of the actuator], Moscow, *Energiya* [Energy], 1971, 380 p.