

Шохин В.В., Андреев А.И., Морковина П.С.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТНОГО СТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Исследование работы прокатных станов в различных режимах проводят обычно с использованием математических моделей электроприводов и прокатываемой полосы. В этом случае сложно, а иногда невозможно, учесть некоторые факторы, оказывающие влияние на процессы обработки металла. В работе предлагается для исследования процессов намотки полосы на барабан моталки создать физические модели электроприводов клетки и моталки и математическую модель наматываемой полосы. Использование такой виртуальной модели позволяет в режиме реального времени производить исследование работы прокатного стана, изучать физические процессы, происходящие на стане в различных режимах, производить оценку влияния параметров регуляторов в системах регулирования скорости, момента, натяжения на процессы в стане. Использование такой модели в учебном процессе будет способствовать более глубокому пониманию реальных свойств прокатного стана.

Ключевые слова: электрический привод, прокатный стан, моталка, моделирование, регулирование натяжения, лабораторная установка.

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является создание с помощью физического и математического моделирования лабораторной установки для изучения основных режимов работы одноклетьевого прокатного стана. Для электрических приводов создаются физические модели на основе лабораторных автоматизированных электроприводов переменного тока с преобразователями частоты с электромашинами агрегатами, моделирующими нагрузки на двигатели [1]. Полоса моделируется математически с помощью программируемых контроллеров. На первом этапе создается модель электропривода клетки, моталки и полосы между клетью и моталкой.

Использование виртуальной модели прокатного стана позволяет в режиме реального времени производить исследование работы прокатного стана, изучать физические процессы, происходящие на стане в различных режимах, производить оценку влияния параметров регуляторов в системах регулирования скорости, момента, натяжения на процессы в стане [2–7].

МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для клетки используется электропривод переменного тока с асинхронным двигателем с векторной системой регулирования скорости. Для создания нагрузки применена вторая электрическая машина, механически связанная с двигателем, который моделирует электропривод клетки. Для второй электрической машины создается система регулирования момента, с помощью которой задаются момент прокатки и составляющие момента от натяжения в полосе.

Для моталки используется физическая модель с приводом переменного тока с короткозамкнутым асинхронным двигателем. Для создания нагрузки (натяжения) применен нагрузочный агрегат, состоящий из двух асинхронных двигателей, каждый из которых питается от своего преобразователя частоты. Для обоих двигателей используется система регулирования мо-

мента. На **рис. 1** представлена схема проектируемой лабораторной установки, в которой показаны модели клетки, моталки и полосы.

Система регулирования скорости двигателя клетки построена по принципу подчиненного регулирования координат, при этом используется векторное управление с ориентацией вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора [8, 9]. Имеются два контура в канале регулирования скорости и два контура в канале регулирования потокосцепления. Настройка контуров выполнена по модульному оптимуму.

Система регулирования моталки отличается от системы регулирования скорости клетки тем, что в ней отсутствует контур регулирования скорости. На регулятор составляющей тока статора, пропорционального моменту двигателя, подается сигнал задания, определяющий натяжение в полосе между клетью и моталкой. Технические данные применяемых электрических машин указаны в **таблице**. Номинальный момент двигателя (расчетное значение) 15,1 Нм. Для клетки и моталки применены одинаковые двигатели.



Рис. 1. Схема лабораторной установки

При моделировании процесса прокатки предполагается одноклетьевой виртуальный прокатный стан для обработки сталей с пределом текучести 300–600 Н/мм².

Толщина металла на выходе из клетки от 1 до 0,1 мм, при этом обжатие до 5%. Коэффициент трения в очаге деформации при прокатке – 0,03. Длина прокатанного металла до 1000 м. Момент прокатки на валу двигателя от 2 до 15 Нм. Скорость прокатки до 15 м/с. Радиус прокатных валков 0,1 м. Ширина прокатываемой полосы 0,02 м. Модуль упругости прокатываемой полосы 2×10¹¹ Н/м². Удельная масса прокатываемого металла 7800 кг/м³. Величина опережения при свободной прокатке $S_{оп}=0,05$. Коэффициент, связывающий опережение в очаге деформации и величину переднего натяжения, $S_{оп}/F=0,000025$ 1/Н. Расстояние между клетью и моталкой 2 м. Радиус барабана моталки 0,15 м. Момент инерции механизма моталки, приведенный к валу двигателя 0,5× $J_{дв}$. Передаточное число редуктора моталки 1.

Натяжение T между клетью и моталкой рассчитываем по известной формуле [10, 11]

Технические данные применяемых электрических машин

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Величина
Тип	4А90L4У3		
Мощность	$P_{2н}$	кВт	2,2
Напряжение			
Синхронная частота вращения	n_0	об/мин	1500
Ток статора	$I_{1н}$	А	5,02
КПД		%	80
$\cos \varphi$			0,83
Параметры схемы замещения	X_m	Ом	92,03
	R_1	Ом	4,1409
	R_2	Ом	2,4445
	X_1	Ом	3,2959
	X_2	Ом	5,2964
Механические характеристики	M_H		2,1
	M_K		2,4
	$S_{ном}$		5,1
	S_K		33
	$I_{п}$		6
Момент инерции	J_d	кгм ²	0,0056

$$T = \frac{Ebh}{l} \int_0^l (v_0 - v) dt + T_0,$$

где T_0 – начальное (заданное) натяжение полосы; E – модуль упругости металла; l – расстояние между последней клетью и барабаном моталки; v_0, v – соответственно линейные скорости намотки и полосы, выходящей из последней клетки.

Для расчета радиуса рулона на моталке используем зависимость

$$R_p = R_6 \sqrt{\frac{h \int_0^l v dt}{\pi R_6^2} + 1},$$

где R_p – радиус рулона; R_6 – радиус барабана моталки; h – толщина полосы; v – линейная скорость движения полосы.

Момент инерции рулона на моталке вычисляем по формуле

$$J_p = \frac{\pi B_{cp} \gamma}{2 i^2} (R_p^4 - R_6^4),$$

где B_{cp} – средняя ширина полосы; γ – удельный вес металла; i – передаточное число редуктора моталки.

С целью определения реальной возможности реализовать моделирование работы прокатного стана с частичным использованием физических лабораторных электроприводов и математической модели процесса прокатки на одноклетьевом прокатном стане с одной клетью и моталкой проведено моделирование работы всего комплекса оборудования. Для этого использована программная среда MATLAB и приложение SIMULINK [12]. Основные положения при моделировании описаны в работах [13–15]. На **рис. 2** представлена структура модели, которая учитывает работу клетки и моталки без системы регулирования натяжения полосы. На этом же рисунке указаны связи между блоками и физические величины, необходимые для расчета параметров модели.

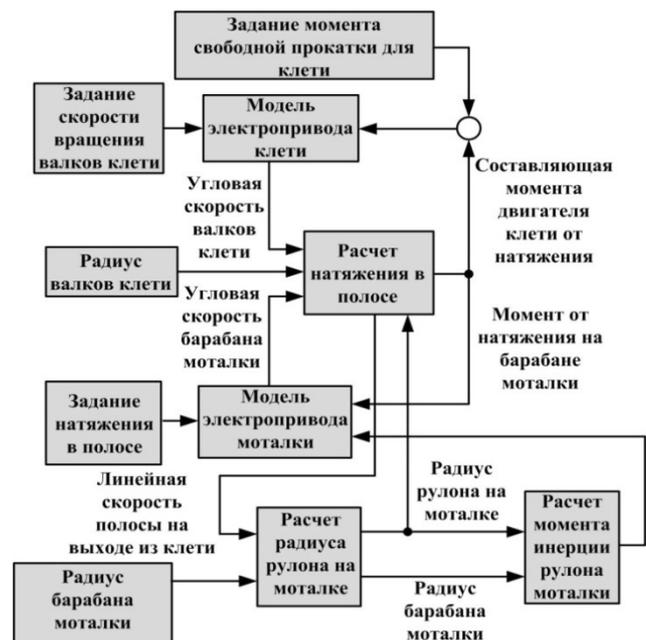


Рис. 2. Узлы модели прокатного стана без системы регулирования натяжения полосы (клеть-моталка)

Осциллограммы, иллюстрирующие работу клетки и моталки при отсутствии системы регулирования натяжения полосы, представлены на **рис. 3**. В этом случае для моталки задается неизменным сигнал задания момента двигателя. Последовательно рассмотрены процессы задания натяжения для моталки при отсутствии задания на скорость прокатки, разгон клетки до рабочей скорости, процесс намотки полосы на барабан моталки и снижение скорости полосы.

Как и на реальном стане, в процессе разгона натяжение в полосе уменьшается из-за влияния динамического момента, необходимого для обеспечения разгона барабана моталки, причем изменение натяжения связано с изменением момента инерции рулона в процессе разгона. При намотке полосы на барабан моталки скорость вращения барабана уменьшается, так как увеличивается радиус рулона при неизменной скорости полосы. Момент двигателя моталки в процессе намотки полосы задан неизменным. Это приводит к уменьшению натяжения полосы с ростом радиуса рулона.

Для изучения работы стана с системой регулирования натяжения необходимо построить узлы вычисления текущего радиуса рулона и момента инерции рулона. В реальном прокатном стане это может быть выполнено следующим образом.

Для вычисления сигнала, пропорционального текущему радиусу рулона, используется равенство

$$R = v / \omega,$$

где ω – угловая скорость вращения барабана моталки.

Операция деления осуществляется в узле вычисления текущего радиуса рулона включением множительного устройства в цепь обратной связи интегрирующего устройства (**рис. 4**).

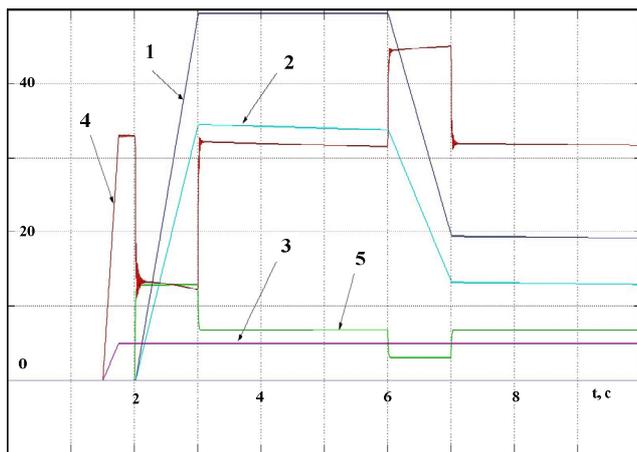


Рис. 3. Осциллограммы работы стана без системы регулирования натяжения полосы: 1 – скорость двигателя клетки, 1/с; 2 – скорость двигателя моталки, 1/с; 3 – момент двигателя моталки, Нм; 4 – натяжение в полосе, Н; 5 – момент двигателя клетки, Нм

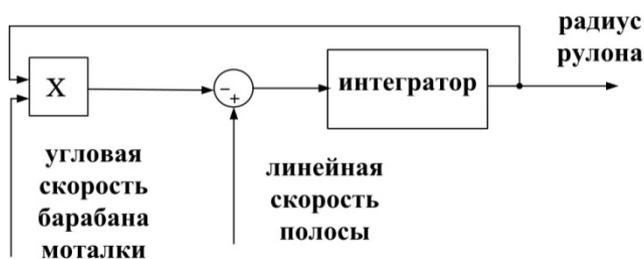


Рис. 4. Вычисление текущего радиуса рулона

Интегратор и множительное устройство, включенное по цепи обратной связи по радиусу рулона, образуют интегрозапоминающее устройство (ИЗУ). В данном узле осуществляется операция деления в неявной форме сигнала, пропорционального линейной скорости прокатки v , на сигнал, пропорциональный угловой скорости барабана моталки.

Процесс деления заканчивается тогда, когда на выходе ИЗУ сигнал, пропорциональный радиусу рулона R , достигнет значения, при котором сигнал на выходе, пропорциональный $(v - \omega R)$, станет равным нулю. Сигнал $(v - \omega R)$ получается на выходе сумматора, на входе которого суммируется сигнал, пропорциональный v и сигнал с выхода множительного устройства, пропорциональный произведению ωR . Таким образом, сигнал на выходе ИЗУ пропорционален радиусу рулона R , а сигнал на входе – его производной dR/dt .

Сигнал, пропорциональный текущему радиусу рулона вычисляется по представленной выше формуле, но для расчета используется вычисленный текущий радиус рулона.

Схема включения узлов при использовании системы регулирования натяжения в динамических режимах работы стана представлена на **рис. 5**.

На следующем рисунке (**рис. 6**) представлены осциллограммы работы стана с регулятором, компенсирующим динамический момент моталки при изменении скорости стана.

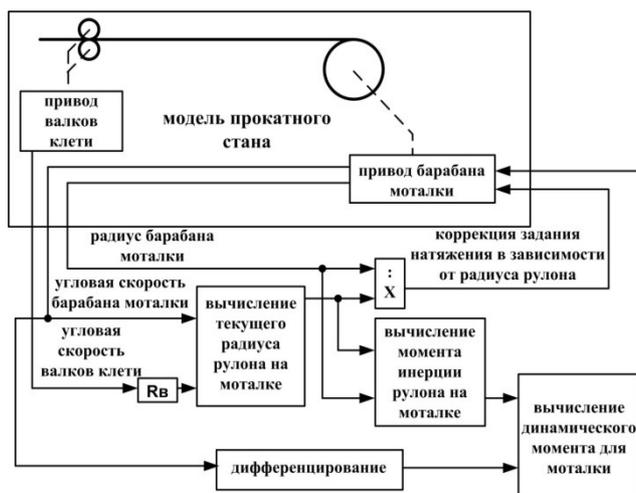


Рис. 5. Узлы схемы при использовании системы регулирования натяжения в динамических режимах работы стана

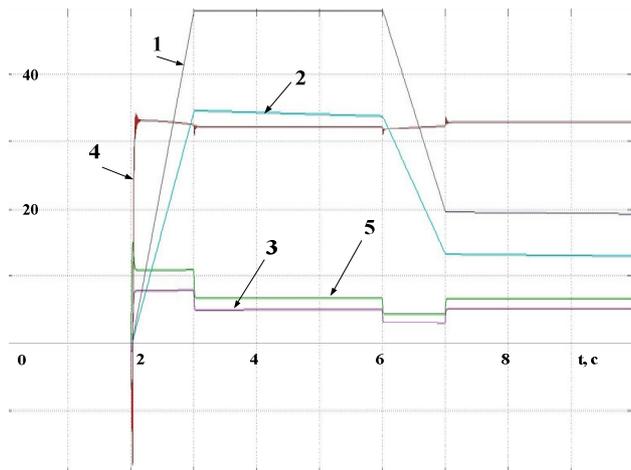


Рис. 6. Оциллограммы работы стана с компенсацией динамического момента моталки: 1 – скорость двигателя клети, 1/с; 2 – скорость двигателя моталки, 1/с; 3 – момент двигателя моталки, Нм; 4 – натяжение в полосе, Н; 5 – момент двигателя клети, Нм

Применение регулятора, который компенсирует динамический момент двигателя моталки в режимах разгона и торможения стана, существенно влияет на точность регулирования натяжения.

На рис. 7 показаны полученные на модели графики изменения момента двигателя моталки, угловой скорости вращения барабана моталки, момента инерции рулона, натяжения полосы в зависимости от радиуса рулона наматываемой полосы при постоянной линейной скорости прокатки. Из графиков следует, что натяжение сохраняется постоянным, при этом электромагнитная мощность двигателя моталки $P_{эл}$ также постоянна. Поведение указанных на рисунке параметров соответствует следующим зависимостям:

$$M = TR_p;$$

$$v = \omega R_p;$$

$$P_{эл} = M\omega = TR_p v / R_p = Tv = \text{const},$$

где M – момент двигателя моталки.

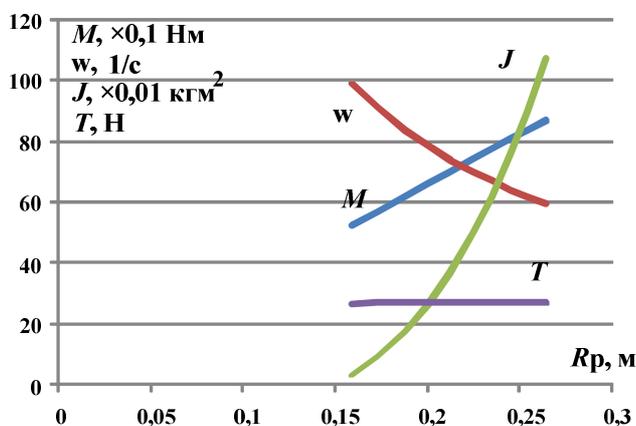


Рис. 7. Графики изменения параметров моталки в зависимости от радиуса рулона при постоянной линейной скорости прокатки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные оциллограммы и графики свидетельствуют о правильности выбранных принципов построения модели виртуального прокатного стана, об адекватности процессов в модели и в реальном процессе прокатки на стане, об удовлетворительной настройке систем регулирования скорости клети и момента моталки. Полученные в процессе моделирования коэффициенты и постоянные времени элементов модели могут быть использованы для настройки параметров лабораторной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Учебные лабораторные стенды кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники МГТУ им. Г.И. Носова / Радионов А.А., Омельченко Е.Я., Линьков С.А., Шохин В.В. // Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», 12–16 марта 2012 г. Екатеринбург: ФГА-ОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012, С. 309–310.
2. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, П.В. Шильяев // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 12–20.
3. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Известия вузов. Электромеханика. 2010. №3. С. 47–53.
4. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрушин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 12–21.
5. Khrumshin V.R., Radionov A.A., Kornilov G.P., Odintsov K.E. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill. Procedia Engineering. 2016, vol. 150, pp. 11–17.
6. Khrumshin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands. Russian Electrical Engineering. 2013, vol. 84, no. 4, pp. 221–227.
7. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a wide-strip hot-rolling mill. Russian Electrical Engineering. 2013, vol. 84, no. 10, pp. 533–541.
8. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов / 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.
9. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / под ред. В.М. Терехова. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
10. Морозов Д.П. К теории электромеханических процессов станов холодной прокатки // Вестник электропромышленности. 1944. №3. С. 16–19.
11. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1975, 336 с.
12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. И.В. Черных. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
13. Шохин В.В., Пермякова О.В. Исследование силового взаимодействия электроприводов непрерывного прокатного стана // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электро-

приводе АЭП-2014: в 2 т. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т. 2. С. 342–347

14. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems Nosov Magnitogorsk State Technical University Magnitogorsk, Russia. Peer-review under responsibility of the organizing committee of the International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015).

Procedia Engineering 129 (2015) 231–238.

15. Шохин В.В., Пермякова О.В., Короткова Е.В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. Вып. 21. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. С. 70–75.

Поступила в редакцию 09 марта 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF A ROLLING MILL USING PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS

Valery V. Shokhin

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of automatic electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, e-mail: shww@mgn.ru.

Andrey I. Andreev

Graduate student, Department of automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Polina S. Morkovina

Graduate student, Department of automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Research of rolling mill operation in different modes is usually executed using mathematical model of electric drives and a rolling strip. In this case, it is hard or sometimes impossible to take into account some factors, which influence metal processing processes. The authors of this paper offer to develop physical models of electric drives of a rolling mill and a coiler and a mathematical model of the rolling strip to study the processes of strip coiling on the coiling drum. Application of this virtual model of a rolling mill allows online execution of rolling mill operation study, investigation of physical processes, which take place in the mill during different modes, impact evaluation of regulation parameters in speed, moment, tension regulation systems on the mill processes. Making use of this model in the educational process will contribute to deeper understanding of real properties of a rolling mill.

Keywords: Electric drives, rolling mill, coiler, modelling, tension regulation systems, laboratory installation.

REFERENCES

1. Radionov A.A., Omelchenko E.Y., Linkov S.A., Shokhin V.V. *Uchebnye laboratornye stendy kafedry avtomatizirovannogo elektroprivoda i mekhatroniki MGTU im. G.I. Nosova* [Learning laboratory benches of the Department of Automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk state technical university] // Proceedings of the fifteenth international scientific and technical conference "AC Drives", 12–16 March 2012. Ekaterinburg: FGAOU VPO "Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin", 2012, pp. 309–310. (In Russian)
2. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Shilyaev, Golovin V.V. Mathematical modeling of interrelated electrical systems of interstand gap of wide strip hot rolling mill. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2009, no.1, pp. 12–20. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. [Mathematical modeling of thyristor electric drive with a flipper. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2010, no. 3, pp. 47–53. (In Russian)
4. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N.,

5. Khramshin V.R., Radionov A.A., Kornilov G.P., Odintsov K.E. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 11–17.
6. Khramshin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 4, pp. 221–227.
7. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a wide-strip hot-rolling mill. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 533–541.
8. Sokolovski G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC Frequency Control Electric Drives: textbook for higher schools], Academia publishing center, Moscow, 2007, 272 p. (In Russian)
9. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control System of Electric Drives: textbook for higher schools], Academia publishing center, Moscow, 2006, 304 p.
10. Morozov D.P. About the Theory of Electric and Mechanical Process of Cold-Rolling Mills. *Bulletin of Electrotechnical Industry*, 1944, no. 3, pp.16–19. (In Russian)
11. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak obyekt avtomatizatsii* [Continuous mills as an Automation Object]. Moscow: Metallurgy, 1975, 336 p. (In Russian)
12. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling electric devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink]. DMK Press, Moscow, 2008, 288 p. (In Russian)
13. Shokhin V.V., Permyakova O.V. *Issledovanie silovogo vzaimodeystviya elektroprivodov nepreryvnogo prokatnogo stana* [Investigation of the force interaction of electric drives of the continuous rolling mill]. Proceedings of the VIIIth International (XIX th nationwide) conference on automated electric drive of AEP-2014: 2 v. Saransk: Publishing house Mordov. University

- press, 2014, vol. 2, pp. 342–347. (In Russian)
14. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems Nosov Magnitogorsk State Technical University Magnitogorsk, Russia. Peer-review under responsibility of the organizing committee of the International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). *Procedia Engineering* 129 (2015) pp. 231–238.
15. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Korotkova E.V. *Modelirovanie vzaimosvyazannogo chastotno-reguliruemogo elektroprivoda prokatnogo stana* [Modeling of interconnected variable-frequency electric drives of the rolling mill]. *Electrical systems and complexes: the international meeting of scientific papers*, Vol. 21. Magnitogorsk: Publishing center of Nosov State Technical University, 2013, pp. 70–75.
-

Шохин В.В., Андреев А.И., Морковина П.С. Моделирование прокатного стана с использованием физических и математических моделей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 13–18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18)

Shokhin V.V., Andreev A.I., Morkovina P.S. Simulation of a Rolling Mill Using Physical and Mathematical Models. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 13–18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18)
