

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМОТКИ ПОЛОСЫ НА МОТАЛКУ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

В.В. Шохин¹, В.Р. Храмшин², О.В. Пермьякова¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В работе анализируются динамические свойства сложной многодвигательной электромеханической системы «клеть – полоса – моталка» для стана 630 холодной прокатки. На этом стане технологическими режимами предусматриваются значительные изменения скорости во время прокатки. Применяемые системы косвенного регулирования натяжения полосы при намотке на моталку для повышения точности регулирования должны предусматривать узлы компенсации динамического тока привода моталки. На точность регулирования в таких станах оказывают влияние механические потери в приводе, которые при изменении скорости существенно меняются по нелинейной зависимости в зависимости от скорости. Это также требует применения дополнительного узла компенсации потерь. От точности настройки указанных узлов зависит точность регулирования натяжения полосы. Система имеет сложную многодвигательную структуру. Указанные обстоятельства требуют для анализа работы таких систем применять методы моделирования. Разработана модель указанной сложной многодвигательной системы, которая имеет широкие возможности для исследования и настройки узлов системы регулирования в различных режимах.

Ключевые слова: стан холодной прокатки, электропривод, моделирование, регулирование натяжения, динамические характеристики.

Введение

Непрерывные прокатные станы являются сложными многосвязными агрегатами [1–6], которые требуют обеспечения точного соответствия технологических режимов заданным параметрам [7–14]. Возможности исследования процессов на реальных объектах ограничены, поэтому широко применяют методы моделирования [15–17].

Непрерывный пятиклетьевого стан 630 предназначен для холодной прокатки травленной горячекатаной ленты из низко- и среднеуглеродистых сталей, а также из сталей для глубокой вытяжки. Технологические режимы стана предусматривают заправку металла на пониженной скорости в стан и на моталку, установку необходимого натяжения полосы, разгон стана до скорости прокатки полосы, снижение скорости полосы при проходе сварных швов, снижение скорости перед выпуском полосы и выпуск полосы после прокатки. Одним из основных требований на моталках станов холодной прокатки является сохранение неизменным натяжения полосы при намотке, при этом следует учитывать взаимосвязь последней клетки стана с моталкой через полосу [8, 14, 15].

Для стана холодной прокатки применен электропривод постоянного тока. Привод валков клетки индивидуальный с двухъякорными двигателями. Привод моталки двухдвигательный с одноякорным и двухъякорным двигателями. Для питания каждого двухъякорного двигателя используется один вентильный преобразователь, к которому два якоря включаются последовательно. Системы регулирования скорости выполнены с применением

принципа подчиненного регулирования координат с двухзонным регулированием скорости в функции ЭДС якоря [7]. Для моталки применена система косвенного регулирования натяжения, когда для регулирования натяжения используется мощность приводного двигателя. Такая система должна иметь узлы для компенсации динамического тока моталки и момента потерь.

В связи с тем, что на стане используется широкий диапазон регулирования натяжения, с целью повышения точности регулирования натяжения применен двухдвигательный привод моталки с возможностью отключения двухъякорного двигателя от механизма моталки с помощью расцепной муфты. При работе двух двигателей создаются два контура регулирования тока, при этом используется один контур регулирования скорости, который работает только в режимах заправки и выпуска полосы.

Применяемые двигатели:

– для каждого валка клетки: 2МП–2000–315–УХЛ4 с номинальными данными: мощность 2×1000 кВт, напряжение 2×440 В, ток 2460 А, частота вращения 315/800 об/мин;

– для моталки: одноякорный двигатель МП–1000–315/800–УХЛ4 с номинальными данными: мощность 1000 кВт, напряжение 440 В, ток 2460 А, частота вращения 315/800 об/мин; а также двухъякорный двигатель 2МП–2000–315–УХЛ4 с техническими данными, аналогичными приводу клетки.

Технологические данные для моделирования представлены в таблице.

Технологические данные для моделирования

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Значение
1	Диаметр рабочих валков клетки	мм	420–400
2	Толщина готовой полосы после прокатки	мм	0,5–4
3	Ширина полосы	мм	250–465
4	Минимальное рабочее натяжение ленты	кН	7
5	Максимальное рабочее натяжение ленты	кН	150
6	Максимальная скорость прокатки	м/с	15
7	Заправочная скорость	м/с	0,5–1,5
8	Скорость пропуска сварного шва	м/с	2–4
9	Интервал натяжений, при которых работает один двигатель моталки	кН	7–30
10	Интервал натяжений, при которых работают два двигателя моталки	кН	30–150
11	Расстояние между осями валков последней клетки стана и барабана моталки	м	6

Основная часть

Целью исследования является оценка влияния дополнительных узлов компенсации динамического тока и момента потерь на точность регулирования натяжения в режимах разгона и торможения стана, их настройка и оценка динамических показателей работы рассматриваемой электромеханической системы при работе одного и двух двигателей моталки.

Моделирование работы электромеханической системы проводилось в программной среде MATLAB Simulink [18–19]. При моделировании использовалась модель системы двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока с зависимым ослаблением магнитного потока в функции ЭДС [20], которая адаптировалась к условиям ее применения (двухъякорные двигатели для валков клетки с последовательным соединением якорей и одноякорный двигатель для моталки с системой регулирования скорости в режимах заправки и выпуска полосы, одноякорный двигатель и двухъякорный двигатель для моталки с системой регулирования токов якорей в режиме регулирования натяжения).

Натяжение полосы между клетью и моталкой моделируется в соответствии с известной формулой [1, 6, 7]

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

где E – модуль упругости прокатываемого материала;

B, h – ширина и толщина полосы в промежутке между клетью и моталкой;

l – расстояние между осями валков клетки и барабана моталки;

v_0, v – соответственно линейные скорости намотки полосы на барабан моталки и скорости полосы, выходящей из последней клетки;

T_0 – начальное натяжение полосы.

При вычислении скорости полосы, выходящей из клетки, учитывается величина опережения

скорости металла по сравнению с окружной скоростью валков в очаге деформации [8–10, 17]. Входными переменными модели полосы являются частота вращения валков клетки и барабана моталки, а выходная переменная – величина натяжения между клетью и моталкой.

Для расчета радиуса рулона в механизме моталки используется зависимость

$$R_p = R_0 \sqrt{\frac{h \int_0^t v dt}{\pi R_0^2} + 1},$$

где R_p – радиус рулона;

R_0 – радиус барабана моталки;

h – толщина полосы;

v – линейная скорость движения полосы.

Момент инерции рулона на моталке вычисляется по формуле

$$J_p = \frac{\pi B_{cp} \gamma}{2 i^2} (R_p^4 - R_0^4),$$

где B_{cp} – средняя ширина полосы;

γ – удельный вес металла;

i – передаточное число редуктора моталки.

В системе регулирования натяжения для вычисления сигнала, пропорционального текущему радиусу рулона, используется равенство

$$R = \frac{v}{\omega},$$

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. 1). Интегратор и множительное устройство образуют интегрозапоминающее устройство (ИЗУ). В данном узле осуществляется операция деления в неявной форме сигнала, пропорционального линейной скорости полосы на сигнал, пропорциональный угловой скорости барабана моталки.

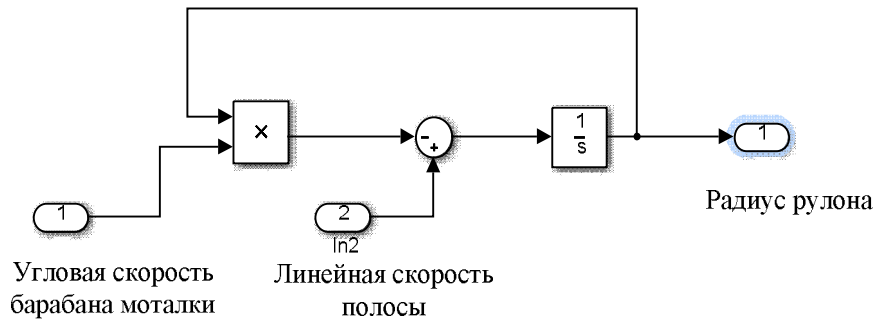


Рис. 1. Вычисление текущего радиуса рулона

Процесс деления заканчивается тогда, когда на выходе ИЗУ сигнал, пропорциональный радиусу рулона, достигнет значения, при котором сигнал на входе интегратора станет равным нулю.

В связи с тем, что в соответствии с технологией скорость прокатки меняется в широких пределах от заправочной до максимальной, момент потерь в механизме моталки изменяется. Это необходимо учитывать при моделировании введением блока потерь в механизме моталки и блока компенсации этих потерь.

Зависимость момента потерь от скорости вращения барабана моталки может быть представлена формулой

$$M_{\text{пот}} = A_0 + k\omega^2,$$

где A_0 – начальный момент потерь при скорости, равной нулю;

k – коэффициент.

При моделировании модель каждого двигателя и модель полосы представляются в виде подсистем с входными и выходными переменными. Это дает возможность относительно легко моделировать сложную электромеханическую систему с силовыми связями электрических двигателей.

Функциональная схема модели представлена на рис. 2.

В модели исследовался процесс прокатки углеродистой ленты толщиной 1 мм в режиме изменения скорости прокатки от 1,5 до 6,5 м/с и до 13 м/с. При разгоне до максимальной скорости использовалось ослабление магнитного потока двигателей. В процессе исследований проводилась настройка узлов компенсации динамического тока и момента потерь в электроприводе моталки. На всех осциллограммах (рис. 3–6) представлены скорость двигателей клетки (обозначена цифрой 1,

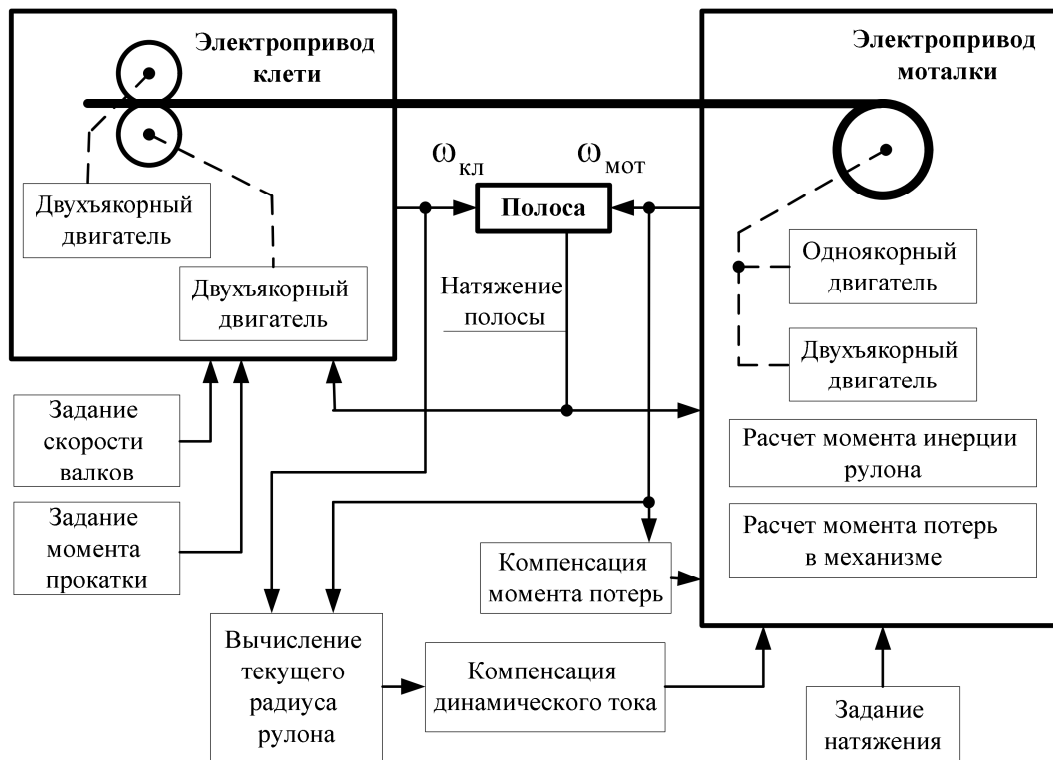


Рис. 2. Функциональная схема модели электромеханической системы «клеть – полоса – моталка»

Электромеханические системы

масштаб $\times 1$ м/с), скорость двигателей моталки (цифра 2, масштаб $\times 1$ м/с), суммарный момент двигателей клетки (цифра 3, масштаб $\times 2000$ Нм), суммарный момент двигателей моталки (цифра 4, масштаб $\times 2000$ Нм), натяжение полосы (цифра 5, масштаб $\times 5000$ Н). Осциллограммы, представленные на рисунках, иллюстрируют влияние указанных узлов на процесс регулирования натяжения.

Без узла компенсации динамического тока при разгоне стана величина натяжения полосы существенно снижается (рис. 3а). Если не учитывать изменение момента потерь в зависимости от скорости полосы, то с ростом скорости натяжение также снижается. Причем для рассматриваемых условий было увеличено задание на начальное натяжение, так как снижение натяжения при разгоне стана приводило к его исчезновению.

Введение указанных узлов позволяет повысить точность регулирования натяжения при намотке полосы в исследуемых режимах. После настройки узлов компенсации была снята осциллограмма, представленная на рис. 3б, из которой следует, что натяжение сохраняется неизменным в процессе разгона. Имеющиеся динамические отклонения натяжения в начале и в конце разгона объясняются примененным принципом регулирования. В этих режимах темп изменения скорости барабана моталки отстает от темпа изменения скорости валков клетки и восстановление натяжения происходит за счет ошибки регулирования.

На рис. 4 показаны осциллограммы, иллюстрирующие влияние каждого узла компенсации на процесс регулирования натяжения. После настройки узлов компенсации был отключен узел компенсации динамического тока и снята осцил-

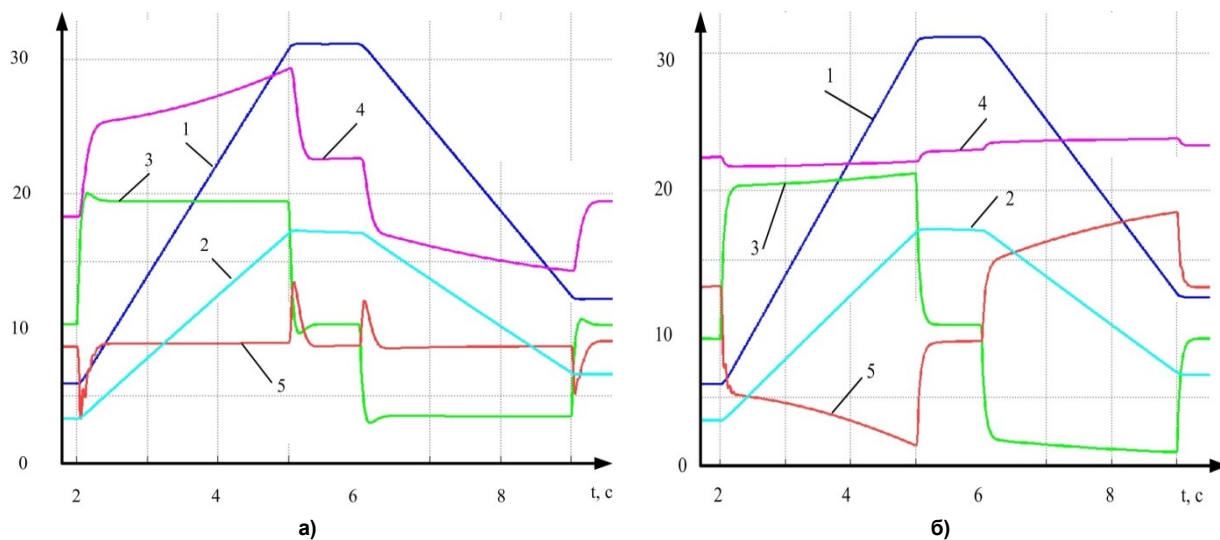


Рис. 3. Осциллограммы работы электромеханической системы «клеть – полоса – моталка» при отсутствии компенсации динамического тока и момента потерь (а) и при их полной компенсации (б)

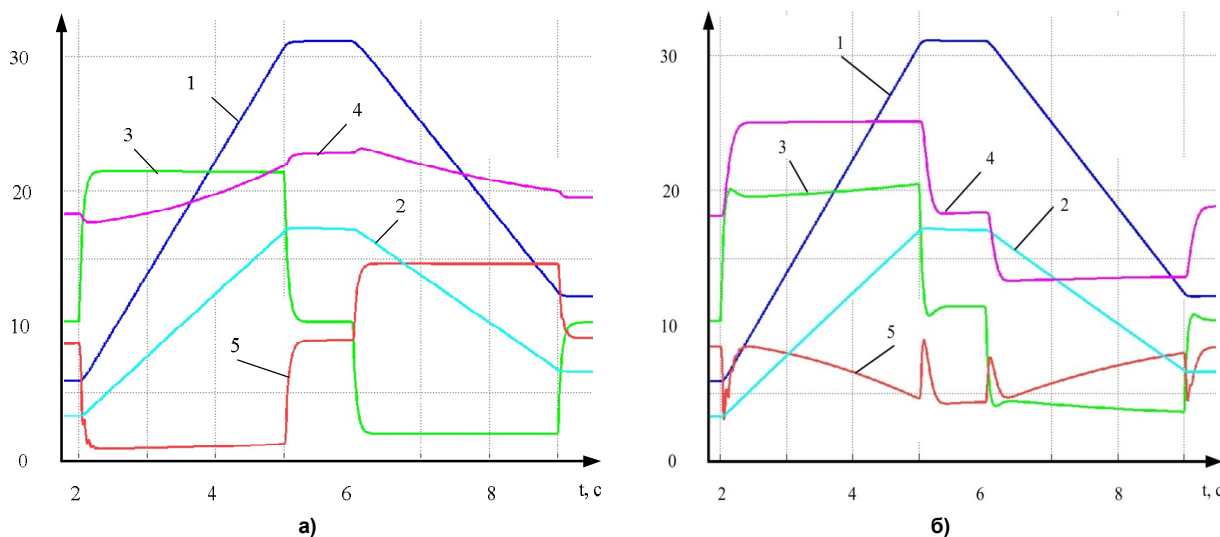


Рис. 4. Осциллограммы работы электромеханической системы «клеть – полоса – моталка» при отключении компенсации динамического тока (а) и при отключении компенсации момента потерь (б)

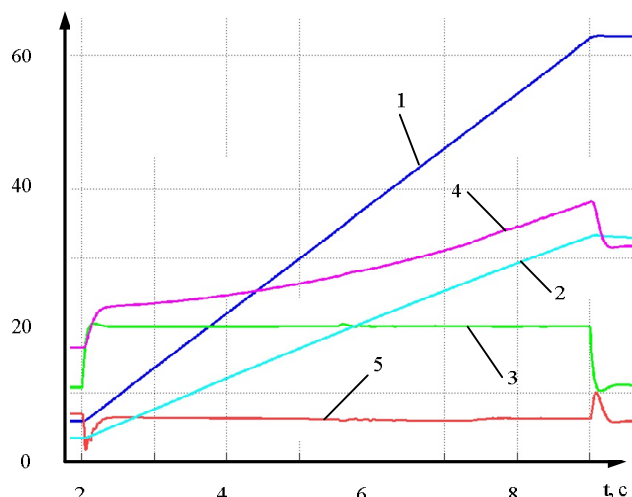


Рис. 5. Осциллограммы работы электромеханической системы «клеть – полоса – моталка» при разгоне до максимальной скорости

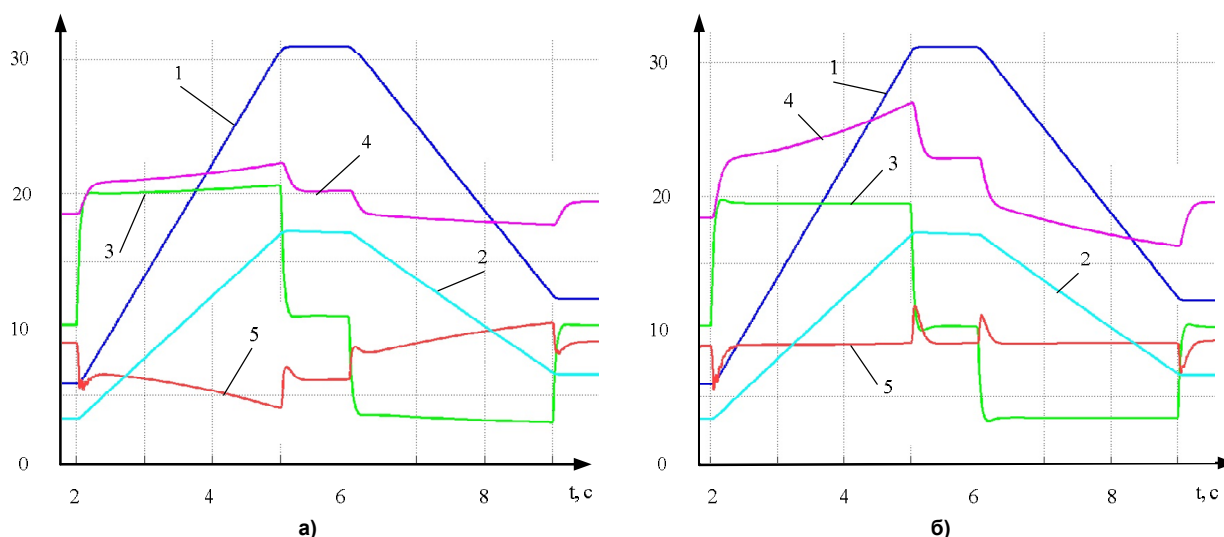


Рис. 6. Осциллограммы работы электромеханической системы «клеть – полоса – моталка» при отключенном двухъякорном двигателе моталки без перестройки узлов компенсации (а) и после перестройки узлов компенсации (б)

лограмма (рис. 4а), при этом узел компенсации момента потерь не отключался. На осциллограмме рис. 4б показан процесс разгона и торможения стана с отключенным узлом компенсации переменной составляющей момента потерь и при включенном узле компенсации динамического тока. Результаты, полученные при настройке перечисленных узлов на модели, могут быть использованы при настройке реальной системы регулирования натяжения для стана.

На осциллограмме рис. 5 показан режим разгона стана до максимальной скорости, когда происходит ослабление магнитного потока двигателей и клетки, и моталки. Анализ осциллограммы показывает, что настройка узлов компенсации динамического тока и момента потерь сохраняется и при ослаблении магнитного потока двигателей. Регулирование натяжения вполне удовлетворительное.

Осциллограммы, представленные на рис. 6а, иллюстрируют работу моталки при отключении двухъякорного двигателя. В этом случае для установления натяжения полосы на прежнем уровне требуется увеличить задание на натяжение, но, как видно из осциллограмм, в этом случае требуется и перестройка узлов компенсации динамического тока и момента потерь. При отключении двухъякорного двигателя с помощью расцепной муфты изменяется суммарный момент инерции привода моталки, а для восстановления натяжения и преодоления момента потерь в механизме моталки одноякорный двигатель должен увеличить свой момент. На осциллограмме рис. 6б представлены переходные процессы в рассматриваемой системе после перестройки узлов компенсации. Качество регулирования натяжения восстановлено.

Заключение

В результате исследований авторами получена модель сложной многодвигательной электромеханической системы «клеть – полоса – моталка», позволяющая проводить исследование ее работы в различных режимах. Проведена оценка влияния узлов компенсации динамического тока и момента потерь в моталке на величину натяжения полосы при разгоне и торможении стана. В процессе исследования получены параметры узлов компенсации динамического тока и момента потерь для системы регулирования натяжения полосы при ее смотке, которые могут быть использованы при настройке системы регулирования натяжения на реальном стане. Проведена оценка влияния на работу моталки двухъякорного двигателя при его подключении и отключении с помощью расцепной муфты. Полученная модель электромеханической системы «клеть – полоса – моталка» может быть использована при настройке систем регулирования натяжения полосы для аналогичных станков и в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика».

Литература

1. *Methods of calculation of load modes of roughing stand electric drives of wide-strip hot rolling mill* / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.G. Shubin, R.R. Khrumshin // *13th International Scientific Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. Proceedings: in 12 volumes.* – 2016. – P. 160–164. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7807045
2. *Setting automated roll axial shifting control system of plate mill* / A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, B.M. Loginov // *Procedia Engineering.* – 2017. – P. 1753–1760. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709
3. *Radionov, A.A. Improving reliability of hot plate mill electromechanical system* / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova // *Key Engineering Materials.* – 2016. – Vol. 685. – P. 417–421. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.417
4. *Strategy of vibration diagnostic control of mill equipment condition* / S.A. Evdokimov, A.S. Evdokimov, A.S. Karandaev, A.A. Radionov // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS.* – 2015. – 7 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414861
5. *Research of electric drive at load impact on hot plate mill 5000* / A.A. Radionov, A.S. Maklakov, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS.* – 2015. – 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414864
6. *Hemakumar, B. Performance Improvement in Hot Strip Rolling Mills by Improving Looper System* / B. Hemakumar, A.M.R.B. Aminur, M.P.R. Prasad // *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI.* – 2018. – P. 827–832. DOI: 10.1109/ICOEI.2018.8553709
7. *Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации* / Н.Н. Дружинин. – М.: *Металлургия*, 1975. – 336 с.
8. *Шохин, В.В. Исследование силового взаимодействия электроприводов непрерывного прокатного стана* / В.В. Шохин, О.В. Пермякова // *Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев.* – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 342–347.
9. *Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки* / А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // *Известия вузов. Электромеханика.* – 2010. – № 3. – С. 47–53.
10. *Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана* / В.Р. Храмушин, И.Ю. Андришин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* – 2013. – № 1. – С. 12–21.
11. *Shokhin, V.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems* / V.V. Shokhin, O.V. Permyakova // *Procedia Engineering.* – 2015. – Vol. 129. – P. 231–238. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.038
12. *Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill* / V.R. Khrumshin, A.A. Radionov, G.P. Kornilov, K.E. Odintsov // *Procedia Engineering.* – 2016. – Vol. 150. – P. 11–17. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.208
13. *Khrumshin, V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands* / V.R. Khrumshin // *Russian Electrical Engineering.* – 2013. – Vol. 84, no. 4. – P. 221–227. DOI: 10.3103/S1068371213040032
14. *Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a wide-strip hot-rolling mill* / P.V. Shilyaev, I.Yu. Andryushin, V.V. Golovin et al. // *Russian Electrical Engineering.* – 2013. – Vol. 84, no. 10. – P. 533–541. DOI: 10.3103/S106837121310009X
15. *Шохин, В.В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана* / В.В. Шохин, О.В. Пермякова, Е.В. Короткова // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2013. – Вып. 21. – С. 70–75.
16. *Шохин, В.В. Моделирование прокатного стана с использованием физических и математических моделей* / В.В. Шохин, А.И. Андреев, П.С. Морковина // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2017. – № 2 (35). – С. 13–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18
17. *Шохин, В.В. Исследование на математической модели электроприводов черновых клетей*

сортového стана 450 СПЦ ОАО «ММК» / В.В. Шохин, В.Р. Храмшин, Р.Ю. Новецки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 58–66. DOI: 10.14529/power170208

18. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

19. Герман-Галкин, С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Изд-во «Корона. Век», 2014. – 368 с.

20. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учеб. для вузов / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Издат. центр «Академия», 2006. – 304 с.

Шохин Валерий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; shww@mgn.ru.

Храмшин Вадим Рифхатович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; hvrmgn@gmail.com.

Пермякова Ольга Валерьевна, старший преподаватель, кафедра «Информатика и информационная безопасность», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск.

Поступила в редакцию 6 февраля 2019 г.

DOI: 10.14529/power190110

PROCESS SIMULATION OF THE STRIP REELING ON THE COLD ROLLING MILL COILER

V.V. Shokhin¹, shww@mgn.ru,
V.R. Khramshin², hvrmgn@gmail.com,
O.V. Permyakova¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper analyses the dynamic properties of a complex multi-motor electromechanical “cage – strip – coiler” system for a cold rolling mill, the technological modes of which feature significant speed changes during the rolling. Indirect belt tension control systems applied to boost the adjustment accuracy by reeling up the coiler should provide the compensation nodes of the dynamic current drive. Mechanical losses changing at non-linear velocity dependence affect on the mill regulation accuracy. This also demands for the additional loss compensation unit. Strip tension adjustment accuracy depends on those units installation. The system has a complex multi-motor structure. The forenamed conditions require conducting analysis with modeling methods. This paper presents a model of a complex multi-motor system, which provides for the research and installation of the regulation system units in different modes.

Keywords: cold rolling mill, electric drive, modeling, tension control, dynamic properties.

References

1. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Shubin A.G., Khramshin R.R. Methods of Calculation of Load Modes of Roughing Stand Electric Drives of Wide-Strip Hot Rolling Mill. *13th International Scientifictechnical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*. Proceedings: in 12 volumes, 2016, pp. 160–164. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7807045

2. Karandaev A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Loginov B.M. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill. *Procedia Engineering*, 2017, pp. 1753–1760. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709

3. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Improving Reliability of Hot Plate Mill Electromechanical System. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 417–421. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.417

4. Evdokimov S.A., Evdokimov A.S., Karandaev A.S., Radionov A.A. Strategy of Vibration Diagnostic Control of Mill Equipment Condition. *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*, 2015, 7 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414861

5. Radionov A.A., Maklakov A.S., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Research of electric drive at load impact on hot plate mill 5000. *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*, 2015, 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414864
6. Hemakumar B., Aminur A.M.R.B., Prasad M.P.R. Performance Improvement in Hot Strip Rolling Mills by Improving Looper System. *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI*, 2018, pp. 827–832. DOI: 10.1109/ICOEI.2018.8553709
7. Druzhinin N.N. *Nepřeryvnyye stany kak ob'yekt avtomatizatsii* [Continuous Mills as an Automation Object]. Moscow, Metallurgy Publ., 1975. 336 p.
8. Shokhin V.V., Permyakova O.V. [Investigation of the Force Interaction of Electric Drives of the Continuous Rolling Mill]. *Proceedings of the VIII International (XIX Nationwide) Conference on Automated Electric Drive of AEP-2014*: in 2 vol. Saransk: Publishing House Mordov. University Press, 2014, vol. 2, pp. 342–347. (in Russ.)
9. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. [Mathematical Modeling of Thyristor Structure with Switchable]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2010, no. 3, pp. 47–53. (in Russ.)
10. Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. [Mathematical Model of Interrelated Electrical Systems of Continuous Train of Wide Strip Rolling Mill]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 1, pp. 12–21. (in Russ.)
11. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The Study of Continuous Rolling Mill Inter-Stand Tension Inferential Control Systems. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 231–238. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.038
12. 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. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.208
13. 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. DOI: 10.3103/S1068371213040032
14. 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 Widestrip Hot-Rolling Mill. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 533–541. DOI: 10.3103/S106837121310009X
15. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Korotkova E.V. [Modeling of Interconnected Variable-Frequency Electric Drives of the Rolling Mill]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 70–75. (In Russ.)
16. 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 Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18
17. Shokhin V.V., Khrumshin V.R., Nowicki R.Yu. Mathematical Simulation of Roughing Electric Drives of 450 Bar and Shape Mill Mounted at Arch-Furnace Plant of Magnitogorsk Iron and Steel Works, OJSC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 58–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170208
18. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling Electric Devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p.
19. German-Galkin S.G. *Matlab&Simulink. Proyektirovaniye mekhatronnykh sistem na PK* [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]. Saint Petersburg, Korona. Vek Publ., 2014. 368 p.
20. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: ucheb. dlya vuzov* [Control System of Electric Drives: Textbook for Higher Schools]. Moscow, Academia publishing center, 2006. 304 p.

Received 6 February 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шохин, В.В. Моделирование процесса намотки полосы на моталку стана холодной прокатки / В.В. Шохин, В.Р. Храмшин, О.В. Пермякова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 85–92. DOI: 10.14529/power190110

FOR CITATION

Shokhin V.V., Khrumshin V.R., Permyakova O.V. Process Simulation of the Strip Reeling on the Cold Rolling Mill Coiler. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 85–92. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190110