

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ

**Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, В.В. Шохин,
Т.Р. Храмшин, А.А. Николаев**

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

Объектом исследования является система взаимосвязанных электроприводов технологической зоны агрегата непрерывного горячего цинкования цеха покрытий ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), в частности механическая часть с упругими элементами и системы управления электроприводами. Целями работы являются: исследование существующих рабочих режимов электроприводов основных механизмов технологической и выходной зон агрегата цинкования, выявление способов улучшения работы системы взаимосвязанных электроприводов в статических и динамических режимах, разработка усовершенствованной системы управления, обеспечивающей улучшенные динамические показатели при косвенном регулировании натяжения полосы. Предлагается новая система управления электроприводами технологической зоны с корректирующей обратной связью по скорости. Динамические характеристики традиционной и новой систем исследовались на математической модели электроприводов исследуемого участка агрегата с учетом их взаимосвязи через упругую полосу. Модель учитывает электроприводы: горячая натяжная станция, натяжные станции № 3, 4, 5, 6 и дрессировочная клеть. Каждый электропривод моделируется с учетом механической инерции и системы управления скоростью или моментом. Сравнительный анализ показателей качества регулирования натяжения для указанных систем показал преимущества разработанной системы. Результаты работы могут быть использованы на аналогичных агрегатах непрерывной обработки полосы, в которых присутствуют участки технологической линии со значительной протяженностью полосы между соседними электроприводами.

Ключевые слова: агрегат горячего цинкования, полоса, электропривод, упругие связи, натяжение, колебания, демпфирование, управление, система, разработка, моделирование, переходные процессы, анализ, рекомендации.

Постановка задачи исследования

Агрегат непрерывного горячего цинкования – один из многих примеров постсоветского периода освоения и запуска в производство зарубежной технологии и импортного оборудования, в том числе и электрического [1, 2]. Для всех сложных агрегатов, в которых процесс обработки полосы происходит одновременно в нескольких механизмах, предъявляются особые требования в отношении регулирования натяжения [3–5]. Это объясняется влиянием натяжения на качество продукции и на износостойкость отдельных элементов механизмов. К таким агрегатам относится агрегат непрерывного горячего цинкования (АНГЦ). Готовая продукция этого агрегата на заключительной стадии глубокой переработки имеет высокую добавленную стоимость, поэтому для обеспечения заданного качества покрытия полосы точность регулирования натяжения имеет большое значение [6, 7].

В процессе эксплуатации оборудования АНГЦ ПАО «ММК» на ряде участков были выявлены нежелательные колебания натяжения, возникающие в моменты пуска и торможения линии. Причиной этого является наличие упругих свойств полосы, связывающей между собой электроприводы [8–10].

Выбор рациональной величины натяжения на заданном участке при различном сортаменте имеет большое значение для устойчивой работы всего агрегата [11–13]. Натяжение, создаваемое горячей натяжной станцией, с одной стороны, должно быть достаточным для обеспечения механической устойчивости полосы при прохождении башни охлаждения, которая отличается значительной протяженностью и возмущениями в виде потоков охлаждающего воздуха [14, 15]. С другой стороны, увеличение натяжения приводит к преждевременному износу подшипников погружного ролика. Исключение колебаний натяжения горячей натяжной станции является условием получения качественного покрытия полосы.

Поставлены задачи исследования рабочих режимов электроприводов основных механизмов технологической зоны АНГЦ и разработки усовершенствованной системы управления, обеспечивающей улучшенные динамические показатели при косвенном регулировании натяжения.

Характеристика объекта исследования

На рис. 1 представлен фрагмент технологической линии АНГЦ, на котором показаны рассматриваемые механизмы. Система регулирования натяжной станции № 3 задает скорость перемещения

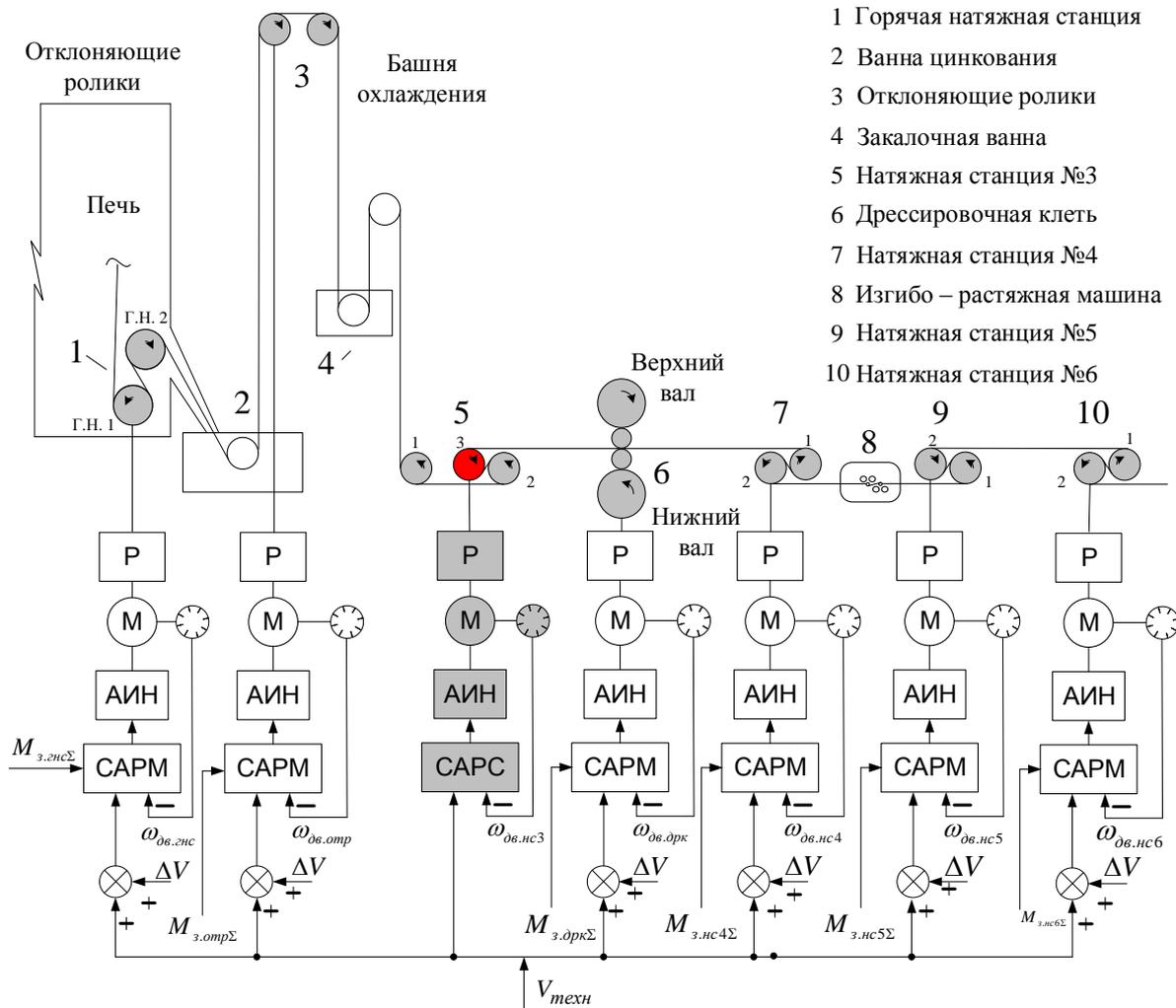


Рис. 1. Фрагмент технологической линии АНГЦ

полосы, она является ведущей (Speed master). Электроприводы остальных механизмов этого участка работают в режиме регулирования момента двигателя. В этом случае регуляторы скоростей этих механизмов переводятся в режим ограничения напряжения сигналом обгона (ΔV). За счёт изменения уставки блока ограничения осуществляется регулирование момента. Задание на момент, которое формируется блоком ограничения, учитывает следующие составляющие: натяжение полосы, трение в механизме, вес полосы и динамический момент.

Исследование колебаний натяжения полосы в динамических режимах

Для исследования причин колебаний натяжения в технологической зоне между горячей натяжной станцией и натяжной станцией № 6 построена математическая модель взаимосвязанных электроприводов, реализованная с помощью пакета Simulink в среде MATLAB. Модель учитывает с определенными допущениями реальные свойства взаимосвязанной системы: связь электроприводов

натяжных станций и дрессировочной клетки через упругую полосу, влияние неприводных механизмов (изгибо-растяжной машины, отклоняющих и центрирующих роликов). Модель также реализует систему управления скоростью натяжной станции № 3 и регулирование момента электроприводов остальных механизмов, отражающих статические и динамические свойства реальных систем автоматического регулирования (САР). Для упрощения контур регулирования момента представлен аperiodическим звеном с минимальной постоянной времени, а коэффициенты обратных связей по координатам электропривода приняты равными единице. Фрагмент полной модели, в которой учтены только два электропривода – горячей натяжной станции (ГНС) и натяжной станции № 3 (НС 3), приведен на рис. 2.

Моделирование представленной системы показало, что переходные процессы по управляющему воздействию являются существенно колебательными (рис. 3). С целью демпфирования колебаний было предложено дополнительно ввести обратную связь по частоте вращения двигателя

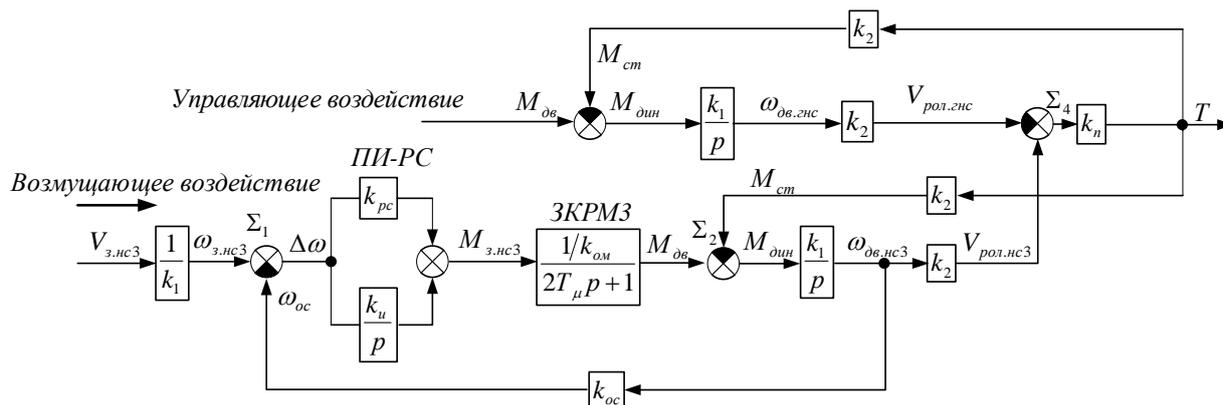


Рис. 2. Структурная схема канала управляющего воздействия

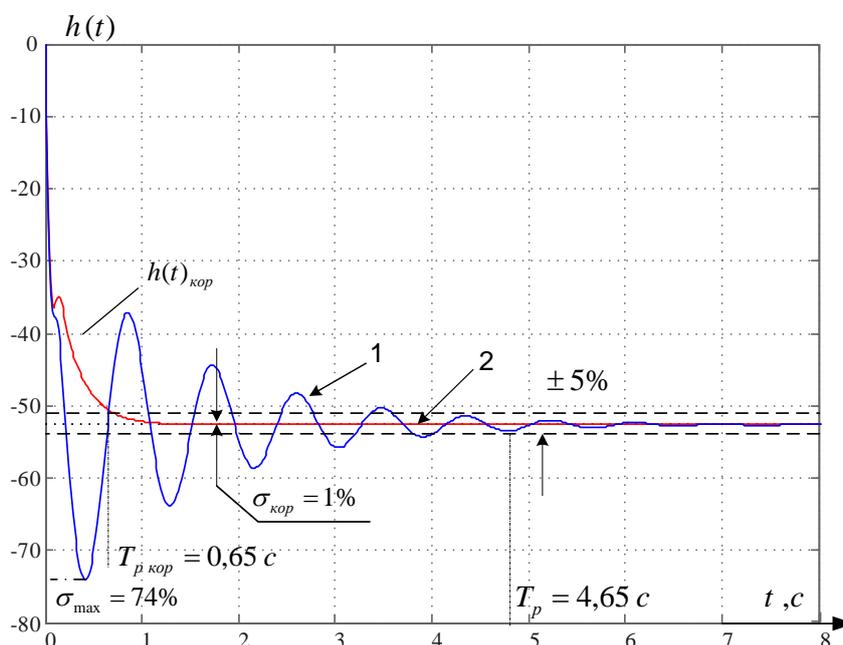


Рис. 3. Переходные характеристики по управляющему воздействию двух систем: 1 – исходной; 2 – системы с корректирующей связью по скорости

горячей натяжной станции. Коэффициент передачи корректирующей связи был определен с помощью моделирования.

На рис. 3 представлены осциллограммы переходных характеристик по управляющему воздействию в исходной системе (1) и при включении корректирующей связи по скорости (2). Анализ переходных процессов показал, что при введении обратной связи колебательный характер переходного процесса сменяется аperiodическим монотонно затухающим. Время регулирования уменьшается более чем в 7 раз от $T_p = 4,65\text{ c}$ до $T_{p\text{кор}} = 0,65\text{ c}$. Изменение характера переходного процесса благоприятно сказывается и на работе подшипников механизмов, за счет чего увеличивается ресурс работы погружного ролика.

Для реализации предлагаемого способа управления необходимо отключить регулируемое

ограничение регулятора скорости, сделать его пропорциональным, а уставку блока ограничения задать неизменной (рис. 4). Проводился анализ переходных процессов для горячей натяжной станции при изменении задания момента $M_{з\Sigma\%}$. Получены расчетные временные зависимости изменений натяжения полосы на исследуемом участке технологической зоны при обработке тестовой тахограммы.

На рис. 5 в качестве примера приведены осциллограммы изменения натяжений для участка между горячей натяжной станцией и отклоняющим роликом. В традиционной системе управления с неактивным регулятором скорости наблюдаются существенно колебательные переходные процессы, при этом перерегулирование составляет $\sigma_{max} = 66\%$. Причиной нестабильности системы является отсутствие в ней эффективных демпфи-

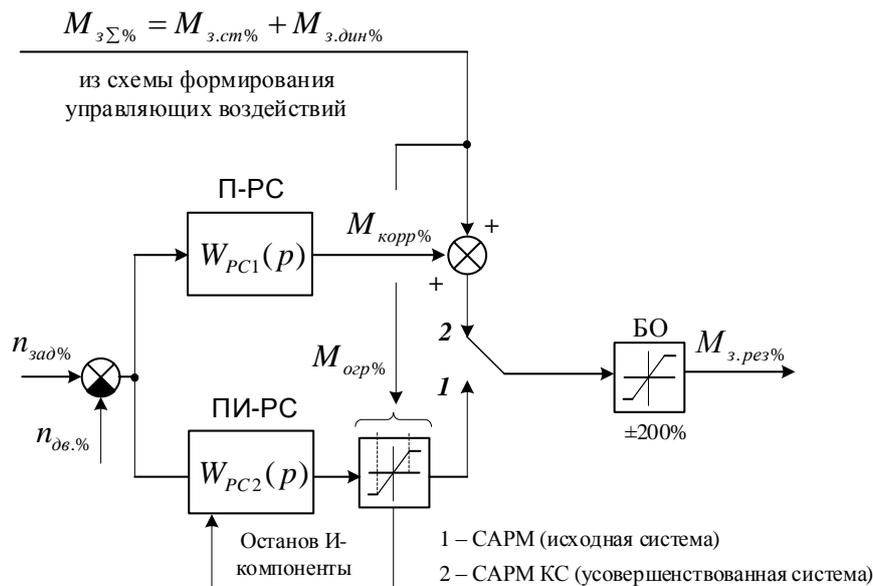


Рис. 4. Структурная схема усовершенствованного регулятора скорости

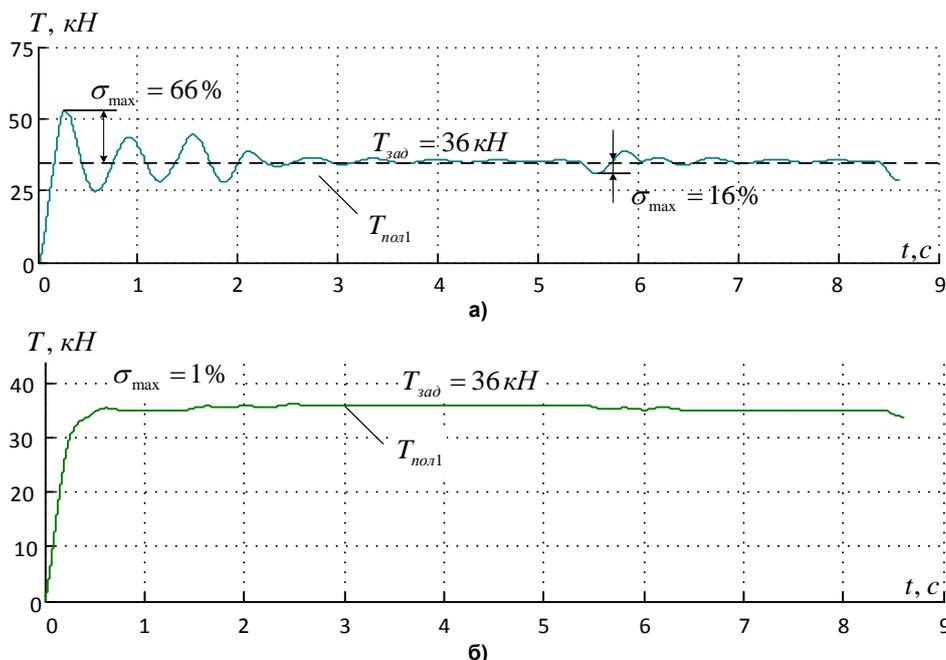


Рис. 5. Изменение натяжения полосы на исследуемом участке с традиционной (а) и усовершенствованной (б) САР

рующих связей, за исключением диссипативных сил в упругих элементах и сил трения в механизмах. В новой системе регулирования колебательный характер переходных процессов сменяется апериодическим с отсутствием перерегулирования.

В системе с неактивным регулятором (рис. 5а) наблюдаются колебания скорости приводного двигателя и натяжения полосы. Как видно из рис. 5а, амплитуда колебаний зависит от темпа изменения скорости $n_{\text{дв.}\%}$, который определяется темпом изменения сигналов задания на скорость натяжной станции № 3. При применении усовершенствован-

ной системы управления (рис. 5б) колебания натяжения на исследуемом участке технологической зоны практически отсутствуют. Величина отклонения натяжения не превышает 5 % установившегося значения.

На основе проведенных исследований рабочих режимов системы взаимосвязанных электроприводов установлено, что усовершенствованная система регулирования момента с корректирующей обратной связью по скорости двигателя обеспечивает приемлемые переходные процессы натяжения в основных режимах работы.

Следует отметить, что при использовании предлагаемой системы, которая позволяет существенно демпфировать колебания натяжения в технологической зоне АНГЦ, возможно снижение уставок натяжения горячей натяжной станции на 10–30 % в зависимости от поперечного сечения полос. Это уменьшит усилия на погружной ролик, увеличит ресурс его работы и сократит количество перевалок в месяц.

Заключение

1. Разработана математическая модель взаимосвязанных электроприводов АНГЦ с учетом взаимного влияния через полосу.

2. Обоснована эффективность применения корректирующей обратной связи по скорости для электроприводов натяжных станций.

3. Сформулированы рекомендации по настройке электроприводов и корректировке уставок натяжения горячей натяжной станции, способствующие стабилизации натяжения и увеличению ресурса работы погружного ролика.

4. Результаты работы могут быть использованы на аналогичных агрегатах непрерывной обработки полосы, в которых присутствуют участки технологической линии со значительной протяженностью полосы между соседними электроприводами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук МК-499.2020.8.

Литература

1. Корнилов, Г.П. Повышение надежности электроснабжения металлургических агрегатов за счет схмотехнических решений / Г.П. Корнилов, И.П. Абдулвелеев, А.Ю. Коваленко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 59–69. DOI: 10.14529/power190407

2. Tupkary, R.H. *Modern Steel Making Handbook* / R.H. Tupkary, V.R. Tupkary. – Mercury Learning&Information, 2017. 660 p.

3. Субботина, Ю.М. Технологические особенности агрегатов непрерывного горячего цинкования стальной полосы / Ю.М. Субботина, Л.В. Радионова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – № 1. – С. 112–119. DOI: 10.14529/met160116

4. Исследование режимов работы взаимосвязанных электроприводов технологической зоны агрегата цинкования / Т.Р. Храмушин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 46–49.

5. System for speed mode control of the electric drives of the continuous train of the hot-rolling mill / V.R. Khrumshin, A.S. Evdokimov, G.P. Kornilov et al. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk. – 2015. – P. 1–6. DOI: 10.1109/sibcon.2015.7147264

6. Colla, V. Quality Improvement in Hot Dip Galvanizing Line through Hybrid Case-Based Reasoning System / V. Colla, N. Matarese, F. Cervigni // 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge. – 2013. – P. 161–166. DOI: 10.1109/uksim.2013.24

7. Kornilov, G.P. Increasing Stability of Electric Drives of Rolling Mills with Active Front Ends at Voltage Sag / G.P. Kornilov, T.R. Khrumshin, I.R. Abdulvelev // Proceedings – ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2019. – P. 1–4. DOI: 10.1109/icoecs46375.2019.8949945

8. Электрооборудование современных цехов ОАО «ММК» / Е.Я. Омельченко, А.Н. Козин, В.Н. Маколов и др. // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 1 (22). – С. 43–46.

9. Опыт применения установки ИМПОК-1Б в линии агрегата непрерывного горячего цинкования цеха покрытий ОАО «ММК» / Л.С. Иванова, В.И. Белякова, В.Л. Корнилов и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – № 2. – С. 52–54.

10. Головин, В.В. Опыт внедрения современных электроприводов в ОАО «ММК» / В.В. Головин, А.В. Косенков, В.П. Разворотнев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3: в 5 ч. Ч.2. – С. 149–156.

11. Magnetic Actuator Design for Strip Stabilizers in Hot Dip Galvanizing Lines / L. Marko, M. Saxinger, A. Steinboeck, A. Kugi // 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Portland, OR. – 2018. – P. 1–9. DOI: 10.1109/ias.2018.8544641

12. Mathematical Model for Analysis of Dynamical States of a Drive System Containing Rolling Mill and Roller Table Including the Selected Parameters of a Rolling Process / A. Rusek, I. Shchur, M. Lis et al. // 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Koutynad Desnou. – 2015. – P. 256–261.

13. Шохин, В.В. Исследование на математической модели электроприводов черновых клетей сортового стана 450 СПЦ ОАО «ММК» / В.В. Шохин, В.Р. Храмушин, Р.Ю. Новецки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 58–66. DOI: 10.14529/power170208

14. Рябчиков, М.Ю. Адаптация теплотехнических моделей протяженной башенной печи и нагрева металла для управления температурными режимами отжига стальной полосы / М.Ю. Рябчиков // Проблемы управления. – 2017. – № 5. – С. 61–69.

15. Рябчиков, М.Ю. Управление режимом нагрева полосы на агрегате непрерывного горячего цинкования с использованием нейросетевых моделей / М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова // *Технология машиностроения*. – 2017. – № 2. – С. 37–43.

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn_mgn@mail.ru.

Абдулвелеев Ильдар Равильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; leggyild@mail.ru.

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

Храмшин Тимур Рифхатович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; timur.hramshin@mail.ru.

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; shww@mgn.ru.

Поступила в редакцию 16 марта 2020 г.

DOI: 10.14529/power200211

IMPROVING THE QUALITY OF TENSION REGULATION IN THE STRIP OF THE CONTINUOUS HOT GALVANIZING UNIT

G.P. Kornilov, korn_mgn@mail.ru,
I.R. Abdulveleev, leggyild@mail.ru,
V.V. Shokhin, shww@mgn.ru,
T.R. Khrumshin, timur.hramshin@mail.ru,
A.A. Nikolaev, shww@mgn.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The paper studies a system of interconnected electric drives in the operational area of the continuous hot dip galvanizing unit located in the coating shop at PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works (PJSC MMK). It particularly focuses on the mechanical part with elastic elements and electric drive control systems. The paper aims at studying the existing operating modes of electric drives of the main mechanisms in the operational and output areas of the galvanizing unit; identifying ways to improve the static and dynamic performance of the interconnected electric drives system; developing an improved control system that provides for the better dynamic performance with indirect strip tension control. The authors propose a new control system for the operational area electric drives with corrective speed feedback. The dynamic characteristics of the traditional and the proposed systems were studied using a mathematical model of electric drives of the analyzed section with account to their interconnection via an elastic strip. The model accounts for eight electric drives, i.e., a hot tension station, tension stations no. 3, 4, 5, 6 and a training stand. Each electric drive is modeled with account for mechanical inertia and a (speed or torque) control system. The comparative analysis of tension control quality indicators for these systems proved the advantages of the developed system. The research outcomes can be used for similar units of continuous strip processing, featuring the technological line sections with a significant length of the strip between the adjacent electric drives.

Keywords: hot dip galvanizing unit, strip, electric drive, elastic bonds, tension, vibrations, damping, control, system, development, modeling, transients, analysis, recommendations.

References

1. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Kovalenko A.Yu. Improving the Reliability of Steel Producing Units Electric Supply with Schematic Design Solutions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 59–69. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190407
2. Tupkary R.H., Tupkary V.R. *Modern Steel Making Handbook*. Mercury Learning&Information, 2017. 660 p.
3. Subbotina Yu.M., Radionova L.V. [Technological Features of Continuous Lines for Hot-Dip Galvanizing of a Steel Strip]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 112–119. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160116
4. Khrumshin T.R. et al. [The Study of the Operating Modes of Interconnected Electric Drives of the Technological Zone of the Galvanizing Unit]. *Russian Electromechanics*, 2006, vol. 4, pp. 46–49. (in Russ.)
5. Khrumshin V.R. et al. System for Speed Mode Control of the Electric Drives of the Continuous Train of the Hot-Rolling Mill. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/sibcon.2015.7147264
6. Colla V., Matarese N., Cervigni F. Quality Improvement in Hot Dip Galvanizing Line through Hybrid Case-Based Reasoning System. *2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge*, 2013, pp. 161–166. DOI: 10.1109/uksim.2013.24
7. Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Abdulvelev I.R. Increasing Stability of Electric Drives of Rolling Mills with Active Front Ends at Voltage Sag. *Proceedings of 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS 2019)*, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/icoecs46375.2019.8949945
8. Omelchenko E.Ya., Kozin A.N., Makolov V.N., Bovshik P.A., and Popov S.N. [Electrical Equipment of Modern Shops of OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2014, no. 1 (22), pp. 43–46. (in Russ.)
9. Ivanova L.S. et al. [The Experience of Using the IMPOK-1B Installation in the Line of the Continuous Hot-Dip Galvanizing Unit of the Coatings Workshop of OJSC MMK]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2007, no. 2, pp. 52–54. (in Russ.)
10. Golovin V.V., Kosenkov A.V., Razvorotnev V.P. [Experience of introduction of modern electric drives in OJSC MMK]. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*, 2010, iss. 3, vol. 2, pp. 149–156. (in Russ.)
11. Marko L., Saxinger M., Steinboeck A., Kugi A. [Magnetic Actuator Design for Strip Stabilizers in Hot Dip Galvanizing Lines]. *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Portland, OR, 2018, pp. 1–9. DOI: 10.1109/ias.2018.8544641
12. Rusek A., Shchur I., Lis M., Klatow K., Gastolek A., Sosnowski J. Mathematical Model for Analysis of Dynamical States of a Drive System Containing Rolling Mill and Roller Table Including the Selected Parameters of a Rolling Process. *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Koutynad Desnou*, 2015, pp. 256–261.
13. 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, no. 17, no. 2, pp. 58–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170208
14. Ryabchikov M.Yu. Adaptation of Strand-Type Tower Furnace Heating Simulation and of Metal Heating for Steel Strip Annealing Heating Modes Management. *Problemy upravleniya [Control Sciences]*, 2017, no. 5, pp. 61–69. (in Russ.)
15. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S. [Control of the Strip Heating Mode on the Continuous Hot Dip Galvanizing Unit Using Neural Network Models]. *Tekhnologiya mashinostroeniya [Technology of Mechanical Engineering]*, 2017, no. 2, pp. 37–43. (in Russ.)

Received 16 March 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Повышение качества регулирования натяжения полосы агрегата непрерывного горячего цинкования / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, В.В. Шохин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 120–126. DOI: 10.14529/power200211

FOR CITATION

Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Shokhin V.V., Khrumshin T.R., Nikolaev A.A. Improving the Quality of Tension Regulation in the Strip of the Continuous Hot Galvanizing Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 120–126. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200211