

УДК 621.771.067

Система управления электроприводом отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки

Н.В. Швидченко, С.И. Лукьянов, Р.С. Пишнограев
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: shvinikolaj@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующий способ управления электроприводом отводящего рольганга стана горячей прокатки обеспечивает требуемое натяжение в полосе за счёт рассогласования скоростей транспортируемой полосы и бочек роликов рольганга. Наличие рассогласования скоростей приводит к повышенному износу бочек роликов и более частой их замене, что сопряжено с большими экономическими затратами. В связи с этим актуальной является задача повышения эффективности работы электропривода отводящих рольгангов станов горячей прокатки.

Материалы и методы: Экспериментальная оценка влияния величины рассогласования скоростей на износ бочек роликов отводящих рольгангов осуществлена на примере стана 2000 ГП ОАО «ММК».

Результаты: Предложена методика расчета требуемого момента электропривода ролика отводящего рольганга с учетом технологических особенностей циклов прокатки горячих полос. Предложены способ управления электроприводом отводящего рольганга, обеспечивающий поддержание требуемого момента электродвигателя ролика рольганга в пределах заданного скоростного диапазона, а также структурная схема системы управления электроприводом ролика отводящего рольганга, реализующая предложенный способ управления.

Выводы: Предложенный способ управления электроприводом отводящего рольганга позволяет снизить интенсивность износа бочек роликов. Использование полученных результатов направлено на повышение эффективности работы электропривода отводящих рольгангов станов горячей прокатки за счет увеличения срока службы оборудования.

Ключевые слова: электропривод отводящего рольганга, износ бочек роликов, расчет моментов нагрузки электропривода, система управления, структурная схема.

Control System of Electric Collecting Roller Table of Hot Rolling Broad-Strip Mill

N.V. Shvidchenko, S.I. Lukyanov, R.S. Pishnograev
Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: shvinikolaj@yandex.ru

Abstract

Background: The current control method of electric collecting roller table of hot rolling broad-strip mill provides the required voltage in the strip due to the difference between the strip speed and the roller speed. This leads to the increased wear of rollbarrels and great replacement costs. As a result, the problem of efficiency increasing of the electric collecting roller table of hot rolling broad-strip mill is highly important.

Materials and methods: The experimental assessment of the influence of the speed difference for rollers barrels wear of roller table is carried out on the example of 2000 hot rolling broad-strip mill.

Results: The authors suggest the calculation method for the required torque electric collecting roller table with the technological features of the rolling cycles of hot strips. The article contains the control method for electric collecting roller table, which provides the required torque within the specified speed range in order to reduce the wear of barrels rolls. The block diagram for controlling the electric collecting roller table, which implements the proposed control method, is also developed.

Conclusions: The offered control method of the electric collecting roller table allows to decrease the broad-strip mill intensity. The obtained results can be applied to improve the efficiency of the collecting roller table of hot rolling broad-strip mill by increasing the equipment service life period.

Key words: electric collecting roller table, wear of roll barrels, calculating load torque of electric drive, control system, block diagram.

Отводящий рольганг (ОР) непрерывного широкополосного стана горячей прокатки предназначен для транспортирования горячекатаной полосы от последней катающей клетки стана к моталкам. В процессе транспортирования полосу охлаждают по заданному закону до

температуры смотки при помощи устройств ламинарного охлаждения.

ОР типового стана 2000 листопрокатного цеха №10 (ЛПЦ №10) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») структурно разделен на девять роликовых секций, в каждой из которых установ-

лено 58–60 приводных роликов. Питание электродвигателей каждой роликовой секции выполнено по групповой схеме от тиристорного преобразователя. Все ролики ОР приводятся в движение индивидуальными электродвигателями постоянного тока с независимым возбуждением. Соединение валов двигателей и роликов осуществляется через гибкую муфту или промежуточный вал и две гибких муфты.

Система управления электроприводом секции отводящего рольганга построена по принципу подчиненного регулирования параметров с внутренним астатическим контуром регулирования тока и внешним статическим контуром регулирования ЭДС.

Отводящий рольганг работает в циклическом режиме. На рис. 1 приведена типовая циклограмма задания на скорость секции отводящего рольганга при транспортировании полосы и сигналы наличия полосы в 7-й клетке (первая клетка чистовой группы (НМК7)) и принимающей моталке (НМПМ).

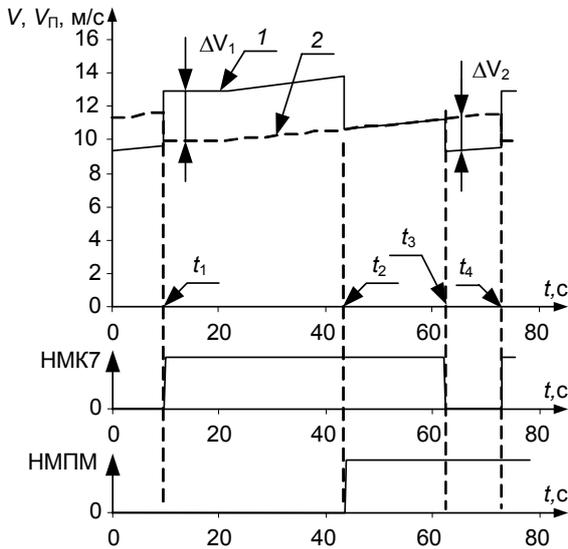


Рис. 1. Циклограмма работы электропривода секции ОР: 1 – заданная скорость секции рольганга; 2 – скорость полосы

В интервале времени $(t_1; t_2)$ (рис. 1) ОР работает в режиме транспортирования головной части полосы, когда ее скорость определяется электроприводом последней катающей клетки. Интервал времени $(t_2; t_3)$ соответствует режиму сопровождения полосы. В этом режиме скорость полосы определяется электроприводом последней катающей клетки и электроприводом натяжных роликов принимающей моталки. После выхода полосы из прокатных клетей (момент времени t_3) электропривод ОР переводится в режим транспортирования хвостовой части полосы (интервал времени $(t_3; t_4)$).

Согласно технологическим требованиям, предъявляемым к электроприводу ОР, в режиме приема головной части полосы электропривод ОР должен создавать натяжение в ней,

сонаправленное с движением полосы, в целях исключения петлеобразования. В режиме сопровождения электропривод ОР не должен сообщать усилия полосе, а скорость линейных образующих бочек роликов V должна быть согласована со скоростью полосы V_n для исключения появления царапин и задиrow на поверхности полосы. В режиме транспортирования хвостовой части полосы электропривод ОР должен сообщать полосе продольные усилия, направленные противоположно скорости движения полосы.

Для обеспечения выполнения электроприводом ОР предъявляемых к нему технологических требований в режиме транспортирования головной части полосы задание на линейную скорость V образующих бочек роликов секций ОР устанавливается больше скорости полосы на величину ΔV_1 (рис. 1), а в режиме транспортирования хвостовой части полосы – меньше на величину ΔV_2 . В режиме сопровождения скорость V задается равной скорости полосы V_n . Значения величин ΔV_1 и ΔV_2 для первых трех секций ОР приведены в таблице.

Значения величин ΔV_1 и ΔV_2 для первых трех секций ОР стана 2000 ЛПЦ №10

№ секции	1	2	3
ΔV_1 , % от V_n	12,5	15	15
ΔV_2 , % от V_n	17,5	15	15

Такой способ управления скоростным режимом работы электропривода обеспечивает гарантированное выполнение технологических требований для режимов транспортирования головной и хвостовой частей полосы [1]. Значительное рассогласование скоростей образующих бочек роликов и полосы приводит к интенсивному абразивному износу бочек роликов, так как работа A сил трения на контакте скольжения, определяющая величину износа, напрямую зависит от скорости скольжения [2]:

$$A = T \cdot \Delta V \cdot t, \quad (1)$$

где T – сила трения на контакте ролика с полосой; ΔV – рассогласование скоростей ролика и полосы; t – время скольжения.

По данным службы механика листопрокатного цеха №10 ОАО «ММК», замене по износу ежегодно подлежат до 100 роликов ОР (затраты на их замену достигают 10 млн руб.).

Для определения влияния типовых режимов работы электропривода секции ОР на интенсивность износа бочек роликов экспериментально были измерены сопротивления якорных цепей электродвигателей, диаметры бочек роликов, а также экспериментально определены значения произведения $c\Phi$ (c – конструктивная постоянная электродвигателя, Φ – поток возбуждения электродвигателя) 96 электроприводов первых двух секций ОР и рассчитаны фактические значения скоростей обра-

зующих бочек роликов для режимов транспортирования головной части (рис. 2) и сопровождения полосы (рис. 3).

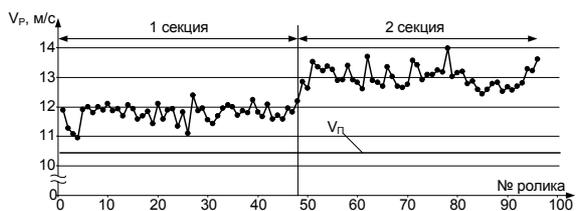


Рис. 2. Распределение окружных скоростей роликов 1, 2 секции ОР в режиме транспортирования головной части полосы сечением $3,8 \times 1115$

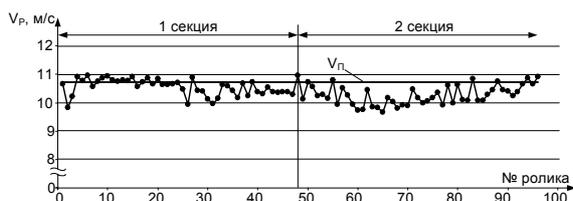


Рис. 3. Распределение окружных скоростей роликов 1, 2 секции ОР в режиме сопровождения полосы сечением $2,6 \times 1280$

Согласно полученным данным (рис. 2), среднее значение рассогласования скоростей образующих бочек ролика и полосы в режиме транспортирования головной части полосы сечением $3,8 \times 1115$ равно $1,33$ м/с для секции №1 и $2,65$ м/с для секции №2. В режиме сопровождения полосы сечением $2,6 \times 1280$ среднее значение рассогласования составляет: $0,2$ м/с – для секции №1 и $-0,42$ м/с – для секции №2 (рис. 3). Замечено, что значения рассогласований для второй секции больше, чем для первой секции, т.е. ролики второй секции более подвержены износу, что подтверждается данными службы механика цеха (за год эксплуатации выполнено 9 замен роликов по износу на первой секции и 74 замены роликов на второй секции).

Таким образом, требование по формированию в полосе растягивающих усилий в режиме транспортирования головной части полосы выполняется, требование по согласованию скоростей в режиме сопровождения полосы не выполняется. С учетом (1) можно сделать вывод, что значения рассогласований линейных скоростей полосы и образующих бочек роликов для режима транспортирования головной части полосы избыточны.

Одним из способов снижения интенсивности износа бочек роликов является разработка системы управления скоростным режимом отводящего рольганга, обеспечивающей:

1) уменьшение рассогласования скоростей роликов и полосы, не нарушая известных технологических требований по созданию тяну-

щих и тормозящих усилий в головной и хвостовой частях полосы соответственно;

2) выполнение требования по минимизации усилий на контакте ролик-полоса в режиме сопровождения полосы.

Поскольку технологические требования оговаривают тянущую способность ОР, т.е. моменты на валах электроприводов роликов, был выполнен анализ всех составляющих момента, действующих в системе ролик-полоса.

В системе ролик-полоса баланс моментов определяется выражением [3]

$$M_{ДВ} = M_{ХХ} + M_C + M_L + M_{ТР} + M_{ДИН}, \quad (2)$$

где $M_{ХХ}$ – момент холостого хода, определяемый потерями в двигателе и потерями на трение в подшипниках ролика под действием веса ролика, Н·м; M_C – момент сопротивления, обусловленный потерями на трение в подшипниках ролика под действием веса полосы, приходящейся на один ролик, Н·м; M_L – момент сопротивления, обусловленный потерями на разгон электроприводом воды, попавшей на бочку ролика при включении ламинарного охлаждения, Н·м; $M_{ТР}$ – момент транспортирования, определяемый потерями на трение на контакте ролик-полоса под действием веса полосы, приходящейся на один ролик, Н·м; $M_{ДИН}$ – динамическая нагрузка электропривода ролика ОР, Н·м.

В [4] показано, что момент холостого хода электроприводов ОР $M_{ХХi}$ распределён по роликам отводящего рольганга неравномерно и зависит от скорости вращения ролика. При этом определить единую аналитическую зависимость $M_{ХХ} = f(V)$, адекватную всем электроприводам роликов ОР, не представляется возможным. Для более точного определения величины $M_{ХХi}$ целесообразно создавать массив токов холостого хода электродвигателей роликов ОР во время прокрутки рольганга на различных скоростях без полосы [4]. Доказано, что для каждого исправного электропривода ролика ОР при заданной линейной скорости V значение тока холостого хода изменяется не более чем на $4,63\%$ в течение межремонтного интервала времени, что позволяет проводить измерения токов холостого хода одновременно в течение межремонтного периода.

Момент сопротивления M_C определяется по выражению [5]

$$M_C = G_M \cdot K_{ТР} \cdot R_{Ц},$$

где G_M – вес полосы, приходящейся на ролик, Н; $K_{ТР} = 0,005-0,01$ – коэффициент трения в подшипниках ролика (в цапфах); $R_{Ц}$ – радиус цапфы ролика, м.

Для расчета составляющей M_L получена экспериментальная зависимость $M_L(V_P)$ и соответствующий ей доверительный интервал (рис. 4) [6].

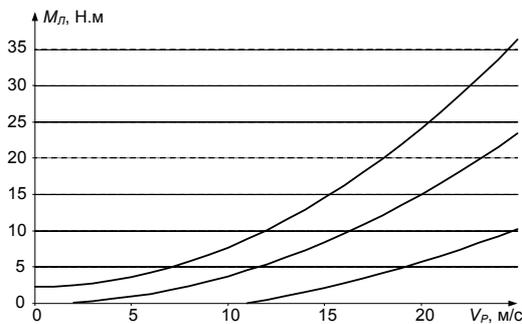


Рис. 4. Зависимость момента $M_{л}$ от V_p

Момент транспортирования $M_{ТР}$ определяется силой трения на контакте ролик-полоса и зависит от соотношения скорости образующей бочки ролика V_p и скорости полосы $V_{п}$. Известно, что максимальный коэффициент трения μ_{max} создается при соотношении $V_p/V_{п} = 1,02-1,03$ [7]. При меньшем соотношении $V_p/V_{п}$ электропривод ролика рольганга работает в режиме «сцепления» ролика с полосой – значение коэффициента трения изменяется от $\mu = 0$ при $V_p/V_{п} = 1$ до μ_{max} . При увеличении рассогласования скоростей электропривод ролика рольганга переходит в режим «буксовки» – трение на контакте ролик-полоса снижается.

Согласно данным, приведенным в таблице, требуемым режимом работы электропривода ОР при транспортировании головной и хвостовой частей полосы является режим «буксовки». Момент $M_{ТР}$ для данного режима рассчитывается по выражению

$$M_{ТР} = \pm G_M \cdot \mu_B \cdot R_p,$$

где $\mu_B = 0,2-0,3$ – коэффициент трения скольжения ролика о металл при «буксовке» [5]; знак «+» используется для случая транспортирования головной части полосы, знак «-» – для случая транспортирования хвостовой части полосы.

В режиме сопровождения полосы заданным режимом является режим «сцепления». Момент $M_{ТР}$ для данного режима рассчитывается по выражению

$$M_{ТР} = G_M \cdot \mu_{сц} \cdot R_p,$$

где $\mu_{сц} = -0,3-0,3$ – коэффициент трения ролика о металл в режиме «сцепления» [5].

Для определения динамической составляющей момента электропривода ролика ОР разработана динамическая модель [8].

По приведенным соотношениям для различных условий прокатки полос были рассчитаны диапазоны изменения моментов нагрузки электродвигателей роликов ОР и выполнен сравнительный анализ расчетных значений с измеренными данными системы токовой диагностики цеха. На рис. 5, 6 приведены распределения полезных составляющих моментов нагрузки M_{Pi} (момент электропривода

$M_{ДВi}$ за вычетом $M_{ХХi}$) вдоль 1, 2 секций ОР и соответствующие расчетные диапазоны.



Рис. 5. Распределение полезных составляющих моментов нагрузки электроприводов роликов ОР в режиме транспортирования головной части полосы сечением $2,8 \times 1235,0$

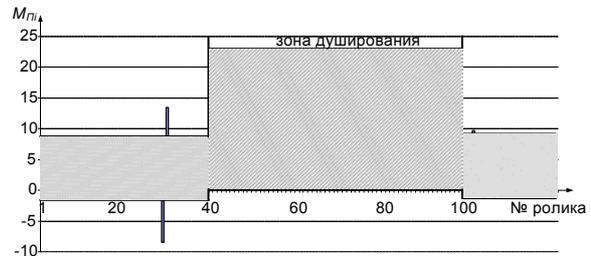


Рис. 6. Распределение полезных составляющих моментов нагрузки электроприводов роликов ОР в режиме сопровождения полосы сечением $2,0 \times 1235,0$

В целях увеличения стойкости роликов за счет снижения рассогласования скоростей, при условии выполнения технологических требований, идеальным режимом работы электропривода ОР в режиме транспортирования головной и хвостовой частей полосы является режим «сцепления» на контакте ролик-полоса при $\mu = \mu_{max}$. В режиме сопровождения полосы – режим «сцепления» при $\mu = 0$. Таким образом, возникает необходимость регулирования момента нагрузки электропривода в пределах скоростного диапазона ΔV_p изменения сил сцепления $[0,97V_{п}; 1,03V_{п}]$ (на практике, учитывая погрешность измерения/расчета скорости полосы и скорости образующей бочки ролика, ширина данного диапазона может быть увеличена). На рис. 7 приведена механическая характеристика системы электропривода ролика, обеспечивающая требуемый режим работы.

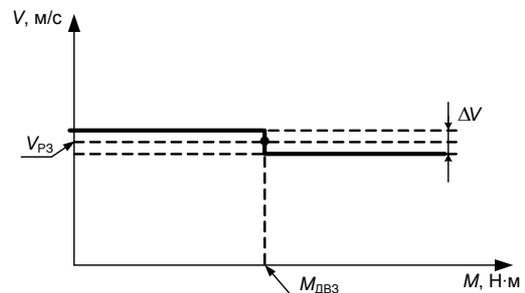


Рис. 7. Заданная механическая характеристика электропривода ролика ОР: V_{p3} – заданное значение скорости образующей бочки ролика; $M_{ДВ3}$ – заданное значение момента электропривода

Поддержание заданного момента $M_{ДВ3}$ выполняется в диапазоне скоростей ΔV_p . При достижении границ заданного диапазона выполняется стабилизация скорости.

Соответствующая циклограмма работы электропривода ролика приведена на рис. 8, где НМР – сигнал наличия металла на ролике ОР.

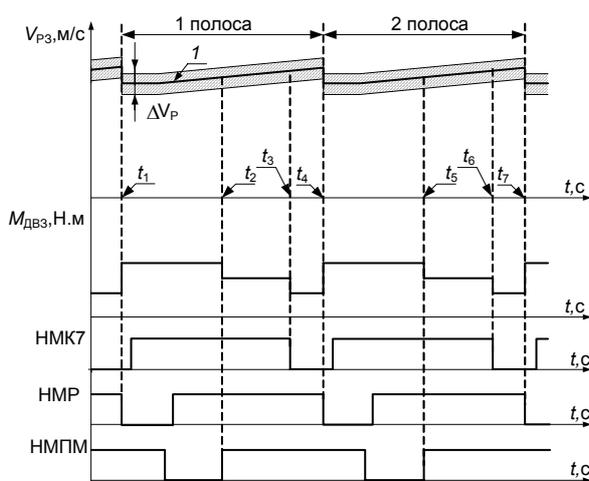


Рис. 8. Циклограмма работы электропривода ролика ОР (1 – скорость полосы)

Задание на скорость образующей бочки ролика задается на уровне скорости полосы в течение всего цикла прокатки. В пределах скоростного диапазона ΔV_p (рис. 8, заштрихованная зона) выполняется стабилизация требуемого момента $M_{двз}$, рассчитанного в зависимости от технологических условий работы электропривода и текущего режима его работы: режим транспортирования головной части полосы начинается в момент t_1 ухода предыдущей полосы с ролика рольганга (сигнал НМР = 0) до момента t_2 захвата полосы моталкой; режим сопровождения полосы начинается с момента t_2 до момента t_3 выхода полосы из 7-й прокатной клетки; режим транспортирования хвостовой части полосы начинается с момента t_3 до момента t_4 ухода полосы с ролика рольганга.

Регулирование моментов нагрузки электроприводов отдельных роликов возможно только при условии индивидуального управления скоростным режимом электроприводов роликов ОР с учетом конкретных условий работы каждого электропривода.

В соответствии с приведенной циклограммой (рис. 8) разработана структурная схема системы управления электроприводом ролика ОР (рис. 9).

Система управления выполнена по двухконтурной схеме с внешним статическим контуром скорости и внутренним астатическим контуром тока.

Управляющее воздействие выдается с вычислительного блока 1 (рис. 9) на систему управления по двум каналам: задание на скорость $u_{зс}$ и задание на момент $u_{зм}$ электропривода.

Задание $u_{зс}$ определяется скоростью полосы. Величина задания $u_{зм}$ пропорцио-

нальна величине требуемого момента электропривода $M_{двз}$, рассчитанного в соответствии с разработанными требованиями.

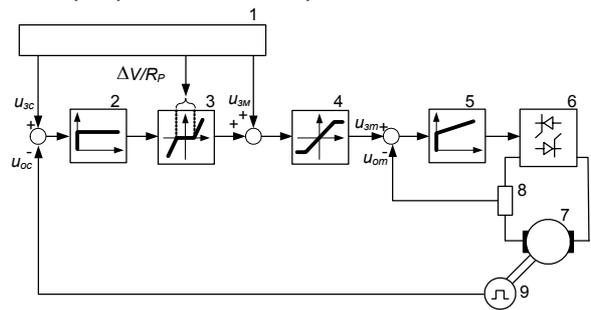


Рис. 9. Структурная схема системы управления электроприводом ролика ОР: 1 – вычислительный блок; 2 – П-регулятор скорости; 3 – блок «зона нечувствительности»; 4 – блок ограничения ускорения; 5 – ПИ-регулятор тока; 6 – преобразователь; 7 – электродвигатель; 8 – датчик тока; 9 – датчик скорости

Блок 3 обеспечивает поддержание требуемого момента $M_{двз}$ в соответствии с заданием $u_{зм}$ в заданном диапазоне скоростей ΔV_p (ширина диапазона ΔV_p задается в вычислительном блоке 1).

Таким образом, полученная математическая модель позволяет прогнозировать состояние металла гибов паропроводов и рассчитывать наиболее вероятные значения остаточной деформации.

Список литературы

1. Лукьянов С.И., Швидченко Н.В. Разработка технологических требований к электроприводу отводящего рольганга в целях снижения износа бочек роликов // Тр. V Междунар. (XVI Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу, 18–21 сентября 2007 г. – СПб., 2007. – С. 350–352.
2. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения: справочное пособие. – М.: Гос. науч.-тех. изд-во машиностроительной лит-ры, 1962. – 220 с.
3. Лукьянов С.И., Швидченко Н.В. Разработка системы управления электроприводом отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки 2000 ОАО «ММК» // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – 2010. – Ч. 3. – С. 207–213.
4. Пишнограев Р.С. Исследование токов холостого хода электродвигателей роликов отводящего рольганга стана 2000 горячей прокатки ОАО «ММК» // Электротехнические комплексы и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – Вып. 10. – С. 167–172.
5. Королёв А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов: учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 376 с.
6. Лукьянов С.И., Панов А.Н. Обработка экспериментальных данных: учеб. пособие. – 2-е изд. – Магнитогорск: МГМА, 1997. – 75 с.
7. Опыт повышения эффективности работы отводящего рольганга НШС / Б.А. Поляков, Е.А. Варшавский, З.П. Каретный и др. // Сталь. – 1987. – № 9. – С. 64–67.
8. Разработка математической модели электропривода отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки / С.И. Лукьянов, Н.В. Швидченко и др. // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: Междунар. сб. науч. трудов. Ч. 2. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – С. 71–76.

References

1. Luk'yanov, S.I., Shvidchenko, N.V. Razrabotka tekhnologicheskikh trebovaniy k elektroprivodu otvodyashchego rol'ganga s tsel'yu snizheniya iznosa bochek rolikov [Development of Technological Requirements for Electric Collecting Roller Table to Decrease Wear of Roll Barrels]. *Trudy V Mezhdunarodnoy (XVI Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Works of the Vth International (the XVIth All-Russian) Conference on Automated Electric Drive]. Saint-Petersburg, 2007, pp. 350–352.
2. Kragel'skiy, I.V., Vinogradova, I.E. *Koeffitsiyenty treniya. Spravochnoe posobie* [Friction Factors. Reference Book]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1962, p. 220.
3. Luk'yanov, S.I., Shvidchenko, N.V. Razrabotka sistemy upravleniya elektroprivodom otvodyashchego rol'ganga shirokopolosnogo stana goryachey prokatki 2000 OAO «ММК» [Development of Control System of Electric Collecting Roller Table of Hot Rolling Broad-strip 2000 ГП Mill]. *Izvestiya TulGu. Tekhnicheskie nauki*. 2010, issue 3, part 3, pp. 207–213.
4. Pishnograev, R.S. Issledovanie tokov kholostogo khoda elektrodvigateley rolikov otvodyashchego rol'ganga stana 2000 goryachey prokatki OAO «ММК» [Currents Research of No-load Current of Electric Collecting Roller Table of Hot Rolling Broad-strip 2000 ГП Mill]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy»* [The Universities' Collected Works]. Magnitogorsk, MGTU, 2005, issue 10, pp. 167–172.
5. Korolev, A.A. *Konstruktsiya i raschet mashin i mekhanizmov prokatnykh stanov. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Designing and Calculating the Machines and Mechanisms of Broad-strip Mills]. Moscow, Metallurgiya, 1985. 376 p.
6. Luk'yanov, S.I., Panov, A.N. *Obrabotka eksperimental'nykh dannykh: Uchebnoe posobie* [Processing of Experimental Data]. Magnitogorsk, MGMA, 1997. 75 p.
7. Polyakov, B.A., Varshavskiy, E.A., Karetnyy, Z.P. *Stal'*, 1987, no. 9, pp. 64–67.
8. Luk'yanov, S.I., Shvidchenko, N.V. Razrabotka matematicheskoy modeli elektroprivoda otvodyashchego rol'ganga shirokopolosnogo stana goryachey prokatki [Development of Mathematical Model of Electric Collecting Roller Table of Hot Rolling Broad-strip Mill]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Matematicheskoe i programmnnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh»* [International Collected Works on "Mathematical Support and Computer Software of Systems in Industrial and Social Areas of Life"]. Magnitogorsk, Izdatel'stvo Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova, 2011, part 2, pp. 71–76.

Лукьянов Сергей Иванович,

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
доктор технических наук, профессор кафедры электроники и микроэлектроники,
e-mail: pi@inbox.ru

Пишнограев Роман Сергеевич

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники,
телефон +7 (3519) 245219,
e-mail: pi@inbox.ru

Швидченко Николай Владимирович

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
старший преподаватель кафедры электроники и микроэлектроники,
телефон +7 (3519) 245219,
e-mail: shvinikolaj@yandex.ru