

Швидченко Н.В.¹, Лукьянов С.И.¹, Пишнограев Р.С.^{1,2}, Швидченко Д.В.^{1,2}, Красильников С.С.^{1,3}¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² ООО «Техноап Инжиниринг», г. Магнитогорск³ ООО «ММК-информсервис», г. Магнитогорск

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ОТВОДЯЩЕГО РОЛЬГАНГА СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

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. На стане 2000 ПАО «ММК» были проведены экспериментальные исследования составляющих момента нагрузки электродвигателей роликов отводящего рольганга. В работе использовались аналитические методы решения алгебраических задач, методы компьютерного моделирования и статистические методы обработки временных диаграмм изменения токов нагрузки электродвигателей роликов отводящего рольганга. По результатам экспериментальных исследований была предложена методика расчёта требуемого момента электропривода ролика отводящего рольганга. Выполнена коррекция обязательных технологических требований к электроприводу роликов отводящего рольганга с позиции снижения интенсивности износа бочек роликов и повышения качества поверхности полосы. Разработаны способ управления и функциональная схема системы управления электроприводом роликов отводящего рольганга, обеспечивающие выполнение новых технологических требований. Отличительной особенностью функциональной схемы является наличие в ее структуре вычислительного блока, выполняющего расчет требуемого по технологии момента электродвигателя и соответствующего задания на скорость вращения якоря электродвигателя. Проведена экспериментальная оценка эффективности предложенных технических решений. В результате для 13 % прокатанных на стане полос в режиме транспортирования головной части полосы рассогласование скоростей между роликами отводящего рольганга и полосой удалось снизить более чем в 2 раза, обеспечивая при этом необходимое натяжение в полосе.

Ключевые слова: стан горячей прокатки, отводящий рольганг, электропривод отводящего рольганга, система управления электроприводом отводящего рольганга, износ бочек роликов, ламинарное охлаждение полосы, оптимизация скоростного режима отводящего рольганга.

ВВЕДЕНИЕ

Отводящий рольганг (ОР) стана горячей прокатки предназначен для транспортирования полосы от последней прокатной клетки до моталки. Ролики ОР работают в тяжёлых условиях, связанных с высокой температурой транспортируемых полос и трением между роликами и полосой в процессе транспортировки. В результате ролики подвергаются интенсивному износу и частым поломкам [1-3]. Кроме того, трение полосы о ролики рольгангов является одной из причин повреждения нижней поверхности прокатываемых полос [3].

Одним из способов снижения интенсивности износа бочек роликов ОР и повышения качества поверхности полосы является исключение проскальзывания между роликами и полосой [4-6]. Однако в режиме транспортирования головной части полосы с момента выхода её из последней прокатной клетки до момента захвата полосы моталкой опережение скорости роликов рольганга над скоростью полосы является обязательным технологическим требованием, направленным на обеспечение натяжения и надёжного транспортирования полосы. В режиме транспортирования хвостовой части полосы после её выхода из прокатной клетки обязательным технологическим требованием является отставание скорости рольганга от скорости полосы для обеспечения её натяжения и качественной смотки. На практике величины опережения и отставания подбираются экспериментальным путём с позиции обеспечения надёжного транспортирования и смотки полосы

и задаются посредством человеко-машинного интерфейса с поста оператора [7]. При этом значительное рассогласование скоростей роликов и полосы в данных режимах работы ОР приводит к интенсивному износу бочек роликов и повреждению поверхности полосы. Первой целью данного исследования является уменьшение рассогласования скоростей роликов и полосы, не нарушая известных требований по созданию тянущих усилий в головной и хвостовой частях полосы.

Второй целью данного исследования является минимизация усилий на контакте роликов с полосой в режиме транспортирования средней части полосы, когда головная часть полосы захвачена барабаном моталки. В данном режиме натяжение полосы осуществляется между моталкой и клетью, и наличие усилий на контакте роликов с полосой является нежелательным, поскольку приводит к износу бочек роликов и снижению качества поверхности полосы. На практике при транспортировании средней части полосы скорость роликов рольганга задаётся равной скорости полосы. Недостатком данного способа является то, что согласование скорости ролика и полосы не гарантирует минимизации усилий на их контакте, поскольку в условиях сцепления ролика с полосой усилие на их контакте может изменяться от максимального тормозящего усилия до максимального тянущего усилия. В работах [4, 5] авторами рекомендуется управлять не скоростью, а моментом электропривода ролика M , поддерживая последний на уровне момента холостого хода $M_{\text{хх}}$. Кроме того, в режимах разгона и торможения в дополнение к заданному моменту холостого хода добавляется составляющая динамического момента $M_{\text{дин}}$, рассчитанная по показаниям датчика скорости. Однако

известно [8], что помимо указанных составляющих в момент нагрузки электропривода M ролика рольганга присутствует момент сопротивления M_c , обусловленный трением в подшипниках ролика под действием веса полосы, который также нужно компенсировать. Кроме того, на момент нагрузки электропривода ролика ОР значимое влияние могут оказать такие технологические факторы, как скорость транспортирования полосы (изменяется в широких пределах от 2 до 20 м/с в зависимости от сортамента) и подача на полосу воды при включении установок охлаждения полосы. Однако в литературе подобные исследования отсутствуют.

Объектом данного исследования является ОР стана 2000 ПАО «ММК». Достижение поставленных целей потребовало решения следующих задач:

1. Проведение экспериментальных исследований составляющих моментов нагрузки электродвигателей роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК».

2. Разработка методики расчёта требуемого момента электропривода ролика ОР в различных режимах транспортирования полосы на основании проведенных экспериментальных исследований.

3. Коррекция обязательных технологических требований к электроприводу роликов ОР с позиции снижения интенсивности износа бочек роликов и повышения качества поверхности полосы.

4. Разработка способа и системы управления электроприводом роликов ОР, обеспечивающих выполнение новых технологических требований.

5. Экспериментальная оценка эффективности предложенных технических решений.

ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА ОТВОДЯЩЕМ РОЛЬГАНГЕ

Упрощенная структурная схема уборочной линии стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» приведена на **рис. 1**. После выхода из последней прокатной клетки 1 полоса транспортируется роликами ОР 2 до моталки 3, где осуществляется её смотка. Транспортировка полосы по ОР выполняется с ускорением для обеспечения постоянства температуры на выходе из клетки. Для обеспечения требуемой температуры смотки полоса сверху и снизу охлаждается водой из установок ламинарного охлаждения 4.

Каждый ролик ОР приводится в движение индивидуальным приводом постоянного тока. ОР разделён на роликовые секции с групповым управлением скоростью роликов каждой секции. Система управления электроприводом секции ОР приведена на **рис. 2**. Задание на скорость ОР V_3 формируется в АСУ ТП стана в соответствии с основными технологическими требованиями к электроприводу ОР. Оператор на посту управления имеет возможность корректировать задание на скорость роликов секции ОР.

Типовая временная диаграмма изменения задания на скорость первой секции ОР стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» приведена на **рис. 3**. Дополнительно на **рис. 3** представлены вспомогательные сигналы наличия металла в клетке и наличия металла в моталке, а также относительное значение задания на скорость рольганга к скорости полосы.

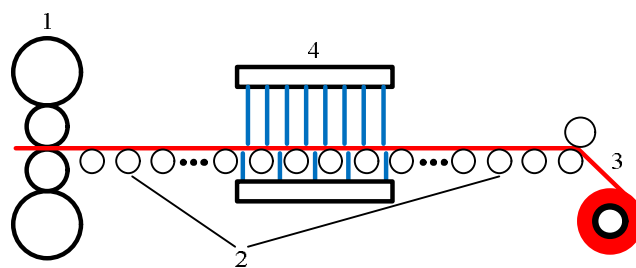


Рис. 1. Упрощенная структура отводящего рольганга

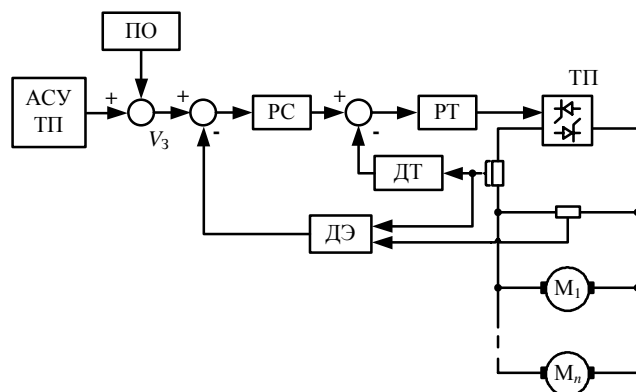


Рис. 2. Система управления скоростью секции ОР:

ПО – пульт оператора; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ТП – тиристорный преобразователь; ДЭ – датчик ЭДС; M_1 – M_n – электродвигатели

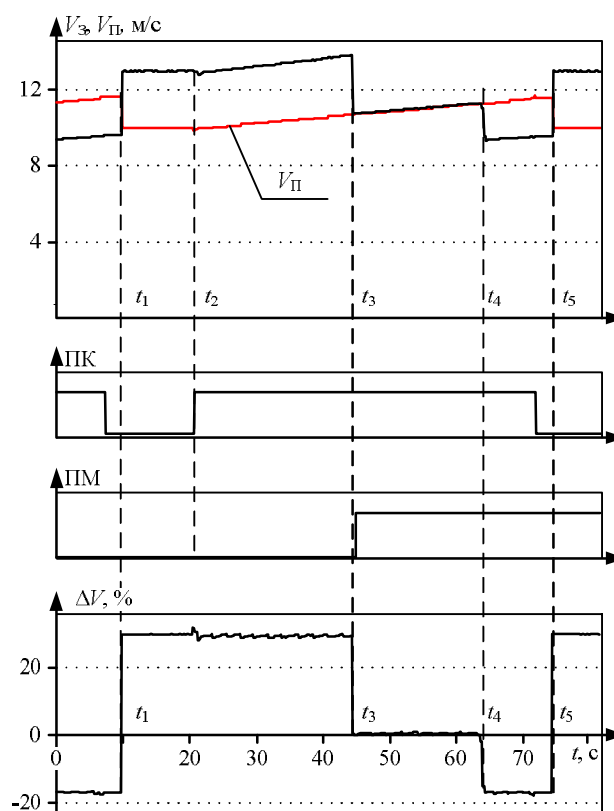


Рис. 3. Типовая временная диаграмма изменения задания на скорость 1-й секции ОР: V_3 – задание на скорость секции; V_p – скорость полосы; ПК – сигнал наличия полосы в последней прокатной клетке; ПМ – сигнал наличия полосы в принимающей моталке; ΔV – изменение скорости секции ОР относительно скорости полосы

В момент времени t_1 выполняется разгон ОР для приёма головной части полосы. В интервале времени (t_2 ; t_3) осуществляется транспортирование головной части полосы. С момента t_3 захвата полосы роликотами моталки скорость роликов секции ОР задаётся равной скорости полосы (скорости прокатной клети). В момент времени t_4 перед выходом полосы из клети скорость роликов секции ОР задаётся с отставанием относительно скорости полосы (скорости моталки) с целью качественной смотки хвостовой части полосы. В момент времени t_5 задание на скорость роликов секции ОР выставляется с опережением скорости прокатной клети для приёма следующей полосы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно [8] общий момент электродвигателя ролика ОР определяется выражением

$$M = M_{\text{хх}} + M_{\text{дин}} + M_{\text{с}} + M_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент транспортирования, обусловленный наличием сил трения на контакте ролик-полоса в одном межроликовом пространстве.

На стане 2000 ПАО «ММК» проведены экспериментальные исследования составляющих момента нагрузки электродвигателей роликов ОР (1).

Исследование моментов холостого хода

Проведены исследования изменения токов холостого хода электродвигателей роликов ОР [9]. С этой целью на стане 2000 ПАО «ММК» выполнены измерения токов якоря электродвигателей роликов ОР $I_{\text{ххi}}$ в режиме прокрутки роликов рольганга на холостом ходу. Измерения проводились на различном уровне скорости ОР и в различные временные интервалы для одного уровня скорости.

В результате статистического анализа полученных данных установлено:

Уровень скорости ОР значимо влияет на величину и распределение токов холостого хода $I_{\text{ххi}}$. Доказано, что изменение токов холостого хода $I_{\text{ххi}}$ электроприводов роликов ОР в зависимости от скорости V_3 носит случайный характер.

Значения токов холостого хода $I_{\text{ххi}}$ с течением времени претерпевают значительные изменения. Доказано, что в течение межремонтного периода (одна неделя) можно с вероятностью $p = 0,95$ утверждать, что ток холостого хода изменится не более чем на 4,63% при условии неизменного состояния механической части электропривода (исправность подшипниковых узлов).

На основании полученных результатов можно утверждать, что для определения моментов холостого хода электродвигателей роликов ОР целесообразно создавать массив токов холостого хода $I_{\text{ххi}}$ электроприводов роликов ОР после завершения ремонтных работ при прокрутке роликов ОР на холостом ходу на различной скорости ОР V_3 в пределах рабочего диапазона скоростей.

Расчет значения момента $M_{\text{ххi}}$ выполняется по известному выражению [10]:

$$M_{\text{ххi}} = I_{\text{ххi}} (c\Phi)_i, \quad (2)$$

где $(c\Phi)_i$ – произведение конструктивной постоянной электродвигателя на его поток, В·с.

Момент сопротивления

Значение $M_{\text{с}}$ для электродвигателя ролика ОР можно рассчитать по выражению

$$M_{\text{с}} = G_{\text{м}} K_{\text{тр}} R_{\text{ц}}, \quad (3)$$

где $G_{\text{м}}$ – вес полосы в межроликовом пространстве, Н; $K_{\text{тр}} = 0,05-0,1$ – коэффициент трения в подшипниках ролика; $R_{\text{ц}}$ – радиус цапфы ролика, м.

В работе [9] показано, что для более точного расчета момента $M_{\text{с}}$ можно использовать известные значения моментов холостого хода электродвигателей T_i :

$$M_{\text{с}} = M_{\text{хх}} \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{р}}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{р}}$ – вес ролика ОР, Н.

Динамический момент

С целью определения динамической составляющей момента электропривода $M_{\text{дин}}$ ролика ОР для технологических параметров электропривода роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК» разработана динамическая модель [9]. Доказана адекватность расчётов на данной динамической модели экспериментальным данным.

Момент транспортирования

Момент $M_{\text{тр}}$ определяется силой трения на контакте ролик-полоса и зависит от соотношения скорости образующей бочки ролика $V_{\text{р}}$ и полосы $V_{\text{п}}$ (рис. 4) [11, 12]. При согласовании скоростей электропривод работает в режиме сцепления ролика с полосой, при этом усилие на контакте изменяется от максимального тормозящего до максимального тянущего значений. При увеличении рассогласования скоростей электропривод ролика рольганга переходит в режим «буксовки» – трение на контакте ролик-полоса снижается.

Заданным режимом работы электропривода ОР при транспортировании головной и хвостовой частей полосы является режим «буксовки». Момент $M_{\text{тр}}$ для данного режима рассчитывается по выражению:

$$M_{\text{тр}} = \pm G_{\text{м}} \mu_{\text{б}} R_{\text{р}}, \quad (5)$$

где $\mu_{\text{б}} = 0,2-0,3$ – коэффициент трения скольжения ролика о металл в режиме буксования [11, 12].

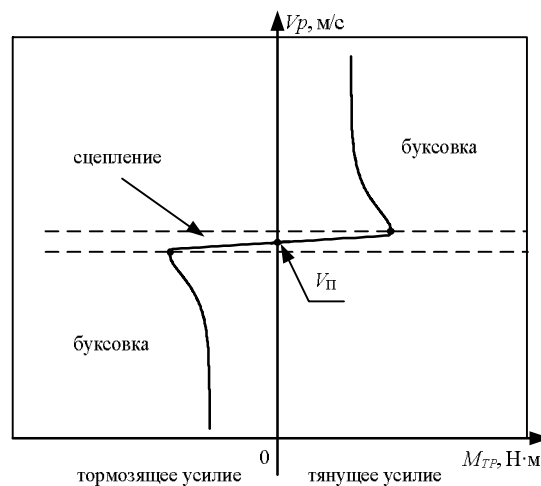


Рис. 4. Качественная зависимость момента транспортирования от рассогласования скоростей образующей бочки ролика и полосы

Знак «+» в выражении (5) используется для случая транспортирования головной части полосы, знак «-» – для случая транспортирования хвостовой части полосы.

В режиме транспортирования центральной части полосы заданным режимом является режим «сцепления». Момент $M_{\text{ТР}}$ для данного режима рассчитывается по выражению

$$M_{\text{ТР}} = G_{\text{М}} \mu_{\text{СЦ}} R_{\text{Р}}, \quad (6)$$

где $\mu_{\text{СЦ}} = -0,3 \div -0,3$ – коэффициент трения ролика о металл в режиме сцепления [11, 12].

Момент нагрузки от действия охлаждающей воды

На основании (1) с учётом (2), (4)–(6) был выполнен расчёт моментов нагрузки электродвигателей роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК». Расчёт проведён для роликов первых двух секций ОР (120 роликов) при транспортировании полос различного сортамента для режимов транспортирования головной и средней частей полосы. Установлено, что для большинства роликов, находящихся в зоне действия ламинарного охлаждения (от 20 до 40 роликов в зависимости от схемы охлаждения), для всех исследуемых случаев расчётные и экспериментальные значения существенно различаются (до 190%). Таким образом, известная методика (1) требует уточнения с позиции учёта действия охлаждающей воды на нагрузку электропривода ролика.

Поскольку в технической литературе отсутствуют исследования влияния фактора включения ламинарного охлаждения на нагрузку электродвигателей роликов ОР, было принято решение провести экспериментальные исследования в условиях стана 2000 ПАО «ММК». На рис. 5 приведено типовое распределение токов нагрузки электродвигателей за вычетом измеренных значений токов холостого хода для первых двух секций ОР при включении одной из схем охлаждения полосы.

Анализ представленных распределений показал:

1. Включение ламинарного охлаждения приводит к увеличению токов нагрузки электродвигателей роликов, находящихся в зоне действия подачи воды.

2. Чем выше скорость ОР, тем больше величина изменение токов нагрузки.

3. Увеличение нагрузки наблюдается преимущественно при включении нижних устройств подачи воды. Подача воды только из верхних устройств не приводит к значительному изменению нагрузки.

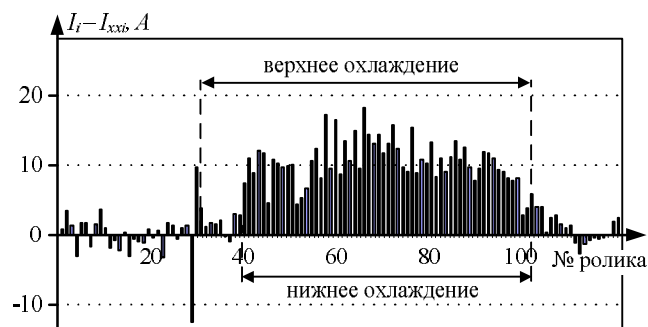


Рис. 5. Распределение токов нагрузки электродвигателей

На основании вышеизложенного можно предположить, что изменение нагрузки при включении ламинарного охлаждения обуславливается потерями на «разгон» воды, попадающей на бочку ролика. Такая модель объясняет, в частности, почему не наблюдается значительного изменения нагрузки при включении только верхних устройств охлаждения. При подаче воды с верхних устройств значительная часть воды остается на полосе и испаряется, не достигая бочек роликов, в то время как вода из нижних устройств попадает на ролики практически в полном объеме [13].

Выделение составляющей нагрузки от действия охлаждающей воды из общего тока нагрузки усложняется тем, что установки ламинарного охлаждения включаются одновременно с перемещением полосы по рольгангу. Поэтому было принято решение провести эксперимент по включению ламинарного охлаждения в режиме прокрутки роликов ОР на холостом ходу. В ходе эксперимента выполнялся последовательный разгон роликов 1, 2 секций ОР до установившихся значений скорости образующих бочек роликов $V_{31} = V_{32} = 10 \text{ м/с}$, 12 м/с , 14 м/с , 18 м/с , 20 м/с с последующим включением нижних устройств системы охлаждения (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5) (рис. 6).

На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны составляющие тока нагрузки, обусловленные действием воды из системы охлаждения:

$$I_{\text{Л}} = I_i - I_{\text{ХХ}}, \quad (7)$$

где I_i – ток электродвигателя, измеренный после включения охлаждения (см. рис. 6 – периоды T_1 – T_5), А; $I_{\text{ХХ}}$ – ток электродвигателя, измеренный перед включением охлаждения, А.

С помощью критерия Пирсона доказано соответствие полученных распределений (7) нормальному закону, что позволяет применить к ним регрессионный анализ [14]. В таблице приведены средние значения и выборочные среднеквадратические отклонения для моментов $M_{\text{Л}}$, рассчитанных по полученным экспериментальным данным $I_{\text{Л}}$ (7) для каждого уровня скорости V_3 .

На основании полученных данных (см. рис. 6), а также учитывая, что согласно принятой теоретической модели, момент $M_{\text{Л}}$ обусловлен «разгоном» воды, т.е. приданием ей дополнительной кинетической энергии, в качестве регрессионной кривой было решено использовать полиномиальную квадратичную зависимости вида

$$\overline{M_{\text{Л}}}(V_{\text{Р}}) = A_2 V_{\text{Р}}^2 + A_1 V_{\text{Р}}, \quad (8)$$

где A_1, A_2 – коэффициенты регрессии.

Определение коэффициентов уравнения регрессии выполнено методом наименьших квадратов по данным таблице. В результате уравнение регрессии приняло вид, показанный на рис. 7.

С помощью критерия Фишера доказана адекватность полученной регрессионной зависимости экспериментальным данным [14]. Предложенная методика расчёта составляющей момента $M_{\text{Л}}$ может быть использована на других станах горячей прокатки.

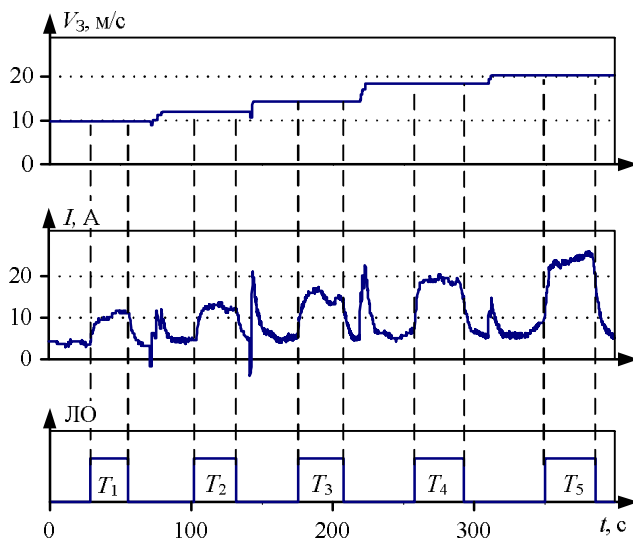


Рис. 6. Временная диаграмма изменения тока нагрузки электропривода ролика ОР при включении нижней установки ламинарного охлаждения в зоне данного ролика

Обработка экспериментальных данных

V_3 , м/с	\bar{M}_L , Н·м	$S\{M_L\}$, Н·м
10	7,89	3,42
12	10,67	3,80
14	13,89	4,81
20	23,91	8,32

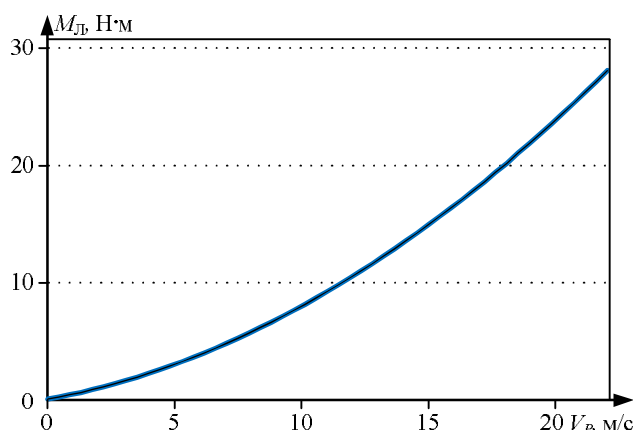


Рис. 7. Экспериментальная зависимость момента сопротивления M_L от окружной скорости ролика V_P

МЕТОДИКА

С учётом полученной зависимости выражение для расчета момента нагрузки электропривода ролика ОР примет вид

$$M = M_{xx} + M_c + M_{тр} + M_L + M_{дин}. \quad (9)$$

По данному выражению выполнен расчёт моментов нагрузки электродвигателей роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК». Расчёт проведён для роликов первых двух секций ОР при транспортировании полос различного сортамента для режимов транспортирования головной и средней частей полосы. Доказана адекватность расчётных результатов экспериментальным данным.

На основании проведённых исследований предложена следующая методика расчёта требуемого момента нагрузки электропривода ролика ОР:

1. Предварительно создается массив токов холостого хода I_{xxi} электродвигателей роликов отводящего рольганга в рабочем диапазоне скоростей транспортирования (от 2 до 20 м/с). Выполняется расчет момента холостого хода M_{xxi} электропривода ролика отводящего рольганга по выражению (2).

2. Выполняется расчет момента M_{ci} электропривода ролика отводящего рольганга по выражению (4).

3. Выполняется расчет динамического момента $M_{динi}$ электропривода ролика отводящего рольганга на разработанной динамической модели по изменению задания на скорость транспортирования V_3 .

4. Для электроприводов роликов, находящихся в зоне действия системы охлаждения, по выражению (8) выполняется расчет момента $M_{ли}$.

5. Выполняется расчет требуемого момента транспортирования $M_{тр}$ электропривода ролика отводящего рольганга с позиции снижения износа бочек роликов и повышения качества поверхности полосы:

$$M_{тр} = G_m \mu_{сц} R_p, \quad (10)$$

где $\mu_{сц} = 0,3$ – в режиме транспортирования головной части полосы; $\mu_{сц} = 0$ – в режиме транспортирования средней части полосы; $\mu_{сц} = -0,3$ – в режиме транспортирования хвостовой части полосы.

6. По выражению (9) выполняется расчет общего момента электродвигателя ролика отводящего рольганга M_i .

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Проведенные исследования позволили уточнить известные технологические требования к электроприводу роликов ОР с позиции снижения износа роликов.

Электропривод роликов ОР в рабочих режимах транспортирования полосы должен обеспечить реализацию известных технологических требований в пределах диапазона изменения сил сцепления на контакте ролик-полоса (рис. 8), а именно:

1. В режиме транспортирования головной части полосы задание на скорость ролика ОР должно обеспечивать требуемый момент нагрузки электропривода:

$$M = M_{xx} + M_c + M_{тр} + M_L + M_{дин}, \quad (11)$$

где $M_{тр}$ – момент, рассчитанный по выражению (10) для случая транспортирования головной части полосы.

2. В режиме транспортирования центральной части полосы задание на скорость ролика ОР должно обеспечивать требуемый момент нагрузки электропривода:

$$M = M_{xx} + M_c + M_L + M_{дин}. \quad (12)$$

3. В режиме транспортирования хвостовой части полосы задание на скорость ролика ОР должно обеспечивать требуемый момент нагрузки электропривода:

$$M = M_{xx} + M_c + M_{тр} + M_L + M_{дин}, \quad (13)$$

где $M_{тр}$ – момент, рассчитанный по выражению (10) для случая транспортирования хвостовой части полосы.

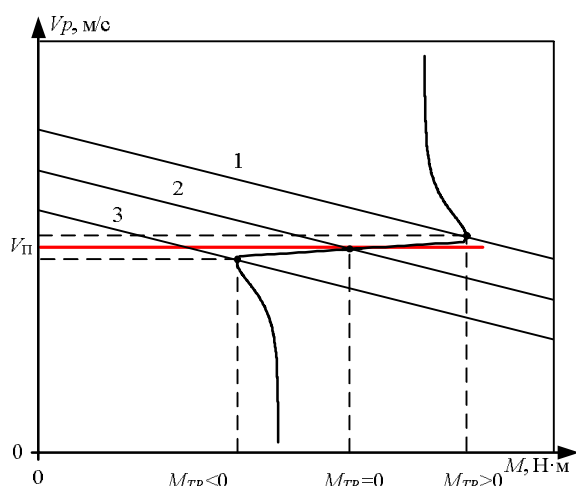


Рис. 8. К расчету технологических требований к электроприводу ролика ОР: 1 – в режиме транспортирования головной части полосы; 2 – в режиме сопровождения полосы; 3 – в режиме транспортирования хвостовой части полосы

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ

Учитывая наметившуюся тенденцию перехода от групповой схемы питания электродвигателей роликов ОР к индивидуальной схеме, предложена функциональная схема системы управления электроприводом ролика ОР (рис. 9).

Отличительной особенностью схемы является наличие в ее структуре вычислительного блока (ВБ), выполняющего расчет требуемого по технологии момента электродвигателя M ролика ОР и соответствующего задания на скорость вращения якоря электродвигателя V_3 .

Управляющее воздействие V_3 (см. рис. 9) формируется из двух составляющих. Составляющая $V_{3П}$ задается пропорциональной скорости полосы в соответствии с выражением

$$V_{3П} = \frac{V_{П} k_{ОЭ}}{R_p} (сФ), \quad (14)$$

где $k_{ОЭ}$ – коэффициент обратной связи по ЭДС, В·с/рад.

Корректирующее воздействие ΔV_3 рассчитывается по требуемому по технологии значению момента электродвигателя ролика M (9):

$$\Delta V_3 = \frac{M_i}{(сФ)} \cdot \frac{k_{ОТ}}{k_{РС}}, \quad (15)$$

где $k_{ОТ}$ – коэффициент обратной связи по току, В/А; $k_{РС}$ – коэффициент передачи регулятора скорости.

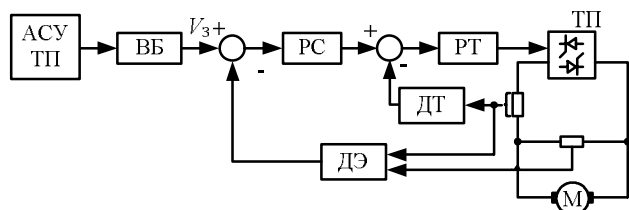


Рис. 9. Система управления скоростью ролика ОР

Из АСУ ТП в ВБ поступают следующие сигналы:

- 1) h, S – толщина и ширина полосы соответственно, м;
- 2) дискретные сигналы управления клапанами задвижек системы охлаждения полосы;
- 3) сигнал скорости движения полосы $V_{П}$, м/с;
- 4) дискретные сигналы наличия металла для определения режима транспортирования полосы: ПК и ПМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальную апробацию результатов исследований было решено провести на второй секции ОР стана 2000 ПАО «ММК», поскольку наибольшее количество замен роликов по причине износа приходится именно на эту секцию. Апробация проводилась в режиме транспортирования головной части полос среднего сортамента от 2,8 до 6,5 мм. Согласно разработанной методике (9) с учетом технологических условий транспортирования полос для электроприводов второй секции ОР был выполнен расчет требуемых моментов нагрузки. Учитывая, что в условиях группового питания электродвигателей секции индивидуальное регулирование скорости роликов невозможно, при расчете требуемого задания на опережение учитывались электродвигатели с наибольшей нагрузкой. По выражению (15) для параметров электропривода секций был выполнен расчет требуемого опережения скорости секции относительно полосы. В режиме транспортирования головной части полос указанного сортамента штатное задание на опережение заменялось расчетным. По требованию технологического персонала разгон и прием головной части полос осуществлялись в штатном режиме. Коррекция скорости выполнялась только после заполнения полосой второй секции ОР.

На рис. 10 приведены временные диаграммы изменения задания на скорость второй секции ОР при включении алгоритма коррекции скоростного режима. Для сравнения на каждой из диаграмм показано по две полосы одинакового сортамента: первая полоса транспортируется без коррекции скорости со штатным опережением полосы, вторая – с расчетным опережением.

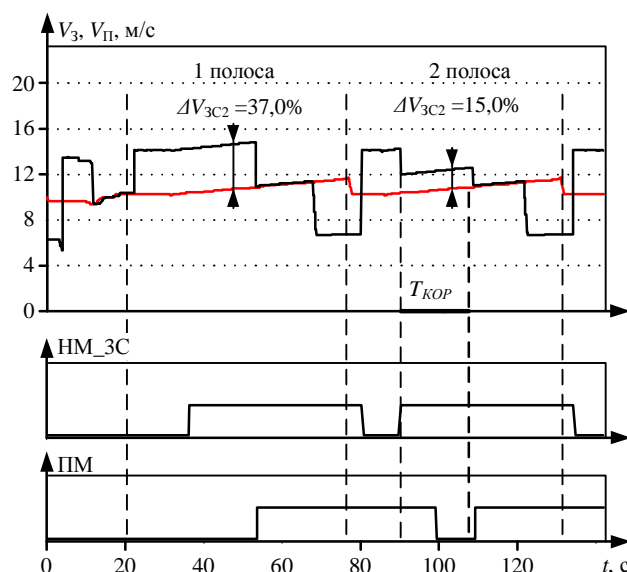


Рис. 10. Включение алгоритма коррекции скоростного режима секции ОР

За три месяца промышленной апробации были получены следующие результаты:

1. Для 13 % прокатанных полос на стане полос рассогласование скоростей между роликами второй секции и полосой в режиме транспортирования головной части полосы было снижено более чем в 2 раза.

2. Для указанных 13 % полос не было зафиксировано ни одного случая аварийного застревания полосы на рольганге или в моталке.

Анализ распределений токов нагрузки электродвигателей второй секции ОР показал, что все электродвигатели секции обеспечивают требуемое при транспортировании головной части полосы тянущее усилие на контакте ролика с полосой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяемый в настоящее время способ управления скоростным режимом ОР стана горячей прокатки приводит к интенсивному износу бочек роликов и ухудшению качества поверхности полосы из-за чрезмерного рассогласования скоростей роликов и полосы.

Оптимизация скоростного режима ОР с позиции уменьшения рассогласования скоростей роликов и полосы в режимах транспортирования головной и хвостовой частей полосы (при обязательном выполнении требований по созданию натяжения в полосе) и минимизации усилий на контакте роликов с полосой в режиме транспортирования средней части полосы позволит снизить износ бочек роликов и повысить качество поверхности полосы без значительных капитальных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давильбеков Н.Х., Клеменьев В.А., Курпанов Г.Г. Увеличение стойкости роликов отводящего рольганга листопркатных станов // *Сталь*. 2003. №10. С. 44-47
2. Поляков Б.А., Варшавский Е.А., Каретный З.П. Опыт повышения эффективности работы отводящего рольганга НШС // *Сталь*. 1987. №9. С.64-67.
3. Calculation of the stress-strain state of the deflector rollers / A. Alimbetov, Y. Kaliyev, A. Zhauyt, G. Yestemessova, S. Yussupova, M. Nurbakyt // *Vibroengineering PROCEDIA*. 2018. Vol. 18. Pp. 183-188. doi: 10.21595/vp.2018.19861.
4. Pat. JPH091219 (A). B21B37/00; B21B37/46; B21B39/12. Method for controlling speed of roller table of rolling mill / Yoshikazu M., Toshio S., Takayuki T.; No. JP19950149029, application date 15.06.1995, publication date 07.01.1997.
5. Pat. JPS61262416 (A). B21B39/12. Control method for roller table driving of rolling mill / Yoshiyuki K.; No. JP19850103184, application date 15.05.1985, publication date 20.11.1986.
6. А.с. № 1045763 А1 СССР, МКИ B21B 37/00. Способ регулирования скорости вращения роликов отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки / Антонов В.М., Абиев А.Г., Кавыгин В.В., Белянский А.Д., Котлюба Г.Н.; заявитель Липецкий политехнический институт, Новолипецкий металлургический завод. № 2914017, заявл. 23.04.1980, опубл. 15.10.1983.
7. Yajun W. Designing of hot strip rolling mill Control // *System World Journal of Engineering and Technology*. 2016. No. 4. Pp. 413-417. doi: 10.4236/wjet.2016.43040 .
8. Пат. №2373006 С2 Российская Федерация, МПК B21B 37/46. Способ управления скоростным режимом отводящего рольганга широкополосного стана / Титов А.В., Лукьянов С.И., Швидченко Н.В., Швидченко Д.В., Муштаев А.Н., Бочковский Н.И.; заявитель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». № 2007133478/02, заявл. 06.09.2007, опубл. 20.11.2009.
9. Система диагностирования оборудования электропривода отводящего рольганга стана 2000 горячей прокатки / С.И. Лукьянов, Р.С. Пишнограев, Н.В. Швидченко, А.П. Мухин, А.С. Лазаренко, А.А. Юдина, Е.В. Астафьев // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2005. №4(12). С. 51-53.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
11. Тянущая способность отводящего рольганга широкополосного стана / Б.А. Поляков, Ю.С. Зубков, Е.А. Варшавский, В.В. Володин // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1986. №10. С. 64-67.
12. Лукьянов С.И., Швидченко Н.В., Пишнограев Р.С. Система управления электроприводом отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки // *Вестник ИГЭУ*. 2012. № 6. С. 95-99.
13. Temperature measurement technology in water cooling process and high accuracy cooling control technology for high tensile hot rolled strip / T. Honda, S. Nakagawa, H. Tachibana, C. Uematsu, Y. Buei, K. Sakagami // *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2016. No. 111. Pp. 18-23 URL: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/111-04.pdf> (дата обращения: 09.01.2021).
14. Diez D.M., Barr C.D., Cetinkaya-Rundel M., Dorazio L. *Advanced High School Statistic*. OpenIntro: Inc. First Edition, 2014. 402 p.

Поступила в редакцию 12 января 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SPEED RATE OPTIMIZATION OF THE RUN-OUT TABLE OF A HOT STRIP MILL

Nikolay V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Engineer, OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.shvidchenko@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>.

Sergey I. Lukyanov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: s.lukyanov@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-7627>

Roman S. Pishnograev

Ph.D. (Engineering), Leading Engineer, OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: rspishnograev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-5723>.

Dmitry V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Vice Director, «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: schvidmit@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1932-9239>.

Sergey S. Krasilnikov

Ph.D. (Engineering), Engineer, OSC «MMK-Informservice», Magnitogorsk, Russia. E-mail: krasilnikov.ss@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3131-7193>

The existing method of run-out table drive control at the hot strip mill ensures the required strip tension by setting a difference between the speeds of the delivered strip and roller bodies. Such difference results in a higher wear rate of roller bodies and their more frequent replacement entailing high expenses. Thus, a currently important objective is to increase efficiency of run-out table drives on hot strip mills. The research group carried out experimental research of run-out table roller motor torque elements at a hot strip mill, PJSC MMK. The paper uses analytical methods to solve algebraic equations, computer modeling methods and statistical methods to process run-out table motor current variation diagram. As a result of the research performed, the authors offered the methodology to calculate the required run-out table roller drive load torque. They also adjusted the mandatory process requirements for a run-out table roller drive with regard to a decreased wear rate of roller bodies and the improved strip surface quality. The authors developed a method and a functional diagram to control the drive of run-out table rollers ensuring compliance with new process requirements. A special feature of the diagram is a computing block calculating run-out table roller motor torque according to the process requirements and relevant reference motor armature speed. The efficiency of the offered technical solutions was under an experimental evaluation. As a result, for 13 percent of rolled strips the difference between speeds of the run-out table rollers and the strip in a strip head delivery mode decreased by 50% or even more, while providing the necessary tension in the strip.

Keywords: hot strip mill, run-out table, run-out table drive, run-out table drive control system, wear of roller bodies, strip laminar cooling, optimizing speed of a run-out table.

REFERENCES

1. Davilbekov N.Kh., Klementev V.A., Kurpanov G.G. Increasing durability of run-out table rollers on sheet mills. *Stal* [Steel], 2003, no. 10, pp. 44-47. (In Russian)
2. Polyakov B.A., Varshavsky E.A., Karetny Z.P. Experience with increasing efficiency of the run-out table on the continuous hot strip mill. *Stal* [Steel], 1987, no.9, pp. 64-67. (In Russian)
3. Alimbetov A., Kaliyev Y., Zhauyt A., Yestemessova G., Yussupova S., Nurbakyt M. Calculation of the stress-strain state of the deflector rollers. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2018. Vol. 18. Pp. 183-188. doi: 10.21595/vp.2018.19861.
4. Yoshikazu M., Toshio S., Takayuki T. Method for controlling speed of roller table of rolling mill 1995, JPH091219A.
5. Yoshiyuki K. Control method for roller table driving of rolling mill 1995, JPS61262416.
6. Antonov V.M., Abiev A.G., Kavygin V.V., Belyanskiy A.D., Kotlyuba G.N. *Sposob regulirovaniya skorosti vrashcheniya rollov otvodyashchego rol'ganga shirokopolosnogo stana goryachey prokatki* [Method for controlling rotational speed of run-out table rolls of a wide strip hot rolling mill]. Patent RF, no. 1045763, 1983.
7. Yajun W. Designing of hot strip rolling mill control system. *World Journal of Engineering and Technology*. 2016. No. 4. Pp. 413-417.
8. Titov A.V., Lukyanov S.I., Shvidchenko N.V., Shvidchenko D.V., Mushtaev A.N., Bochkovskij N.I. *Sposob upravleniya skorostnym rezhimom otvodyashchego rol'ganga shirokopolosnogo stana* [Control method of velocity mode of outgoing roller table of wide-strip rolling mill]. Patent RF, no. 2373006, 2009.
9. Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Shvidchenko N.V., Muhin A.P., Lazarenko A.S., Yudina A.A., Astafev E.V. A diagnosis system of a run-out roller table drive on hot rolling mill 2000. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2005, No. 4(12), pp. 51-53. (In Russian)
10. Klyuchev V.I. *Teoriya elektropivoda* [Theory of Electric Drive]. Moscow, Energoatomizdat, 2001, 704 p. (In Russian)
11. Polyakov B.A., Zubkov Yu.S., Varshavsky E.A., Volodin V.V. Pulling force of a run-out roller table of the hot strip mill. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1986, no. 10, pp. 64-67. (In Russian)
12. Lukyanov S.I., Shvidchenko N.V., Pishnograev R.S. Run-out roller table drive control system on the hot strip mill. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2012, iss. 6, pp. 95-99. (In Russian)
13. Honda T., Nakagawa S., Tachibana H., Uematsu C., Buei Y., Sakagami K. Temperature measurement technology in water cooling process and high accuracy cooling control technology for high tensile hot rolled strip. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2016. No. 111. Pp. 18-23.
14. Diez D.M., Barr C.D. Cetinkaya-Rundel M., Dorazio L. *Advanced High School Statistic*. OpenIntro Inc., First Edition, 2014. 402 p.

Оптимизация скоростного режима отводящего рольганга стана горячей прокатки / Н.В. Швидченко, С.И. Лукьянов, Р.С. Пишнограев, Д.В. Швидченко, С.С. Красильников // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 42-49. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-42-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-42-49)

Shvidchenko N.V., Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Shvidchenko D.V., Krasilnikov S.S. Speed Rate Optimization of the Run-Out Table of a Hot Strip Mill. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 42-49. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-42-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-42-49)