

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.333

Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е.

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

**МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ  
В МЕЖКЛЕТЕВОМ ПРОМЕЖУТКЕ ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ  
ДЛЯ КОРРЕКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕТЛЕДЕРЖАТЕЛЯ**

В статье приводится метод косвенного определения температуры прокатываемой полосы в первом межклетевом промежутке чистой группы стана горячей прокатки для точного определения момента нагрузки и расчёта вращающего момента, развиваемого электроприводом петледержателя.

**Ключевые слова:** система автоматического регулирования натяжения, петледержатель, натяжение полосы, температура полосы.

## ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной работы системы регулирования натяжения полосы (САРН) чистой группы стана горячей прокатки (особенно это касается САРН, построенных по косвенному принципу) необходимо как можно точнее определить момент нагрузки, действующий на вал петлерегулирующего устройства (петледержателя) со стороны прокатываемой полосы и, соответственно, как можно точнее рассчитать и сформировать крутящий момент электропривода петледержателя [1,2].

На вал петледержателя при прокатке действует момент нагрузки, определяемый выражением [3-5]:

$$M_{\text{нагр.}} = M_{\text{неур.}} + M_{\text{вес}} + M_{\text{нат.}} + M_{\text{изг.}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{неур.}}$  - момент от неуравновешанных частей при горизонтальном положении петледержателя;  $M_{\text{вес}}$  - момент нагрузки на валу петледержателя от веса полосы;  $M_{\text{нат.}}$  - момент нагрузки на валу петледержателя от натяжения;  $M_{\text{изг.}}$  - момент нагрузки на валу петледержателя от изгиба. Все составляющие (1) являются функциями угла поворота рамы петледержателя.

Соотношение величин, составляющих общий момент нагрузки, не является константой и зависит от ряда факторов, в частности от толщины прокатываемой полосы, т.е. фактически от номера межклетевого промежутка чистой группы. Рассмотрим соотношение  $M_{\text{нат.}}$  и  $M_{\text{изг.}}$ . Например, для первого межклетевого промежутка толщина полосы значительна (более 20 мм для большинства отечественных станов горячей прокатки), межклетевые натяжения достаточно малы. При таких параметрах, например, отношение  $M_{\text{нат.}}/M_{\text{изг.}}$  значительно меньше 1 [6]. Составляющая  $M_{\text{изг.}}$  гораздо больше  $M_{\text{нат.}}$ . В то же время для последних промежутков чистой группы соотношение меняется и  $M_{\text{нат.}}$  становится больше  $M_{\text{изг.}}$ . Тем не менее для первого межклетевого промежутка величина  $M_{\text{изг.}}$  является значительной и оказывает существенное влияние на общий момент нагрузки. Значение  $M_{\text{изг.}}$  определяют выражением

$$M_{\text{изг.}} = 2B\sigma_s H_{i,i+1}^2 R \cos\alpha / L_{i,i+1}, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  - предел текучести прокатываемого металла;  $H_{i,i+1}$  - толщина металла в межклетевом промежутке;  $B$  - ширина полосы металла;  $R$  - радиус рычага петледержателя;  $L_{i,i+1}$  - длина межклетевого промежутка;  $\alpha$  - угол подъёма петледержателя [1,2,10].

В данном выражении величины  $R$ ,  $L_{i,i+1}$  являются постоянными,  $B$  - условно постоянной [1-4]. Фактическая величина  $H_{i,i+1}$  при прокатке может меняться, например, при работе нажимных устройств клеток. Угол подъёма также меняется при реакции петледержателя на различного рода возмущения, происходящие в электромеханической системе межклетевого промежутка и вызывающие, например, изменение секундных объёмов прокатываемой полосы при работе нажимных устройств. Рассмотрим, однако, выражение (2) с точки зрения зависимости величины  $M_{\text{изг.}}$  от предела текучести  $\sigma_s$ .

Величину  $\sigma_s$  практически во всех САРН принимают в расчётах как постоянную величину. Тем не менее для расчёта предела текучести имеется следующее выражение [7]:

$$\sigma_s = \frac{A}{e^{m_1 T^\circ}}, \quad (3)$$

где  $T^\circ$  - температура прокатываемого металла, °С;  $A$ ,  $m_1$  - эмпирически определяемые коэффициенты, индивидуальные для каждого металла (находятся по таблицам [7]). Из выражения (3) видно, что предел текучести прокатываемой полосы является функцией её температуры.

В то же время перепад температуры полосы от «головы», выходящей из черновой группы полосы к «хвосту», в ряде случаев может достигать значительных величин [11-14]. Достаточно типичные примеры графиков температуры подката за 5 клетью для стана горячей прокатки показаны на **рис. 1**. Также известно, что в зависимости от времени прокатки перепад температуры на входе в чистовую группу от переднего до хвостового конца полосы может изменяться от 45-50°С

для полос конечной толщиной 10-12 мм до 200-220°C для полос конечной толщиной 1,2-1,5 мм [8,9]. «Голова» полосы, как правило, имеет более высокую температуру. Можно утверждать, что температура полосы в первом промежутке также будет неодинакова по длине.

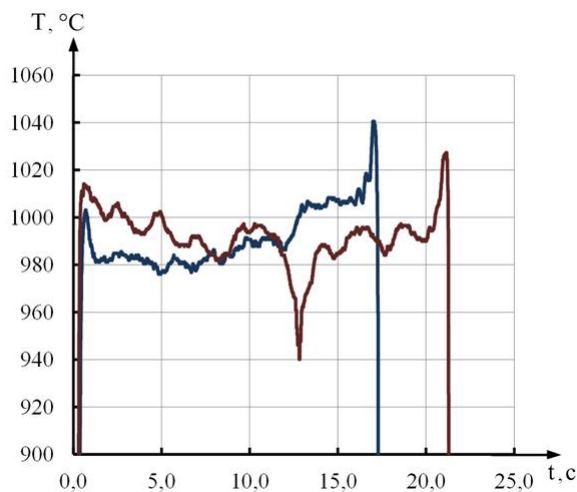


Рис. 1. Примеры температур подкатов за 5 клетью стана горячей прокатки

Неравномерность температуры полосы по длине при входе в чистовую группу определяется рядом факторов. К таковым относится разное время нахождения разных сечений полосы на промежуточном рольганге (и соответственно разное время охлаждения), неравномерность нагрева сляба в методических печах, наличие окалины [7,12]. Кроме того, на равномерность нагрева подката к чистовой группе влияет наличие «глиссажных меток». В случае прокатки металла в чистовой группе с ускорением «температурный клин» от промежутка к промежутку сглаживается и при определённых ускорениях может стать отрицательным (т.е. «хвост» полосы может стать горячее «головы»). Тем не менее если рассматривать первый межклетевой промежуток, то «температурный клин» ярко выражен и перепад температуры может достигать 85°C [7-9].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Из выражений (1)-(3) видно, что т.к. от температуры прокатываемой полосы зависит составляющая  $M_{изг}$ , то соответственно и общий момент нагрузки на вал петледержателя. Если САРН в оценке момента нагрузки и при расчёте момента, развиваемого электроприводом петледержателя, будет исходить из постоянной величины предела текучести полосы в промежутке, то естественно, что изменяющаяся по длине температура металла будет негативно сказываться на работе системы, т.к. расчётный момент, развиваемый электроприводом петледержателя, не будет соответствовать фактическому, и петледержатель будет отклоняться в ту или иную сторону. При этом САРН данную ситуацию будет воспринимать, как изменение секундных объёмов полосы и будет пытаться регулировать натяжение полосы (хотя в данной ситуации изменения натяжения не происходит), выдавая коррекцию задания на скорость в смежные электроприводы клетей. Естественно, это будет ошибкой в работе САРН.

Очевидно, что для использования температуры

прокатываемой полосы в расчёте момента электропривода петледержателя для повышения эффективности работы САРН требуется её точное определение.

Рассмотрим идентификацию температуры полосы прокатываемого металла в первом межклетевом промежутке. Для этого используем стан горячей прокатки, состоящий из 5 черновых и 8 чистовых клетей, включая чистовой окалиноломатель. Перед 6 клетью располагается гидросбив окалины. Температура подката в чистовую группу определяется пирометром, расположенным за 5 клетью черновой группы (рис. 2). На отечественных станах горячей прокатки, в частности на стане 2000 ПГП ПАО «НЛМК», датчик температуры подката стоит только в указанном месте. Измерение температуры непосредственно перед чистовой группой, а тем более в межклетевых промежутках, широко распространёнными типами инфракрасных датчиков не представляется возможным из-за крайне агрессивной окружающей среды с наличием плотного пара (особенно в зимний период), брызг и потоков воды и т.д. Поэтому для определения «прогнозируемой» температуры полосы, в частности в первом межклетевом промежутке, предлагается использовать методику, изложенную в работе [7]. Данная методика применяется для оценки температуры в межклетевых промежутках чистовой группы и управления работой системы межклетевого охлаждения полосы и системы начальной настройки для расчёта заправочных скоростей, ускорения при прокатке с ускорением и т.д. Согласно предлагаемой методике конечная температура полосы после первой клетки чистовой группы (клеть №6) будет рассчитываться по формуле [7]

$$T_j = T_{j-1} - \Delta T_j^{ик} - \Delta T_j^{вл} + \Delta T_j^д - \Delta T_j^{гс}, \quad (4)$$

где  $T_j$  – температура металла после первой клетки чистовой группы;  $T_{j-1}$  – температура металла после последней клетки черновой группы (клеть №5 стана горячей прокатки), измеряемая датчиком температуры;  $\Delta T_j^{ик}$  – потеря тепла от излучения и конвекции на пути полосы от 5 клетки до 6 (в основном на промежуточном рольганге);  $\Delta T_j^{вл}$  – потеря тепла при контакте металла с вальцами при прокатке в 6 клетки (теплоотдача вальцам);  $\Delta T_j^д$  – нагрев полосы при прокатке – приращение температуры вследствие поглощения энергии деформации;  $\Delta T_j^{гс}$  – потеря тепла от работы гидросбива перед 6 клетью.

Определение  $\Delta T_j^{ик}$ . Сначала находят температуру металла после охлаждения путём излучения по выражению

$$T_j^n = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{1000}{T_{j-1} + 273}\right)^3 + C_0 \cdot \frac{t_0}{h}}} - 273, \quad (5)$$

где  $T_{j-1}$  - температура металла после последней клетки черновой группы (клеть №5 стана горячей прокатки), измеряемая датчиком температуры;  $C_0 = 0,055 \cdot 10^{-9}$  (мм/(K<sup>3</sup>·с)) – теплофизический коэффициент;  $t_0$  – время охлаждения металла в ожидании прокатки.

Тогда падение температуры полосы вследствие

теплопотерь излучением

$$\Delta T_j^{из} = T_{j-1} - \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{1000}{T_{j-1} + 273}\right)^3 + C_0 \cdot \frac{t_0}{h}}} + 273. (6)$$

Теплоотдача металла окружающему воздуху конвекцией в начале прокатки при высокой температуре и малых скоростях очень мала. Считают, что она составляет 5-10% от потерь тепла излучением и учитывают введением поправки в падение температуры при лучистом теплообмене, используя для оценки совместного влияния излучения и конвекции формулу

$$\Delta T_j^{ик} = (1,05...1,07) \cdot \Delta T_j^{из}. (7)$$

Для расчёта приращения температуры полосы вследствие поглощения энергии деформации  $\Delta T^д$  используем его прямую связь с расходом энергии на собственно прокатку:

$$\Delta T_j^д = 4,76 \cdot w_{прj}, (8)$$

где  $w_{прj}$  – удельный расход энергии на прокатку (кВт·ч/т) в 6 клетки (первая клетка чистовой группы).

Удельный расход энергии на прокатку будем вычислять по формуле (для полос толщиной свыше 1 мм)

$$w_{прj} = 24 \cdot k_w \cdot \ln(\ln h_{п} / \ln h_{к}), (9)$$

где  $k_w$  – поправочный коэффициент на марку стали.

Для определения теплоотдачи валкам  $\Delta T^{вл}$  используем формулу

$$\Delta T_j^{вл} = 0,218 \cdot \frac{T_{j-1} - \Delta T_j^{ик} - T_j^{вл}}{h_{j-1} + h_j} \times \sqrt{\frac{l_{cj}}{v_j \cdot (1 + h_j/h_{j-1})}}, (10)$$

где  $T_{j-1} - \Delta T_j^{ик}$  – температура металла в начале охлаждения, °С;  $T_j^{вл}$  – температура валка, °С;  $l_{cj}$  – сплюснутая дуга контакта, мм;  $h_j, h_{j-1}$  – толщина полосы до и после обжатия в клетке, мм;  $v_j$  – скорость полосы, м/с.

$$l_{cj} = x_j + \sqrt{R \cdot \Delta h_j + x_j^2}, (11)$$

где  $R$  – несплюснутый радиус рабочих валков;  $x_j$  – протяжённость очага деформации за линию центров валков;  $\Delta h_j$  – абсолютное обжатие в клетке.

При горячей прокатке сплюсывание валков имеет пренебрежимо малый эффект, особенно при прокатке крупных сечений, поэтому принимаем  $x_j = 0$ .

Влияние гидросбива окалины учитывается формулой И. Шварцера

$$\Delta T_j^{гс} = \frac{0,73 \cdot T}{h \cdot (1 + v)}, (12)$$

где  $T, h$  и  $v$  – температура, толщина и скорость полосы в зоне гидросбива соответственно, °С, мм и м/с.

На рис. 3 приведен пример функциональной схемы САРН для одного межклеточного промежутка. В соответствии с данной схемой электропривод петледержателя развивает момент, определяемый заданием на ток  $I^*$ . В свою очередь, величина  $I^*$  обрабатывается блоком ограничения с регулируемым значением ограничения, которые определяются рассчитанной по формуле (1) величиной момента (в формате задания на ток). Поскольку система построена так, что регулятор позиции выдаёт сразу после заполнения полосой межклеточного промежутка максимальное задание на ток, то фактически электропривод обрабатывает ограниченное значение  $I_{огр}^*$ , которое и определяется математическим расчётом (БРМ-блок расчёта момента) в соответствии с выражением (1).

Для повышения точности расчёта момента, учитывая температуру прокатываемой полосы, необходимо в БРМ учесть выражения (3)-(12). При этом БРМ необходимо обеспечить данными с пирометра за последней клетью черновой группы, необходимыми константами, участвующими в расчётах по вышеприведённым выражениям, значениями скорости полосы после окалиноломателя (в зоне гидросбива), значениями толщины подката и после обжатия в первой клетке чистовой группы и др. В случае построения САРН на основе программируемых логических контроллеров и при интегрировании в АСУТП чистовой группы стана горячей прокатки указанные данные можно получить в САРН из смежных подсистем, например из системы начальной настройки стана.

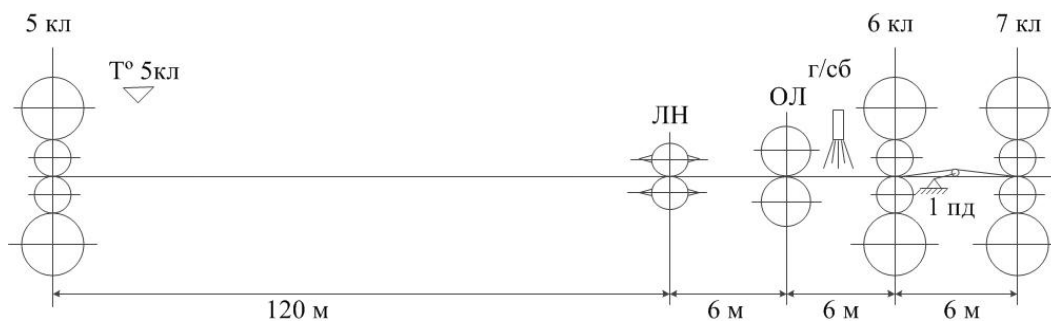


Рис. 2. Участок промежуточного роляганга непрерывного стана горячей прокатки

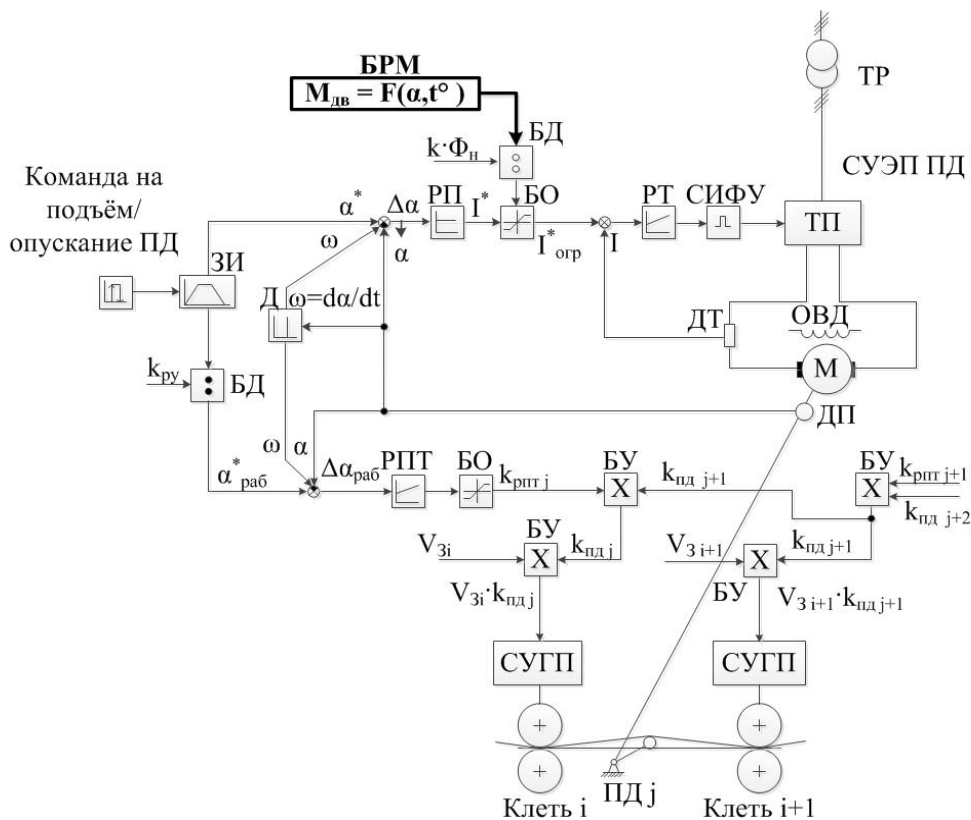


Рис. 3. Функциональная схема и САПР для одного межклетевого промежутка с коррекцией момента электропривода петледержателя по температуре полосы

На рис. 3 СУГП, СУЭП ПД – системы управления главными приводом петледержателя; М – электродвигатель; БУ – блок умножения; Д – дифференциальное звено; БО – блок ограничения; ДП, ДТ – датчики положения и тока; РП, РПТ – регулятор позиции петледержателя и регулятор петли; БД – блок деления; ЗИ – задатчик интенсивности;  $k_{рпт}$  – выходной сигнал регулятора петли;  $k_{пд}$  – результирующий сигнал коррекции скорости клетки  $i$ , при этом  $k_{пд,j} = k_{рпт,j} \cdot k_{пд,j+1}$ ;  $V_{3i}$  – сигнал задания на скорость главного электропривода клетки;  $\alpha$  – фактический угол поворота рамы петледержателя;  $\alpha^*$  – задание на максимальный угол;  $\alpha^*_{раб}$  – задание на рабочий угол петледержателя;  $k_{ру}$  – коэффициент рабочего угла;  $\omega$  – угловая скорость петледержателя;  $\Delta\alpha = \alpha^* - \alpha$ ;  $\Delta\alpha_{раб} = \alpha^*_{раб} - \alpha$ ;  $I^*$  – выходной сигнал регулятора позиции петледержателя;  $I^*_{огр}$  – задание на ток электропривода петледержателя, рассчитанное как  $I^*_{огр} = M_{дв} / k\Phi_n = F(\alpha, t^{\circ}) / k\Phi_n$ . БРМ – блок расчёта момента электродвигателя петледержателя как  $M_{дв} = F(\alpha, t^{\circ})$  – расчёт, соответствующий выражению (1), но с учётом в расчёте  $M_{изг}$  по формуле (2) температуры полосы при соответствующем расчёте  $\sigma$ , в соответствии с выражениями (3)–(12).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения точности расчёта момента электропривода петледержателя в первом межклетевом промежутке чистовой группы стана горячей прокатки рассмотрена методика косвенного определения температуры прокатываемой полосы. Предложена функциональная схема САПР для одного межклетевого промежутка с коррекцией момента электропривода петледержателя по температуре полосы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система автоматического регулирования натяжения и петли с перекрестными связями для широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Чертоусов, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 21-27.
2. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дисс. ... д-ра техн. наук; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2013. 393 с.
3. Стефанович В.Л. Автоматизация непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1975. 208 с.
4. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1975. 336 с.
5. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, И.Ю. Андрушин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С.12-21.
6. Фомин Г.Г., Дубейковский А.В., Гринчук П.С. Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1979. 232 с.
7. Зайцев В.С., Третьяков В.А. Проектирование параметров и режимов работы оборудования листопрокатных цехов: учеб. пособие. Липецк: ЛГТУ, 2009. 660 с.
8. Мешеряков В.Н., Диденко Е.Е. Влияние температуры подката чистовой группы стана горячей прокатки на работу электропривода петледержателя. // Электротехнические системы и комплексы. 2012. №20. С.41-52.
9. Мешеряков В.Н., Диденко Е.Е. Влияние температуры полосы в чистовой группе стана горячей прокатки на момент нагрузки электроприводов петледержателей // IX Международная научно-практическая конференции «Техника и технология: новые перспективы развития». - 2013. С. 16-21.

10. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическое описание сил и моментов нагрузки петледержателя // Электротехнические комплексы и системы. 2010. С. 18-23.
11. Khramshin V.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods / V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, R.R. Khramshin // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. Вып. 13. 2013. №1. С. 144–153.
12. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Algorithms of a Digital Automatic System for Tension and Loop Control in a Wide\_Strip Hot\_Rolling Mill // Russian Electrical Engineering. 2013, vol.84, no.10, pp. 533–541. doi: 10.3103/S106837121310009X.
13. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Speed and Load Modes of Rolling Hollow Billet at the Wide-Strip Rolling Mill. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. 5 p. doi:10.1109/MEACS.2014.6986841.
14. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // VII Междунар. (XVII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012): сб. тр. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 652–657.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD OF STRIP TEMPERATURE IDENTIFICATION IN THE GAP BETWEEN TWO STAND OF FINISHING GROUP OF THE HOT ROLLING MILL FOR ADJUSTMENT OF ELECTRIC DRIVE CONTROL OF THE LOOPER

Mecheryakov V.N., Didenko E.E.

The article describes the method of indirect determination of temperature of the strip in the first gap of the finishing group of a hot rolling mill for accurate definition of loading torque and calculation of the torque of the looper electric drive.

**Keywords:** System of automatic tension control, looper, strip tension, loop regulator, strip temperature.

REFERENCES

1. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Chertousov A.A., Khramshin V.R. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya natyazheniya i petli s perekryestnymi svyazami dlya shirokopolosnogo stana goryachey prokatki [Automatic System of Tension Control and Loops with Cross Couplings for Wide Strip Hot Rolling Mill]. *Proceedings of universities. Electrical engineering*. 2004, no.2, pp. 21-27.
2. Khramshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Development of Electrotechnical Systems of Continuous Group of Hot Rolling Mill to Extend the Product Range]: D.Sc. thesis in engineering. Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, 2013.393 p.
3. Stefanovich V.L. *Avtomatizatsiya nepreryvnykh i poluneprryvykh shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki* [Automation of Continuous and Semi-continuous Wide Strip Hot Rolling Mills]. Moscow: Metallurgy, 1975. 208 p.
4. Druzhinin N.N. *Neprryvyne stany kak obyekt avtomatizatsii* [Continuous Rolling Mills as Automation Objects]. Moscow: Metallurgy, 1975. 336 p.
5. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Matematicheskaya model vzaimosvyazannykh elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy shirokopolosnogo stana [Mathematical Model of Interrelated Electrotechnical Systems of Continuous Train of Wide Strip Mill]. *Machine-building: network electronic scientific journal*. 2013, no.1, pp.12-21.
6. Fomin G.G., Dubeykovskiy A.V., Grinchuk P.S. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki* [Mechanization and Automation of Wide Strip Rolling Mills]. Moscow: Metallurgy, 1979. 232 p.
7. Zaytsev V.S., Tretyakov V.A. *Proektirovanie parametrov i rezhimov raboty oborudovaniya listoprokatnykh tsekhov* [Parameter Planning and Design of Operating Modes of Facilities for Strip Rolling Mills]. Training manual. Lipetsk: LGTU, 2009. 660 p.
8. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. Vliyanie temperatury podkata chistovoy gruppy stana goryachey prokatki na raboty elektroprivoda petlederzhatelya [Influence of Semi-finished Rolled Stock Temperature in Finishing Train of Hot Rolling Mill on the Operation of Looper Electric Drive]. *Electrotechnical systems and complexes*. 2012, no.20, pp.41-52.
9. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. Vliyanie temperatury polosy v chistovoy gruppe stana goryachey prokatki na moment nagruzki elektroprivodov petlederzhatelya [Influence of Strip Temperature in Finishing Train of Hot Rolling Mill on Torque of Looper Electric Drives]. *IX International scientific conference "Engineering and technology: new development trends"*. 2013, pp. 16-21.
10. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. Matematicheskoe opisanie sil i momentov nagruzki petlederzhatelya [Mathematical Description of Forces and Torques of Looper Loads]. *Electrotechnical complexes and systems*. 2010, no.4. pp.18-23.
11. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods. *Bulletin of the South Ural State University, Series "Power Engineering"*. 2013, vol.13, no.1, pp.144–153.
12. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Algorithms of a Digital Automatic System for Tension and Loop Control in a Wide\_Strip Hot\_Rolling Mill. *Russian Electrical Engineering*. 2013, vol.84, no.10. pp. 533–541. doi: 10.3103/S106837121310009X.
13. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Speed and Load Modes of Rolling Hollow Billet at the Wide-Strip Rolling Mill. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2014. 5 p. DOI 10.1109/MEACS.2014.6986841.
14. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Soglasovanie skorostey vzaimosvyazannykh elektroprivodov kletey chernovoy gruppy prokatnogo stana [Coordination of Speeds in Interrelated Electric Drives of Rolling Stands in Roughing Train of Rolling Mill]. *VII International (XVII All-Russian) scientific conference on automatic electric drive (AEP-2012): collection of scientific papers*. Ivanovo: IGEU, 2012, pp.652 – 657.