

СПОСОБ СОГЛАСОВАНИЯ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВАЛКОВ КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА

В.Р. Гасияров

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Дана характеристика разработок, посвященных исследованию систем формирования «лыжи» и согласования (деления) нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков горизонтальных клетей прокатных станов. Показано, что изучению совместной работы этих систем не уделяется необходимого внимания. Рассмотрена структура проектной системы задания скоростей толстолиствого стана 5000, реализующей алгоритмы лыжеобразования и деления нагрузок. Обоснована актуальность исследования их режимов с целью обеспечения согласованной работы. Представлены осциллограммы моментов двигателей верхнего и нижнего валков, подтвердившие их неравномерную загрузку во всех проходах черновой прокатки. Выполнен анализ осциллограмм скоростей и моментов за один проход. Показано, что при существующей настройке системы задания скоростей момент двигателя нижнего валка достигает уровня ограничения, а двигатель верхнего валка переходит в генераторный режим. Определены причины недопустимых отклонений нагрузок, основными из которых являются несогласованность и низкое быстродействие систем лыжеобразования и деления нагрузок. Обоснован комплекс технических решений, обеспечивающий устранение указанных недостатков. Рассмотрен способ регулирования нагрузок, обеспечивающий форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков за счет исключения из работы интегральной части регулятора деления нагрузок. Представлена схема блока деления нагрузок с переключающейся структурой и переменным коэффициентом усиления регулятора. Рассмотрены осциллограммы, полученные при внедрении алгоритма, реализующего разработанный способ в АСУ ТП стана 5000. Подтверждено повышение точности и сокращение времени согласования моментов двигателей. Даны рекомендации по внедрению выполненных разработок.

Ключевые слова: прокатный стан, горизонтальные валки, лыжеобразование, электроприводы, скорости, нагрузки, согласование, системы, методика, способ, регулятор, структура, разработка, внедрение, экспериментальные исследования, рекомендации.

Введение

Важными электротехническими системами клетей толстолистных и широкополосных прокатных станов являются системы формирования изгиба переднего конца раската (лыжеобразования) и выравнивания нагрузок главных приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков. Они осуществляют задание и раздельное регулирование скоростей валков горизонтальной клетки в режиме прокатки. Система лыжеобразования регулирует соотношение скоростей таким образом, чтобы непосредственно после захвата формировался изгиб головного участка вверх. При этом должны обеспечиваться заданные параметры «лыжи»: радиус кривизны и протяженность изогнутого участка. Система согласования нагрузок выполняется, как правило, в виде регулятора деления нагрузок (РДН), он осуществляет выравнивание скоростей и соответственно моментов электроприводов.

Исследованию работы систем формирования «лыжи» и согласования нагрузок посвящены труды отечественных и зарубежных авторов. В публикациях [1–6] исследованы условия и алгоритмы асимметричной прокатки, обеспечивающие изгиб переднего конца раската. Патентные публикации [7–10] посвящены разработке способов и уст-

ройств, обеспечивающих заданные параметры «лыжи». Научные публикации [11–14] посвящены моделированию нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков, а также разработке алгоритмов распределения их нагрузок. Вместе с тем анализ перечисленных и других публикаций показал, что вопросы совместной работы систем лыжеобразования и деления нагрузок не получили необходимого изучения. Для устранения этого пробела проведены теоретические и экспериментальные исследования таких систем, реализованных в АСУ ТП реверсивной клетки толстолиствого стана 5000.

Целью исследований являются разработка и внедрение усовершенствованных алгоритмов, обеспечивающих равную загрузку двигателей в установившемся режиме прокатки при сохранении заданных параметров «лыжи». Во главу угла ставится решение следующих задач:

– обеспечение одинаковой длины изогнутого участка во всех проходах независимо от скорости прокатки и длины раската;

– повышение точности и сокращение времени выравнивания моментов двигателей.

Варианты решения первой задачи рассмотрены в ранее опубликованных работах автора. Данная публикация посвящена рассмотрению второй

задачи. При ее решении за основу приняты разработки систем управления электроприводами широкополосных и толстолистовых станов, рассмотренные в публикациях [15–18].

Постановка задачи

Актуальность исследований

Структурная схема проектной системы задания скоростей толстолистого прокатного стана, реализующая алгоритмы лыжеобразования и деления нагрузок, представлена на рис. 1. На вход структуры подается сигнал задания скорости V_3 , который формируется интерполятором (на схеме не показан) по заданной траектории движения [19]. Блок формирования «лыжи» обеспечивает радиус и длину изогнутого участка. Эти параметры формируются системой человеко-машинного интерфейса (НМИ), их соотношение может корректироваться оператором. Блок регулирует задание скорости верхнего электропривода в соответствии с вычисленным темпом снижения рассогласования скоростей (задания лыжи в %) после захвата. Скорость электропривода нижнего вала является базовой и зависит только от скорости прокатки. По окончании формирования «лыжи» осуществляется переключение входа блока на нулевой сигнал (на схеме не показан).

Разница скоростей, необходимая для формирования «лыжи» с заданными параметрами, вызывает различие (рассогласование) моментов электроприводов. Для компенсации рассогласования предназначен РДН, в его функции входят выравнивание скоростей после «лыжи», компенсация

отклонений, возникающих при вводе в систему заданий диаметров валков, их износа и других влияющих факторов. Данный регулятор имеет, как правило, пропорционально-интегральную структуру. Принцип его действия поясняется непосредственно включением в схему системы управления. При возникновении рассогласования измеряемых сигналов «Момент ВГП» и «Момент НГП» на выходе РДН появляется управляющий сигнал, который с разными знаками поступает на входы схем задания скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков.

Анализ структуры на рис. 1 показывает, что требования, предъявляемые к системе лыжеобразования и РДН, противоречивы. Поэтому в действующем алгоритме управления скоростными режимами их воздействия разведены во времени (по длине раската). Когда формируется «лыжа», РДН не работает, он включается в работу после окончания изгиба полосы через заданную паузу. Управление режимами осуществляется по сигналу разрешения, поступающего от блока логики включения РДН.

Очевидно, что при несогласованной работе системы лыжеобразования и РДН либо при неудовлетворительном быстродействии регулятора может возникнуть ситуация, когда выравнивание нагрузок ВГП и НГП начинается поздно либо вообще не происходит в течение времени прокатки. На стане 5000 такая ситуация возникает при прокатке заготовок в первых проходах.

Сказанное подтверждает актуальность исследования режимов рассматриваемых систем с целью обеспечения их согласованной работы. Дан-

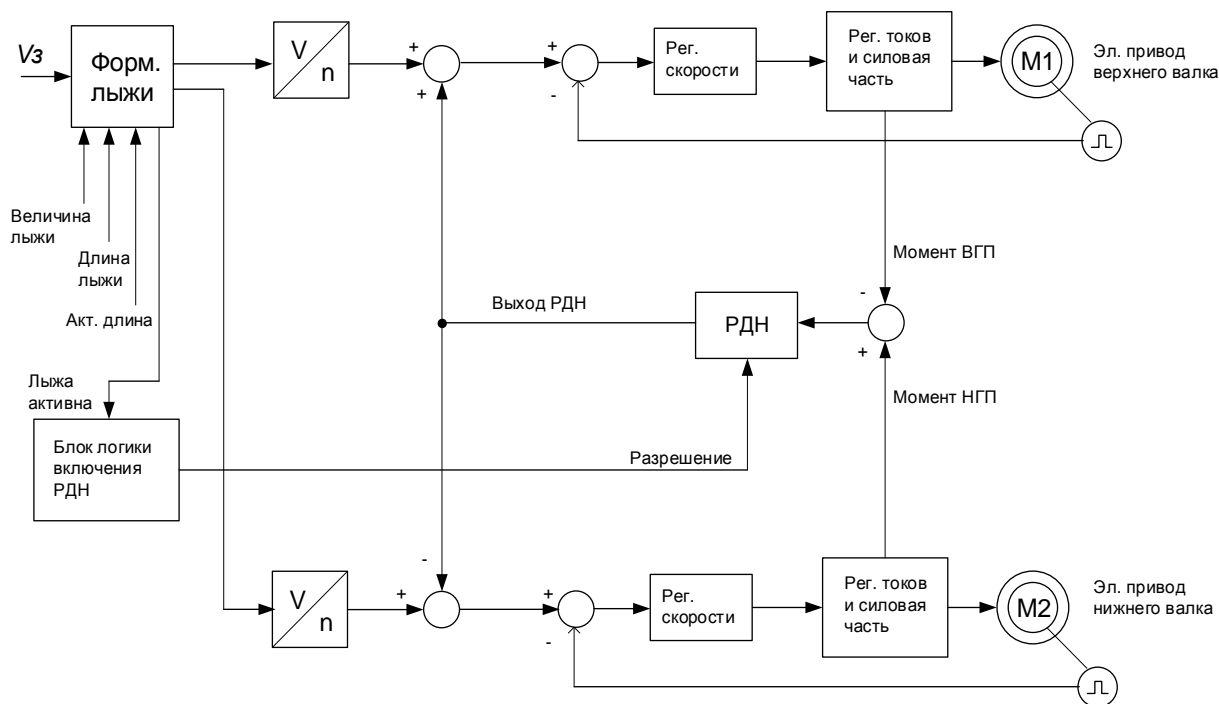


Рис. 1. Структурная схема системы управления электроприводами с реализацией функций формирования «лыжи» и деления нагрузок

ный вопрос является важным, поскольку от качества настройки этих систем зависят нагрузки электроприводов верхнего и нижнего валков и динамические нагрузки вспомогательных механизмов (рольгангов), возникающие при неправильном изгибе конца раската на выходе клетки. Задача ограничения нагрузок потребовала совершенствования алгоритмов согласования работы системы лыжеобразования и РДН. Ниже рассматриваются разработанные технические решения и результаты их экспериментальных исследований.

Анализ осциллограмм при существующем алгоритме управления электроприводами

Экспериментальные исследования и длительный опыт эксплуатации стана 5000 показали несогласованность режимов РДН и системы лыжеобразования. Основным недостатком является несвоевременное (позднее) включение РДН. Это вызывает неравномерное распределение нагрузок двигателей ВГП и НГП в установившемся режиме работы. В подтверждение сказанному на рис. 2 приведены осциллограммы моментов этих двигателей в шести проходах черновой стадии, когда осуществляется прокатка относительно коротких раскатов.

В окнах 4 и 5 приведены осциллограммы моментов и токов ВГП (кривые $M_{ВГП}$, $I_{ВГП}$) и НГП (кривые $M_{НГП}$, $I_{НГП}$). Осциллограммы имеют идентичный характер, из них следует, что при прокатке в каждом проходе средняя нагрузка двигателя нижнего валка $I_{НГП(ср)}$ в три и более раза превышает нагрузку двигателя ВГП $I_{ВГП(ср)}$. Это приводит к нарушению теплового режима более нагруженного двигателя, сокращению ресурса изоляции и повышает риск возникновения аварий [20–22]. Также известно, что при низкой нагрузке частотно-

регулируемых электроприводов снижается их КПД, что вызывает увеличение потерь электрической энергии [23–25].

Работа системы лыжеобразования и РДН поясняется осциллограммами скоростей и моментов ВГП и НГП, представленными на рис. 3. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Захват происходит в момент времени t_1 . При работе системы лыжеобразования (интервал t_1-t_2) работа РДН блокируется. Сигнал коррекции скорости на выходе РДН (окно 4) появляется в момент t_3 с задержкой на время паузы $\Delta t_{ГП}$ после прихода в ноль сигнала «разница скорости для лыжи» (окно 5, момент t_2).

2. Во время работы системы лыжеобразования в интервале t_1-t_2 момент НГП (окно 3, кривая $M_{НГП}$) достигает уровня ограничения 4200 кН·м. Электропривод верхнего валка при этом переходит в генераторный режим (осциллограмма $M_{ВГП}$ переходит в зону отрицательных значений). К моменту времени t_3 включения РДН в работу $M_{НГП}$ равен 4000 кН·м, $M_{ВГП}$ равен нулю. Показанные рассогласования моментов, возникающие в период формирования «лыжи», являются недопустимыми.

3. После появления сигнала на выходе РДН (окно 4, момент t_3) практически до конца прокатки происходит медленный процесс выравнивания нагрузок; сигнал «разность моментов» (окно 6) приближается к нулевому значению ко времени $t_5 \sim 14.30.26$, близкому к моменту выхода заготовки из клетки $t_6 \sim 14.30.27$.

4. Большую часть времени прокатки (интервал t_3-t_4) выходной сигнал РДН (окно 4) находится в зоне ограничения, поэтому процесс согласования моментов затянут и неэффективен.

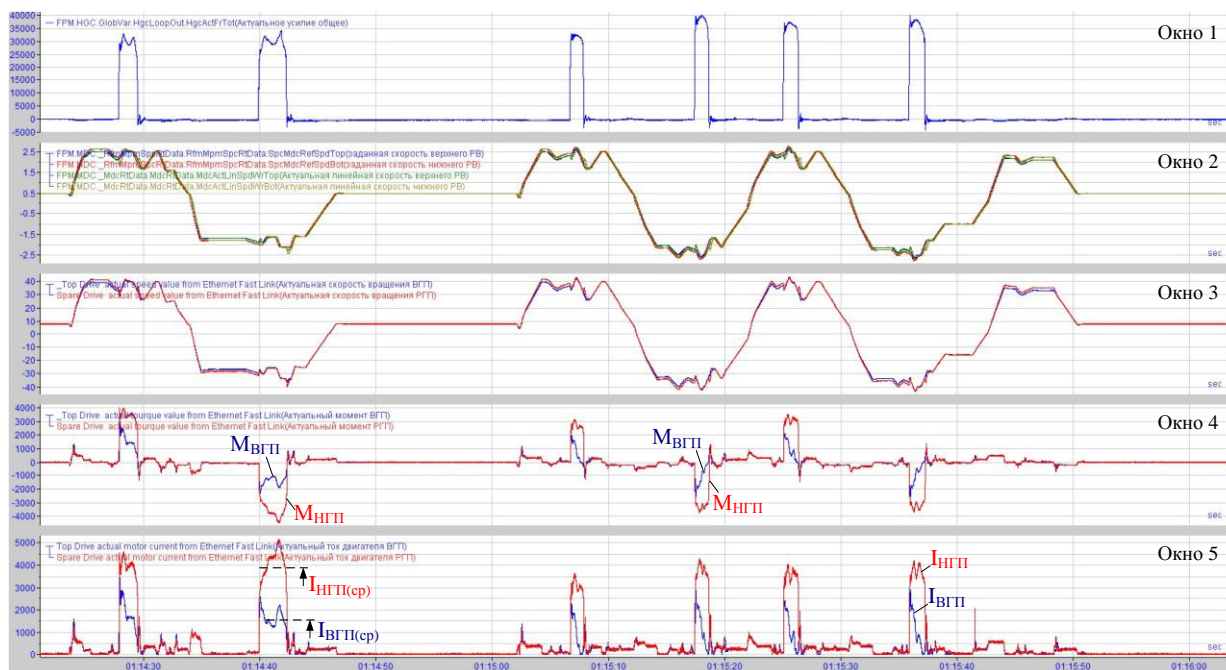


Рис. 2. Осциллограммы скоростей и моментов электроприводов верхнего и нижнего валков

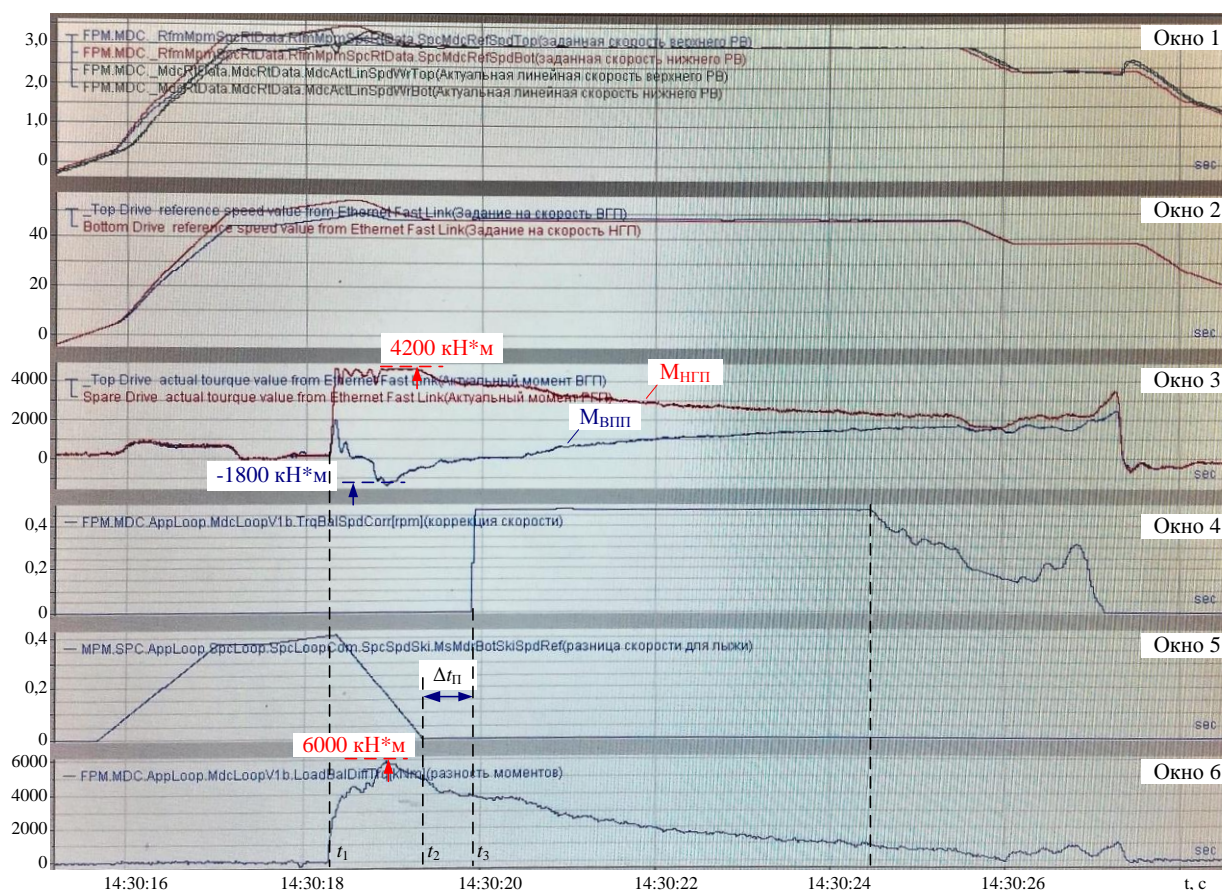


Рис. 3. Осциллограммы скоростей и моментов при существующей настройке системы лыжеобразования и РДН

Представленный анализ осциллограмм подтверждает, что выравнивания моментов не происходит в течение всего времени прокатки. В результате возникают недопустимые рассогласования нагрузок электроприводов: НГП значительную часть времени работает в режиме ограничения момента, в то время как двигатель ВГП загружен незначительно и даже переходит в генераторный режим. Это подтверждает целесообразность разработки комплекса технических решений, обеспечивающих выравнивание нагрузок ВГП и НГП за счет согласования режимов и повышения быстродействия системы лыжеобразования и РДН.

Основная часть

Методика согласования режимов систем лыжеобразования и деления нагрузок

Разрабатываемый комплекс включает следующие технические решения:

1. Повышение быстродействия системы лыжеобразования, с целью минимизации длины изогнутого участка при обеспечении заданной кривизны, одинаковой для всех проходов. Автоматическое вычисление и задание длины «лыжи» в каждом проходе.

2. Сокращение паузы между окончанием формирования «лыжи» и временем подключения

РДН (на рис. 3 пауза $\Delta t_{\text{П}}$ составляет около 0,9 с, что соответствует 10 % времени прокатки).

3. После включения РДН форсированное согласование скоростей и соответственно выравнивание нагрузок ВГП и НГП. С этой целью предлагается:

- отключение интегральной части для уменьшения постоянной времени РДН;
- увеличение коэффициента пропорциональной части регулятора.

Решение первой задачи потребовало совершенствования структуры и алгоритма существующей системы лыжеобразования, что, по сути, потребовало разработки способа управления электроприводами в режиме прокатки переднего конца раската. Решение второй задачи обеспечивается путем перенастройки существующего алгоритма управления без изменения структуры системы лыжеобразования и РДН. Решение третьей задачи потребовало разработки способа согласования скоростей в режиме совместной прокатки и совершенствования структуры РДН.

Перечисленные задачи, по существу, представляют собой совокупность методов (методику), обеспечивающих согласование режимов и повышение быстродействия систем лыжеобразования и деления нагрузок. Ниже рассматриваются разрабо-

танные способы управления, составляющие основу такой методики, разработанной применительно к электроприводам клетки толстолистного стана.

Совершенствование системы лыжеобразования

Для формирования оптимальной длины «лыжи» должно поддерживаться соотношение скоростей двигателей верхнего и нижнего валков при заданном темпе его снижения. Это обеспечивается системой задания параметров «лыжи», структура которой представлена на рис. 4а, на рис. 4б приведены временные диаграммы, поясняющие алгоритм задания скоростей.

Перед захватом металла устанавливается разность ΔV_3 линейных скоростей нижнего $V_{\text{низ}}$ и верхнего $V_{\text{верх}}$ валков относительно заданного значения V_3 . Величина рассогласования вычисляется по значениям скорости V_3 и длины L_3 изогнутого участка и подается на входы датчиков интенсивности (сигнал «Темп ЗИ»). Датчики формируют «добавки» к скорости V_3 электроприводов с разными знаками. Коммутация добавочных сигналов выполняется управляемыми ключами (селектора-

ми) по сигналу о захвате металла. В момент захвата они подключают на входы ЗИ нулевой сигнал, в результате в интервале Δt_3 их выходные сигналы снижаются с заданным темпом. Темп ЗИ вычисляется по формуле

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{V_3 \cdot \Delta V_3}{L_3}$$

В этом случае выходной сигнал достигает нулевого значения, когда головная часть раската пройдет расстояние, равное L_3 .

Этот алгоритм соответствует усовершенствованному способу управления лыжеобразованием, разработанному при участии автора. В проектном варианте осуществляется коррекция скорости только электропривода верхнего валка, при этом задание скорости НПП остается постоянным.

Способ согласования нагрузок электроприводов

Согласно разработанному способу с целью повышения быстродействия в режиме выравнивания нагрузок осуществляют форсированное согласование скоростей электроприводов верхнего и

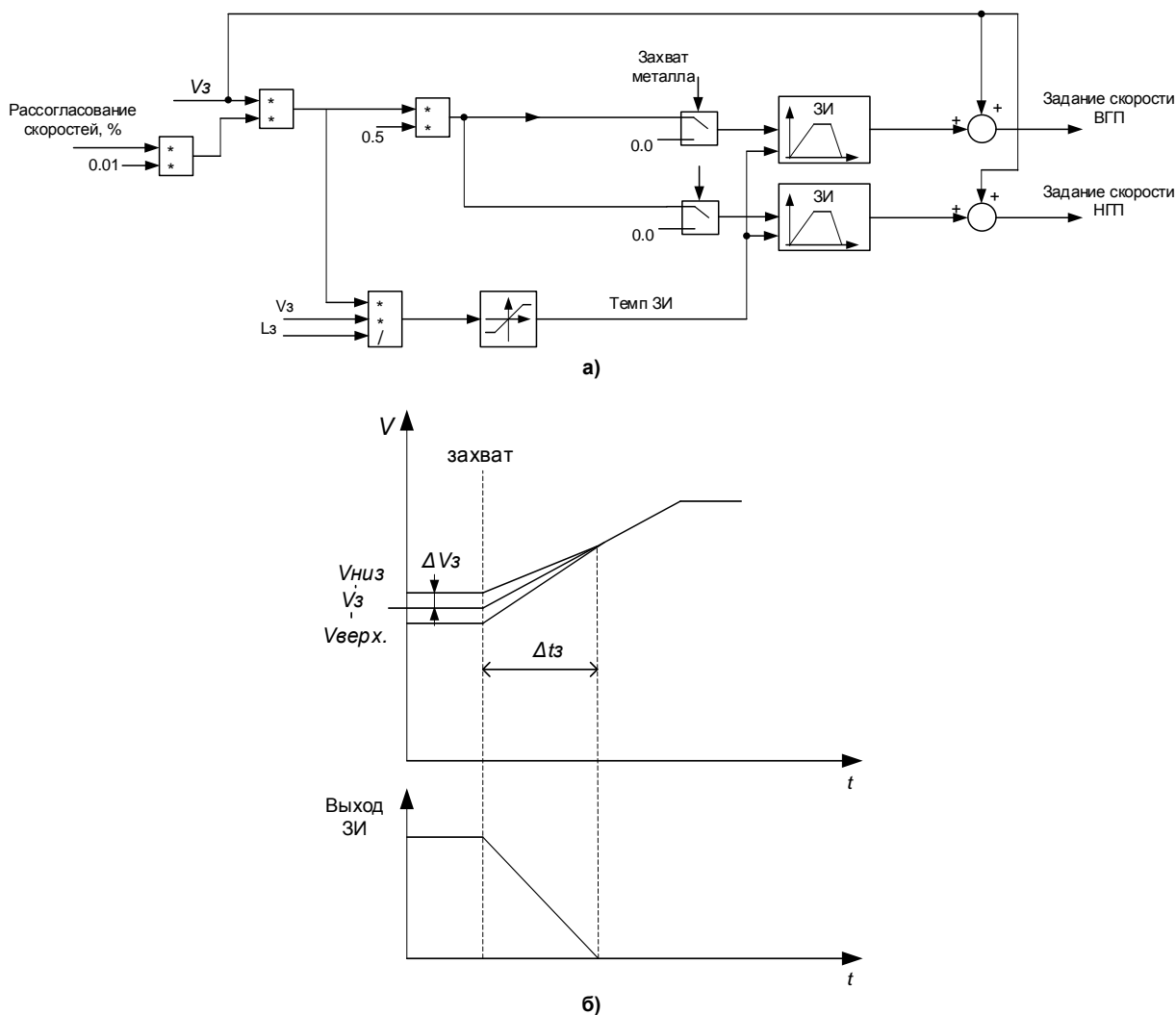


Рис. 4. Схема системы формирования «лыжи» (а) и графики задания скоростей (б)

нижнего валков за счет исключения интегральной части РДН и увеличения коэффициента усиления пропорциональной части. По окончании данного режима в установившемся режиме прокатки обеспечивают пропорционально-интегральное регулирование нагрузок с целью компенсации рассогласований скоростей, а коэффициент усиления переклюкают на расчетное значение. При этом регулирование рассогласования осуществляют путем суммирования с разными знаками сигнала с выхода РДН с сигналами задания скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков, как это показано на схеме (см. рис. 1).

Реализация разработанного способа потребовала разработки блока деления нагрузок с переключающейся структурой регулятора, который рассматривается ниже.

Схема блока деления нагрузок

Разработанный блок РДН с регулятором с переключаемой структурой имеет пропорциональный и интегральный каналы, которые вступают в работу не одновременно. Схема блока представлена на рис. 5. Помимо структуры его отличием от проектного варианта является переменный коэффициент усиления K_p регулятора.

Если момент электропривода верхнего валка превышает момент электропривода нижнего валка, на входе регулятора формируется «ошибка» с по-

ложительным знаком. В этом случае сигнал на выходе РДН также положительный, он воздействует на скорость ВГП в сторону ее уменьшения, а на скорость НГП – в сторону увеличения. При обратном соотношении моментов осуществляются регулирующие воздействия с противоположными знаками. В результате формируются разнонаправленные коррекции заданий скоростей, что повышает быстродействие при компенсации рассогласования скоростей. Сигнал на разрешение работы П-части подается в момент окончания действия «лыжи» без паузы. Таким образом обеспечивается первый отличительный признак разработанного способа.

Для реализации второго отличия до захвата металла валками на селектор K_p выбора коэффициентов усиления пропорциональной части подается увеличенное (по сравнению с расчетным) значение коэффициента $K_i = K_1$. Большой коэффициент обеспечивает повышение быстродействия при компенсации рассогласования заданий скоростей. В результате обеспечивается форсированное выравнивание скоростей ВГП и НГП и соответственно нагрузок. Как показали исследования, время снижения рассогласования уменьшается в 2,5–3 раза.

После уменьшения рассогласования моментов до 10 % установившегося значения производится переключение на второе (меньшее) значение

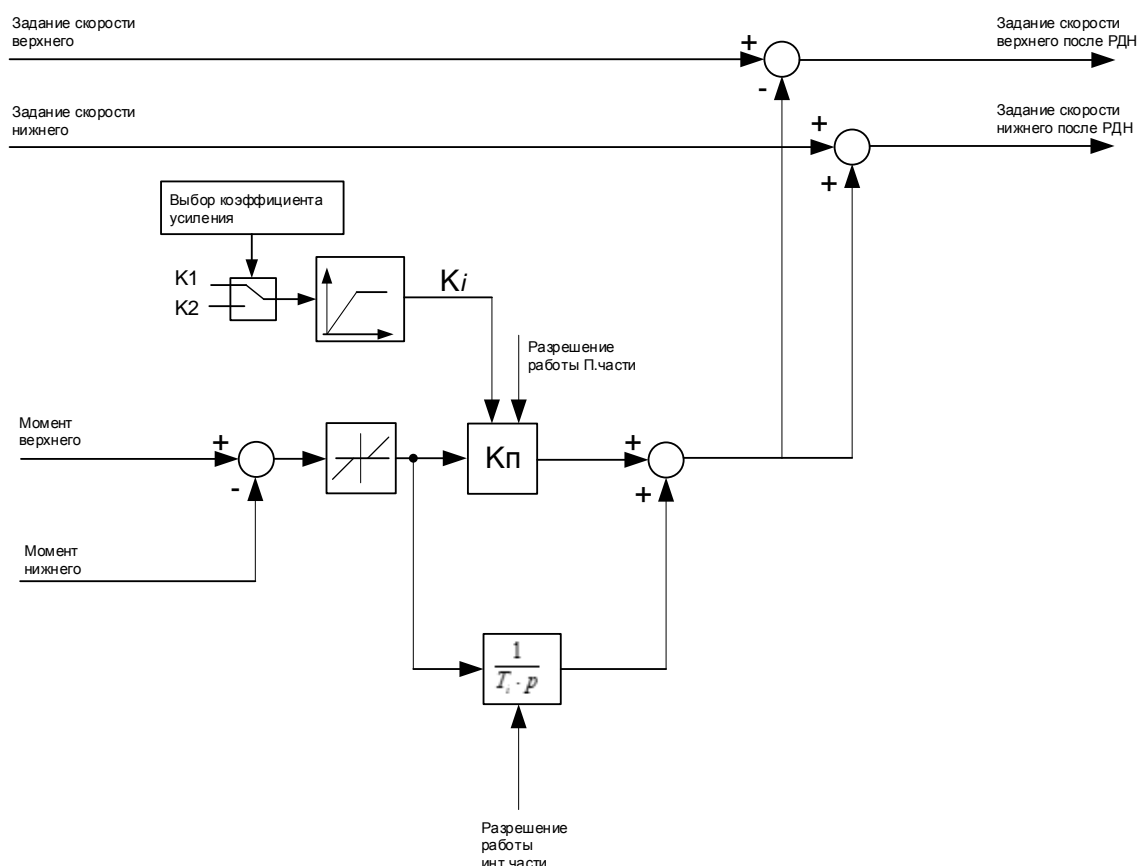


Рис. 5. Схема устройства, обеспечивающего реализацию разработанного способа деления нагрузок ВГП и НГП

коэффициента усиления $K_i = K_2$. Одновременно вводится в работу интегральная часть, необходимая для компенсации рассогласований моментов, возникающих в установившемся режиме прокатки. Она подключается по сигналу «Разрешение работы интегральной части», поступающему в момент окончания режима РДН, и обеспечивает достаточно большую постоянную времени T_i . Для того чтобы не возникало регулирующих воздействий на скорости при малых отклонениях моментов электроприводов, на вход регулятора включено звено с зоной нечувствительности. Зона нечувствительности устанавливается равной разности ΔV_3 , определяющей начальное рассогласование скоростей в режиме формирования «лыжи» (см. рис. 4б).

Результаты экспериментальных исследований

С целью оценки достоверности полученных результатов проведены экспериментальные исследования прокатки заготовок различных сортиментов на стане 5000. Анализировались режимы при работе проектной системы согласования нагрузок и при внедрении разработанного алгоритма. На рис. 6 приведены характерные осциллограммы скоростей и моментов, аналогичные рис. 3, полученные при внедрении алгоритма, реализующего разработанный способ управления.

Анализ осциллограмм позволил сделать следующие выводы:

1. Захват металла происходит в момент времени t_1 в режиме ускорения электропривода. В интервале t_1-t_2 осуществляется формирование «лыжи». В момент t_3 через заданную паузу $\Delta t_{\text{П}}$ включается в работу РДН.

2. В режиме согласования скоростей (интервал t_3-t_4) происходит выравнивание моментов двигателей за счет действия РДН (окно 3). Среднее рассогласование моментов (окно 4) составляет 125 кН·м или 5,7 % установившегося значения 2200 кН·м (окно 2). Следует подчеркнуть, что аналогичное рассогласование на рис. 3 достигает 6000 кН·м (окно 6), или 300 % установившегося момента. При этом момент НГП выходит на ограничение 4200 кН·м или 200 % номинального, а момент ВГП снижается до -1800 кН·м.

3. В установившемся режиме прокатки (интервал t_2-t_5) рассогласование скоростей (окно 1) практически отсутствует. При этом разность моментов (окно 4) близка к нулю.

В целом представленные осциллограммы подтверждают повышение точности и сокращение времени согласования моментов двигателей. Вместе с тем работа системы выравнивания нагрузок ВГП и НГП не может быть названо «идеальной», так как РДН входит в зону ограничения.

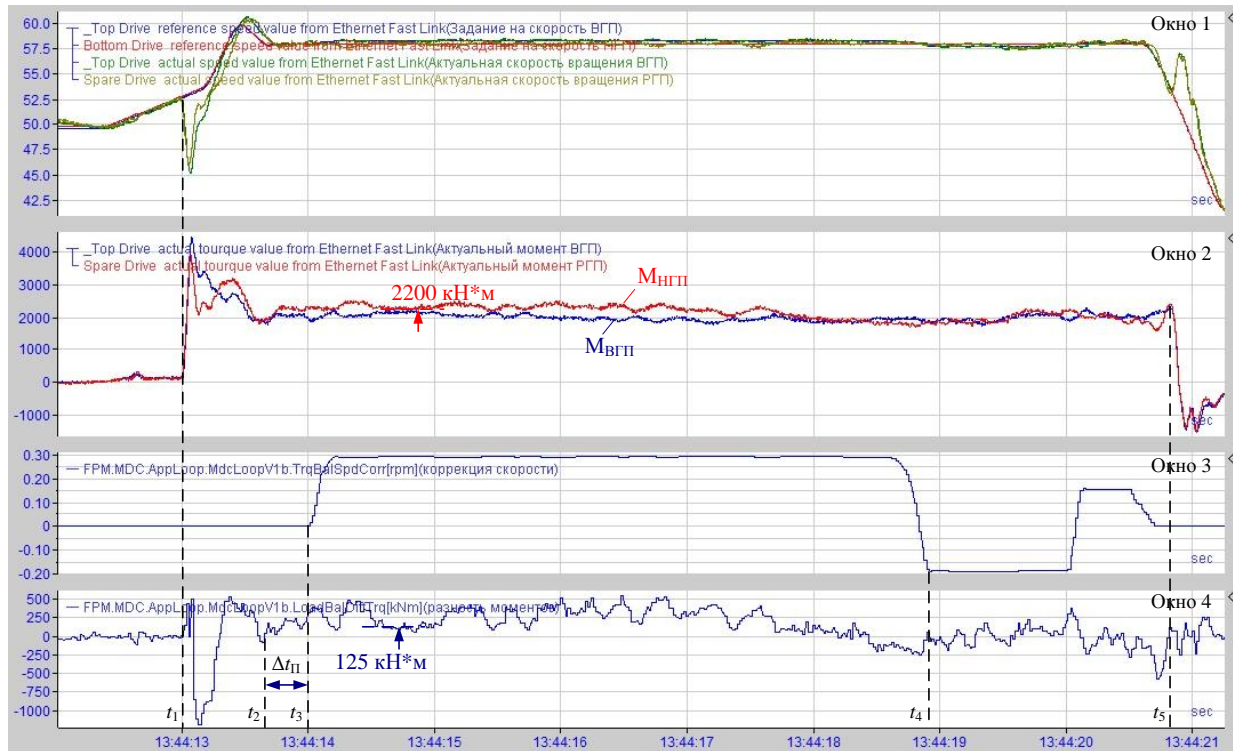


Рис. 6. Осциллограммы координат электроприводов горизонтальных валков при реализации разработанного алгоритма: окно 1 – заданные и фактические скорости электроприводов верхнего и нижнего валков; окно 2 – фактические моменты электроприводов; окно 3 – сигнал коррекции скорости от РДН; окно 4 – разность моментов двигателей

Заключение

Алгоритмы, реализующие разработанный способ выравнивания нагрузок электроприводов верхнего и нижнего валков, внедрены в АСУ ТП реверсивной клетки стана 5000 и находятся в стадии опытно-промышленной эксплуатации. Ожидаемый технико-экономический эффект от внедрения достигается за счет:

- улучшения нагрузочных и соответственно тепловых режимов двигателей НГП и ВГП;
- увеличения срока службы электрического и механического оборудования;
- снижения потерь электрической энергии за счет повышения эквивалентного КПД электроприводов клетки.

Разработанные способы управления электроприводами рекомендуются для внедрения на толстолистовых и широкополосных прокатных станах. Они реализуются в виде алгоритмов в компьютерной программе, поэтому их внедрение не требует дополнительных затрат.

Работа выполнялась в рамках госзадания Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (№ 13.9656.2017/8.9).

Литература

1. Разработка режимов асимметричной толстолистовой прокатки низколегированных сталей с целью минимизации дефекта подгибки концов листа / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов и др. // *Металлург.* – 2013. – № 11. – С. 75–77.
2. Чикишев, Д.Н. Анализ причин вертикального изгиба переднего конца полосы при горячей прокатке на основе математического моделирования / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2016. – Т. 59, № 1. – С. 204–208.
3. Песин, А.М. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации: моногр. / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.К. Свердлик. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 150 с.
4. Kiefer, T. An analytical approach for modeling asymmetrical hot rolling of heavy plates / T. Kiefer, A. Kugi // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems.* – 2008. – Vol. 14. – P. 249–267. DOI: 10.1080/13873950701844915
5. Minton, J.J. Asymptotic analysis of asymmetric thin sheet rolling / J.J. Minton, C.J. Cawthorn, E.J. Brambley // *International Journal of Mechanical Sciences.* – 2016. – Vol. 113. – P. 36–48. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2016.03.024
6. Front end bending in plate rolling influenced by circumferential speed mismatch and geometry / M. Philipp, W. Schwenzfeier, F.D. Fischer et al. // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2007. – Vol. 184. – P. 224–232. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.027
7. Пат. 2661523 Российская Федерация, В21В 1/22. Способ асимметричной прокатки передних концов толстых полос в клетке с индивидуальным приводом валков / Е.А. Варшавский, В.М. Басуров, М.А. Храпов. – Опубл. 17.07.2018, Бюл. № 20.
8. А. с. 1759491 СССР, МПК В21В 37/00. Способ лыжеобразования слитка на реверсивном стане горячей прокатки с индивидуальным приводом валков и устройство для его осуществления / В.Я. Шевчук, В.А. Беличенко, Н.Г. Орехов, Ю.И. Сиволов. – Опубл. 07.09.1992, Бюл. № 33.
9. А. с. № 1741945 СССР, МПК В21В1/22. Способ реверсивной прокатки / Р.Г. Мугалимов, Г.Н. Харченко. – Опубл. 23.06.1992, Бюл. № 23.
10. EP 0 130 551, В21В 37/00. Control method and apparatus for rolling mill / Hiroshi Koyama, Keiji Saito. – Date of publication of application 09.01.85. Bulletin 85/02.
11. Шохин, В.В. Исследование электромеханической системы прокатной клетки / В.В. Шохин, О.В. Пермякова, Е.С. Кисель // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2014. – № 2 (23). – С. 40–43.
12. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмушин, И.Ю. Андриюшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* – 2013. – № 1. – С. 12–21. DOI: 10.24892/rjje/20130102
13. Коротков, А.В. Согласование скоростных режимов главных приводов слябинга 1150 / А.В. Коротков, А.В. Кузьмин, О.И. Толочко. – <http://masters.donntu.org/publ2003/eltf/korotkov.pdf> (дата обращения: 23.06.2013).
14. Нестеренко, Д.Л. Исследование влияния разницы в скоростях вращения валков одной клетки на процесс прокатки / Д.Л. Нестеренко, Д.В. Шевченко, А.И. Боровков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* – 2011. – № 1. – С. 72–79.
15. Технологические схемы управления электроприводами чистой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин, И.Ю. Андриюшин и др. // *Труды VII конгресса прокатчиков. Т.1. (Москва 15–18 октября 2007 г.).* – М., 2007. – С. 71–75.
16. Способ коррекции разнотолщинности головного участка полосы в системе автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин, И.Ю. Андриюшин и др. // *Электротехника.* – 2013. – № 8. – С. 34–38.
17. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill / V.R. Khrumshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov et al. // *Metallurgist.* – 2015. – Vol. 59, no. 3-4. – P. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8.

18. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клеток прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 12–17.

19. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1 (38). – С. 14–25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25

20. Метельков, В.П. Оценка ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя при работе в циклических режимах / В.П. Метельков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 96–100.

21. Zyuzev, A.M. Toward the Evaluation of the Thermal State of an Induction Motor in the Recursive Short Term Mode / A.M. Zyuzev, V.P. Metelkov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85, no. 9. – P. 554–558. DOI: 10.3103/s1068371214090090

22. Медведев, В.Н. Технологическая востребованность и оценка эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов на объектах тепловой электростанции / В.Н. Медведев, А.С. Карандаев, О.И. Карандаева и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. – С. 109–114.

23. Расчет надежности электроприводов при внедрении преобразователей частоты / А.С. Карандаев, А.А. Шеметова, О.И. Карандаева, Г.В. Шурыгина // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 59–64.

24. Радионов, А.А. Оценка ресурса энергосбережения в электроприводе дутьевого вентилятора с двухскоростным асинхронным электродвигателем / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Р.Р. Храшин и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 61–70.

25. Шеметова, А.А. Методика расчета надежности автоматизированных электроприводов прокатного стана / А.А. Шеметова, А.С. Карандаев, О.И. Карандаева // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 48–54.

Гасияров Вадим Рашитович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gasiiarovvr@susu.ru.

Поступила в редакцию 13 мая 2019 г.

DOI: 10.14529/power190212

ALIGNING THE LOADS OF HORIZONTAL-ROLL DRIVES IN A PLATEMILL STAND

V.R. Gasiyarov, gasiiarovvr@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This paper overviews recent advancements in research into the emergence of frontal upward bends; it also covers papers on the distribution of load between the electric drives of upper and lower rolls in horizontal platemill stands. The bulk of research lacks appropriate emphasis on the alignment of these systems. The paper dwells structuring a speed regulator for Mill 5000, which is a platemill; the regulator runs load distribution and frontal upward bending algorithms. The paper substantiates the need to research their parameters for the purpose of better alignment. It presents oscillographs of upper- and lower-roll torques that prove the load is non-uniform in any roughing pass. The paper also analyzes the oscillographs of speeds and torques in a single pass. The existing speed configuration is shown to cause the lower-roll torque to reach its limits, whereas the upper-roll drive switches to the generator mode. The authors propose and validate a set of solutions to address these challenges. They herein present a load regulation method based on forced alignment of upper- and lower-roll drive speeds by disabling the integral part of the load distribution controller. An algorithm based on this method has been implemented in the APCS of Mill 5000; the resultant oscillographs prove better accuracy and shorter time to align the torques. It is herein recommended to apply the research results in the real-world setting.

Keywords: rolling mill, horizontal rolls, ski formation, electric drives, speeds, loads, coordination, systems, methods, method, regulator, structure, development, implementation, experimental studies, recommendations.

References

1. Salganik V.M., Chikishev D.N., Pustovoytov D.O., Denisov S.V., Stekanov P.A. [Development of Modes of Asymmetric Plate Rolling of Low-Alloyed Steels in Order to Minimize the Defect of Sheet Bending]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2013, no. 11, pp. 75–77. (in Russ.)
2. Chikishev D.N., Pozhidayeva E.B. [Analysis of the Reasons for the Vertical Bending of the Front End of the Strip during Hot Rolling Based on Mathematical Modeling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy]*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 204–208. (in Russ.)
3. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Sverdluk M.K. *Razvitiye teorii i tekhnologii protsessa asimmetrichnoy tonkolistovoy prokatki kak metoda intensivnoy plasticheskoy deformatsii: monogr.* [Development of the Theory and Technology of Asymmetric Thin-Sheet Rolling as a Method of Severe Plastic Deformation: Monograph]. Magnitogorsk, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2017. 150 p.
4. Kiefer T., Kugi A. An Analytical Approach for Modelling Asymmetrical Hot Rolling of Heavy Plates. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2008, vol. 14, pp. 249–267. DOI: 10.1080/13873950701844915
5. Minton J.J., Cawthorn C.J., Brambley E.J. Asymptotic Analysis of Asymmetric Thin Sheet Rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 113, pp. 36–48. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.03.024
6. Philipp M., Schwenzfeier W., Fischer F.D., Wödlinger R., Fischer C. Front end Bending in Plate Rolling Influenced by Circumferential Speed Mismatch and Geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 184, pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.027
7. Varshavskiy E.A., Basurov V.M., Khrapov M.A. *Sposob asimmetrichnoy prokatki perednikh kontsov tolstykh polos v kleti s individual'nym privodom valkov* [The Method of Asymmetric Rolling of the Front Ends of Thick Strips in the Cage with an Individual Drive of the Rolls]. Patent RF, no. 2661523, 2018.
8. Shevchuk V.YA., Belichenko V.A., Orekhov N.G., Sivovolov Yu.I. *Sposob lyzheobrazovaniya slitka na reversivnom stane goryachey prokatki s individual'nym privodom valkov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The Method of Ski Formation of the Ingot on the Reversing Hot Rolling Mill with an Individual Drive of the Rolls and a Device for Its Implementation]. Patent USSR, no. 1759491, 1992.
9. Mugalimov R.G., Kharchenko G.N. *Sposob reversivnoy prokatki* [Reverse Rolling Method]. Patent USSR, no. 1741945, 1992.
10. Hiroshi Koyama, Keiji Saito. *EP 0 130 551, B21B 37/00. Control Method and Apparatus for Rolling Mill*. Date of publication of application 09.01.85. Bulletin 85/02.
11. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Kisel' E.S. [Study of the Electromechanical System of the Rolling Stand]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 2 (23), pp. 40–43. (in Russ.)
12. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandayev A.S. [Mathematical Model of Interconnected Electrical Systems of a Continuous Group of Broadband Mill]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2013, no. 1, pp. 12–21. DOI: 10.24892/rjije/20130102 (in Russ.)
13. Korotkov A.V., Kuz'min A.V., Tolochko O.I. *Soglasovaniye skorostnykh rezhimov glavnykh privodov slyabinga 1150* [Coordination of Speeds of Main Slab Drives 1150]. Available at: <http://masters.donntu.org/publ2003/eltf/korotkov.pdf> (accessed 01.05.2019).
14. Nesterenko D.L., Shevchenko D.V., Borovkov A.I. [Study of the Effect of the Difference in the Speeds of Rotation of the Rolls of One Stand on the Rolling Process]. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2011, no. 1, pp. 72–79. (in Russ.)
15. Karandayev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyayev P.V. [Technological Schemes of Control of Electric Drives of the Finishing Group of a Wide-Strip Hot Rolling Mill]. *Trudy VII kongressa prokatchikov. T.1* [Proceedings of the VII Congress of Distributors. Vol. 1]. Moscow, 2007, pp. 71–75. (in Russ.)
16. Karandayev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Petryakov S.A., Khramshin R.R. [The Method of Correction of the Thickness Variation of the Head Section of the Strip in the System of Automatic Control of the Thickness of a Wide-Strip Hot Rolling Mill]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2013, no. 8, pp. 34–38. (in Russ.)
17. Khramshin V.R., Karandayev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, no. 3–4, pp. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8
18. Galkin V.V., Karandayev A.S., Golovin V.V., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Zalogin O.A. [Algorithm for Calculating the Speed and Load Modes of Electric Drives of Rolling Mill Stands

during Rolling of Thick Lanes]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. Vyp. 3* [News TSU. Technical Science. Iss. 3], 2010, part 2, pp. 12–17. (in Russ.)

19. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. [Justification of Ways to Limit the Dynamic Loads of the Electromechanical Systems of the Rolling Mill Stand]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1 (38), pp. 14–25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25 (in Russ.)

20. Metel'kov V.P. [Evaluation of the Insulation Resource of the Stator Winding of an Induction Motor when Operating in Cyclic Modes]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 96–100. (in Russ.)

21. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Toward the Evaluation of the Thermal State of an Induction Motor in the Recursive Short_Term Mode. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 9, pp. 554–558. DOI: 10.3103/s1068371214090090

22. Medvedev V.N., Karandayev A.S., Karandayeva O.I., Mamleyeva Yu.I., Khramshina E.A. [Technological Demand and Assessment of the Effectiveness of the Introduction of Variable Frequency Drives at the Thermal Power Plant]. *Vestnik IG-EU*, 2012, pp. 109–114. (in Russ.)

23. Karandayev A.S., Shemetova A.A., Karandayeva O.I., Shurygina G.V. [Calculation of the Reliability of Electric Drives in the Implementation of Frequency Converters]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [News of Universities. Electromechanics], 2010, no. 1, pp. 59–64. (in Russ.)

24. Radionov A.A., Karandayev A.S., Khramshin R.R., Gubaydullin A.R., Karandayeva O.I., Khramshina E.A. [Evaluation of the Resource of Energy Saving in the Electric Drive of a Blower Fan with a Two-Speed Asynchronous Electric Motor]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 61–70. (in Russ.)

25. Shemetova A.A., Karandayev A.S., Karandayeva O.I. [The Method of Calculating the Reliability of Automated Electric Rolling mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [News of Universities. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 48–54. (in Russ.)

Received 13 May 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гасияров, В.Р. Способ согласования нагрузок электроприводов горизонтальных валков клетки толстолистного прокатного стана / В.Р. Гасияров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 107–117. DOI: 10.14529/power190212

FOR CITATION

Gasiyarov V.R. Aligning the Loads of Horizontal-Roll Drives in a Platemill Stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 107–117. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190212
