

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГРУППЫ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНОГО СТАНА. Часть 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СОГЛАСОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВАЛКОВ*

*В.Р. Храмшин¹, А.А. Радионов², А.С. Карандаев²,
С.А. Евдокимов¹, А.Г. Шубин³, Б.М. Логинов³*

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

³ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск

Дана характеристика взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП). Отмечены особенности взаимодействия вертикальных и горизонтальных валков универсальной клетки, приводящие к возникновению повторного переходного процесса в электромеханических системах вертикальных валков при захвате полосы горизонтальными валками. Обоснована необходимость разработки способов управления электроприводами универсальной клетки, обеспечивающих ограничение их динамических токов в данном переходном режиме. Предложен концептуальный подход, согласно которому осуществляется ограничение динамических нагрузок за счет последовательного согласования скорости выхода полосы из валков предыдущей клетки и линейной скорости валков последующей клетки с передачей регулирующего воздействия по ходу прокатки. Рассмотрен способ управления скоростными режимами электроприводов непрерывной подгруппы ШСГП, обеспечивающий реализацию данного подхода. Предложен способ компенсации статической ошибки регулирования скорости и динамического момента электродвигателя последующей клетки, возникающего при захвате полосы, путем быстродействующего астатического регулирования скорости электропривода предыдущей клетки. Представлены результаты исследования названных способов методом математического моделирования с использованием разработанной математической модели взаимосвязанных клеток непрерывной подгруппы черновой группы ШСГП. Подтверждено, что предложенный способ управления скоростными режимами обеспечивает установку наиболее точного соотношения скоростей валков перед захватом полосы. В результате сопоставления переходных процессов в существующей системе управления электроприводами и в системе, реализующей разработанные способы, подтверждены снижение динамического тока двигателя вертикальных валков до уровня $\pm 10\%$ и практически полное отсутствие подпора со стороны горизонтальных валков при совместной прокатке. Даны рекомендации по промышленному внедрению разработанных технических решений.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, непрерывная группа клеток, автоматизированный электропривод, динамические нагрузки, согласование скоростей, компенсация динамического момента, способы управления, математическое моделирование, результаты.

Введение

Непрерывная подгруппа клеток широкополосного стана горячей прокатки представляет собой последовательно расположенные универсальные клетки, прокатка полосы в которых осуществляется одновременно. Расположение клеток и кинематическая схема электроприводов непрерывной подгруппы стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (далее стан 2000) представлены в [3, 4]. Каждая универсальная клетка содержит вертикальные и горизонтальные валки (в часто применяемой терминологии – вертикаль-

ные и горизонтальные клетки), взаимосвязанные в процессе прокатки через металл. Их жесткая взаимосвязь определяет особенности динамических режимов, когда возмущающие воздействия оказывают влияние как на электромеханические системы одной универсальной клетки, так и передаются в смежные межклетевые промежутки [4, 5].

В опубликованных ранее трудах получили развитие исследования динамического взаимодействия клеток через толстую полосу [6–8]. Получены и объяснены результаты взаимодействия, в частности, определены режимы прокатки, при кото-

* Часть 1 «Разработка математической модели» опубликована в [1]; Часть 2 «Исследование динамических нагрузок в универсальных клетках» опубликована в [2].

рых мгновенный подпор, формирующийся в полосе во время ее захвата валками последующей клетки, воспринимается валками предыдущей клетки в виде дополнительного сопротивления. В результате в линии привода предыдущей клетки возникает повторный переходный процесс, а максимальный момент сил упругости становится соизмеримым с пиковым моментом при собственно захвате полосы [9].

Экспериментальные исследования динамических нагрузок универсальных клеток непрерывной подгруппы, проведенные на стане 2000, показали, что при захвате полосы горизонтальными валками максимальный момент в вертикальных валках может превышать установившийся момент прокатки в 1,5–2 раза [10]. Динамические удары приводят к выходу из строя электрического и механического оборудования, авариям по причине застревания полосы, увеличению концевой обрезки, связанному с длительными переходными процессами.

С целью исследования повторного переходного процесса, в первой части статьи разработана математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем универсальных клеток [1]. Во второй части представлены результаты исследований динамических режимов, возникающих в электромеханических системах вертикальных валков при захвате полосы горизонтальными валками [2]. Установлено, что знак и амплитуду ударного тока (момента) при повторном переходном процессе определяет соотношение линейных скоростей вертикальных валков при свободной прокатке и горизонтальных валков перед захватом полосы. На основании этого сделан вывод о возможности ограничения динамических нагрузок за счет автоматического согласования скоростей электроприводов валков универсальных клеток.

Постановка задачи

Обеспечению режимов совместной прокатки служат системы автоматического регулирования нулевого натяжения (САРНН), которые, по своей сути, являются системами согласования линейных скоростей валков горизонтальных клеток [11, 12]. Так, в составе АСУ ТП непрерывной подгруппы стана 2000 функционирует САРНН, представляющая собой загруженную в контроллер управляющую программу, которая задает скоростные режимы электроприводов горизонтальных валков [13]. Система поддерживает заданное натяжение полосы в межклетевых промежутках. Влияние вертикальных валков не учитывается, скорости их электроприводов не регулируются. Ударные нагрузки, возникающие при захвате полосы горизонтальными и вертикальными валками, данной системой не контролируются и не ограничиваются.

В ходе проведенных экспериментальных и теоретических исследований выявлены причины, вызывающие возникновение мгновенного подпо-

ра при захвате полосы горизонтальными валками [9, 10]. Основными являются:

1. Несогласованность линейных скоростей валков смежных (горизонтальных и вертикальных) клеток. Вследствие этого скорость выхода полосы из предыдущей клетки не соответствует горизонтальной составляющей линейной скорости вращения валков следующей клетки.

2. Наличие неконтролируемой статической ошибки регулирования скорости после захвата, связанной с пропорциональным регулированием скорости в однократно-интегрирующей системе.

Проведенный литературный обзор показал отсутствие известных технических решений, которые позволили бы обеспечить эффективное снижение динамических нагрузок электромеханических систем вертикальных и горизонтальных валков непрерывной подгруппы ШСГП в условиях их жесткой взаимосвязи через металл. Это предопределило целесообразность разработки способов и систем управления электроприводами последовательно расположенных клеток прокатных станов, которые обеспечили бы устранение указанных недостатков.

Основная часть

Для устранения рассогласования скоростей последовательно расположенных клеток прокатного стана сформулирован общий подход к проблеме ограничения динамических нагрузок путем формирования равенства скорости выхода полосы из предыдущей (вертикальной либо горизонтальной) клетки и горизонтальной составляющей линейной скорости валков последующей (горизонтальной либо вертикальной) клетки. Помимо этого осуществляется компенсация возмущающих воздействий, возникающих в режиме захвата полосы следующей клетью. Данный подход носит концептуальный характер, поскольку справедлив для любых непрерывных групп клеток, прокатка в которых осуществляется без натяжения. Поэтому он применим для широкополосных, толстолистовых, сортовых и обжимных станов.

Последовательное согласование скоростей электроприводов непрерывной подгруппы

В направлении реализации данного подхода для устранения рассогласования скоростей горизонтальных и вертикальных валков разработан способ управления электроприводами, согласно которому при свободной прокатке в вертикальных валках (при движении полосы в универсальной клетке от вертикальных валков к горизонтальным) устанавливаются скорости горизонтальных валков пропорционально произведению угловой скорости горизонтальных валков на отношение диаметров вертикальных и горизонтальных валков [14]. Коррекция осуществляется с учетом угла захвата полосы горизонтальными валками. При свободной прокатке в них (при движении полосы между дву-

мя универсальными клетями от горизонтальных валков предыдущей ($i-1$)-й клетки к вертикальным валкам следующей i -й клетки) корректируют скорость вертикальных валков пропорционально скорости горизонтальных валков и отношению диаметров горизонтальных и вертикальных валков.

Способ поясняется рис. 1, где представлены горизонтальные валки 1 предыдущей ($i-1$)-й клетки, валки 2 последующей i -й клетки и вертикальные валки 3 i -й клетки, взаимосвязанные через металл.

При свободной прокатке полосы 4 в вертикальных валках 3 до ее захвата горизонтальными валками 2 скорость электропривода горизонтальных валков устанавливается согласно зависимости

$$\omega_{\Gamma} = \omega_{\text{В}} \frac{D_{\text{В}}}{D_{\Gamma}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{\Gamma}}. \quad (1)$$

Это выражение получено из условия совместной прокатки в вертикальных и горизонтальных валках без натяжения:

$$V_{\alpha} = V_{\text{В}} = V_{\Gamma} \cdot \cos \alpha_{\Gamma},$$

где V_{α} – горизонтальная составляющая линейной скорости V_{Γ} горизонтальных валков в точке захвата полосы; $V_{\text{В}}$ – линейная скорость вертикальных валков; D_{Γ} , $D_{\text{В}}$ – диаметры горизонтальных и вертикальных валков; α_{Γ} – угол захвата полосы горизонтальными валками; $V_{\text{М1}}$, $V_{\text{М2}}$ – скорости металла (полосы) на входе и выходе горизонтальной клетки.

Косинус угла захвата $\cos \alpha_{\Gamma}$ полосы горизонтальными валками рассчитывается по зависимости:

$$\cos \alpha_{\Gamma} = 1 - \frac{H_1 - H_2}{D_{\Gamma}},$$

где H_1 , H_2 – толщины полосы на входе и выходе горизонтальной клетки.

В результате, к моменту захвата полосы валками горизонтальной клетки линейная скорость $V_{\text{М2}}$ становится равной горизонтальной составляющей V_{α} линейной скорости V_{Γ} (принимают

$V_{\text{М}} = V_{\text{В}}$). Это обеспечивает захват полосы горизонтальной клетью с меньшими динамическими нагрузками. Кроме того, решается главная задача: ограничиваются динамические удары в вертикальных валках, возникающие при повторном переходном процессе в момент захвата полосы горизонтальными валками.

Однако при реализации данного способа не устраняются ударные нагрузки, возникающие при захвате полосы вертикальными валками. Они возникают вследствие несогласованности линейной скорости этих валков и скорости выхода полосы из предыдущей ($i-1$)-й горизонтальной клетки. Это может быть вызвано неточным заданием скоростей валков смежных клеток, погрешностями измерения давления, неточным расчетом задания натяжения и др. Кроме того, при предварительном задании скоростей электроприводов горизонтальной и вертикальной клеток не может быть учтена статическая ошибка скорости, возникающая при прокатке полосы в валках ($i-1$)-й горизонтальной клетки. Захват в условиях рассогласования скоростей сопровождается ударом раската о вертикальные валки i -й клетки.

Для устранения данного недостатка рассмотренный выше способ получил развитие, направленное на согласование скорости выхода полосы из горизонтальных валков (1 на рис. 1) предыдущей клетки и горизонтальной составляющей линейной скорости вертикальных валков следующей клетки. Для этого при свободной прокатке в горизонтальных валках ($i-1$)-й клетки до захвата полосы вертикальными валками i -й клетки скорость электропривода вертикальных валков устанавливается согласно зависимости

$$\omega_{\text{В}} = \omega_{\Gamma(i-1)} \frac{D_{\Gamma}}{D_{\text{В}}}, \quad (2)$$

где $\omega_{\Gamma(i-1)}$ – скорость горизонтальных валков ($i-1$)-й клетки в режиме свободной прокатки.

Техническая реализация способа обеспечит установку более точного соотношения скоростей

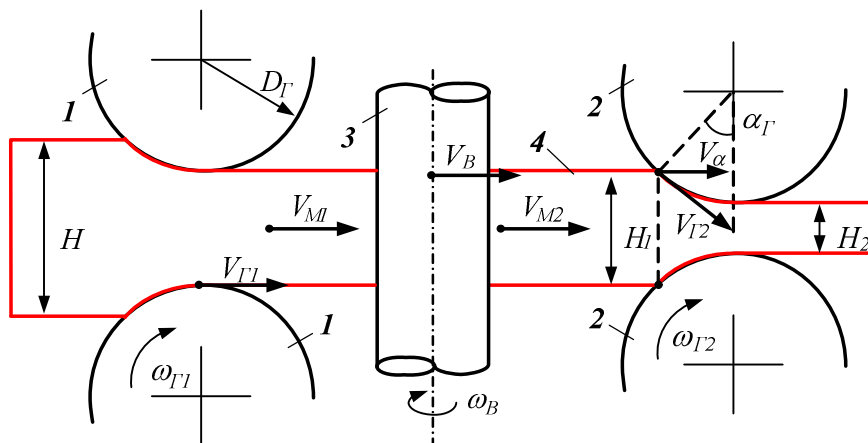


Рис. 1. К пояснению способа управления прокаткой

вертикальных и горизонтальных валков последовательно расположенных универсальных клетей перед захватом полосы. Вместе с тем, способ не обеспечивает быстродействующего регулирования скорости при отработке динамического момента (подпора), возникающего непосредственно в момент захвата. Статическая ошибка регулирования скорости после захвата полосы горизонтальными валками составляет 3–5 % установленного значения скорости прокатки [15–17]. Как отмечалось выше, это является одной из причин возникновения недопустимых динамических нагрузок в электромеханических системах вертикальных валков при повторном переходном процессе. Соответственно, важной задачей является совершенствование рассмотренного способа в направлении устранения указанных недостатков.

Компенсация ошибки регулирования скорости и динамической составляющей момента

Для решения поставленной задачи предложен принцип компенсации статической ошибки регулирования скорости и динамического момента электродвигателя последующей клетки, возникающего при захвате полосы, путем быстродействующего астатического регулирования скорости электропривода предыдущей клетки. Для универсальной клетки разработан способ коррекции скорости вертикальных валков после захвата полосы горизонтальными валками [14].

При захвате полосы 4 горизонтальными валками 2 (см. рис. 1) рассчитывают и запоминают среднее значение $I_{\text{всв.сред}}$ статического тока электропривода вертикальных валков 3 до захвата горизонтальными валками 2:

$$I_{\text{всв.сред}} = \frac{\sum I_{\text{в}}}{N}, \quad (3)$$

где N – количество слагаемых в сумме.

Одновременно переходят от регулирования скорости $\omega_{\text{в}}$ вертикальных валков 2 к регулированию статического тока $I_{\text{в}}$ этого электропривода. При совместной прокатке полосы 4 в вертикальных 3 и горизонтальных 2 валках регулируют статический ток $I_{\text{в}}$ электропривода вертикальных валков 3, при этом величину корректирующего сигнала $u_{\text{кв}}$ рассчитывают по интегральной зависимости

$$u_{\text{кв}} = \frac{1}{T_{\text{и}} p} (I_{\text{в совм}} - I_{\text{в св.сред}}), \quad (4)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования по времени; $T_{\text{и}}$ – постоянная интегрирования.

При выходе полосы 4 из вертикальных валков 3 переходят от регулирования статического тока к регулированию их скорости. Одновременно запоминаются параметры совместной прокатки для адаптивной коррекции уставки скорости электропривода вертикальных валков при прокатке следующей полосы. Это обеспечивает минимальную

коррекцию скорости данного электропривода, в результате чего улучшаются условия захвата и снижаются динамические нагрузки.

Исследование способа последовательного согласования скоростей электроприводов непрерывной подгруппы

Исследования рассмотренного выше способа согласования скоростей выполнены на примере электроприводов последовательно расположенных вертикальных и горизонтальных валков универсальных клетей № 4–6 непрерывной подгруппы стана 2000 (как отмечалось выше, кинематическая схема электроприводов клетей приведена в [2]). Расчет переходных процессов проводился с использованием математической модели, разработанной в [1]. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

После входа полосы в вертикальные валки клетки № 4 (момент $t_{\text{в4}}$) возникает просадка ее скорости $\Delta V_{\text{в4}}$ от 0,78 до 0,753 м/с. Согласно разработанному способу выполняется расчет коррекции скорости горизонтальных валков $\Delta V'_{\text{г4}}$ согласно зависимости (2). По рассчитанному значению в момент времени $t_{\text{г4}}$ происходит повышение скорости горизонтальных валков этой клетки. После входа полосы в горизонтальные валки возникает статическая просадка скорости $\Delta V_{\text{г4}}$ от 1,01 до 0,99 м/с.

Далее при свободной прокатке в горизонтальных валках клетки № 4 (при движении полосы в межклетевом промежутке от горизонтальных валков клетки № 4 к вертикальным валкам клетки № 5) вычисляется среднее значение статического тока по выражению (3), и осуществляется коррекция скорости вертикальных валков клетки № 5 согласно зависимости (4).

В момент времени $t_{\text{в5}}$ происходит увеличение скорости вертикальных валков этой клетки на величину $\Delta V'_{\text{в5}}$. После входа полосы в вертикальные валки клетки № 5 (момент $t_{\text{в5}}$) возникает просадка скорости от 1,21 до 1,19 м/с. Выполняется расчет корректирующего значения скорости горизонтальных валков $\Delta V'_{\text{г5}}$ согласно зависимости (2), после чего в момент времени $t'_{\text{г5}}$ происходит разгон горизонтальных валков этой клетки. После входа полосы в горизонтальные валки возникает просадка скорости $\Delta V_{\text{г5}}$ от 1,63 до 1,61 м/с.

Аналогичные процессы происходят в моменты входа полосы в вертикальные и горизонтальные валки клетки № 6. В качестве отличия принято, что до заправки полосы скорость $V_{\text{г6}}$ горизонтальных валков была установлена выше требуемой при совместной прокатке. Поэтому в момент времени $t'_{\text{г6}}$ происходит корректирующее снижение скорости горизонтальных валков на величину $\Delta V'_{\text{г6}}$ (а не ее увеличение, как для валков клетки № 5).

Анализ результатов выполненных исследований подтвердил, что предложенный способ управления процессом прокатки обеспечивает автоматическое согласование линейной скорости валков

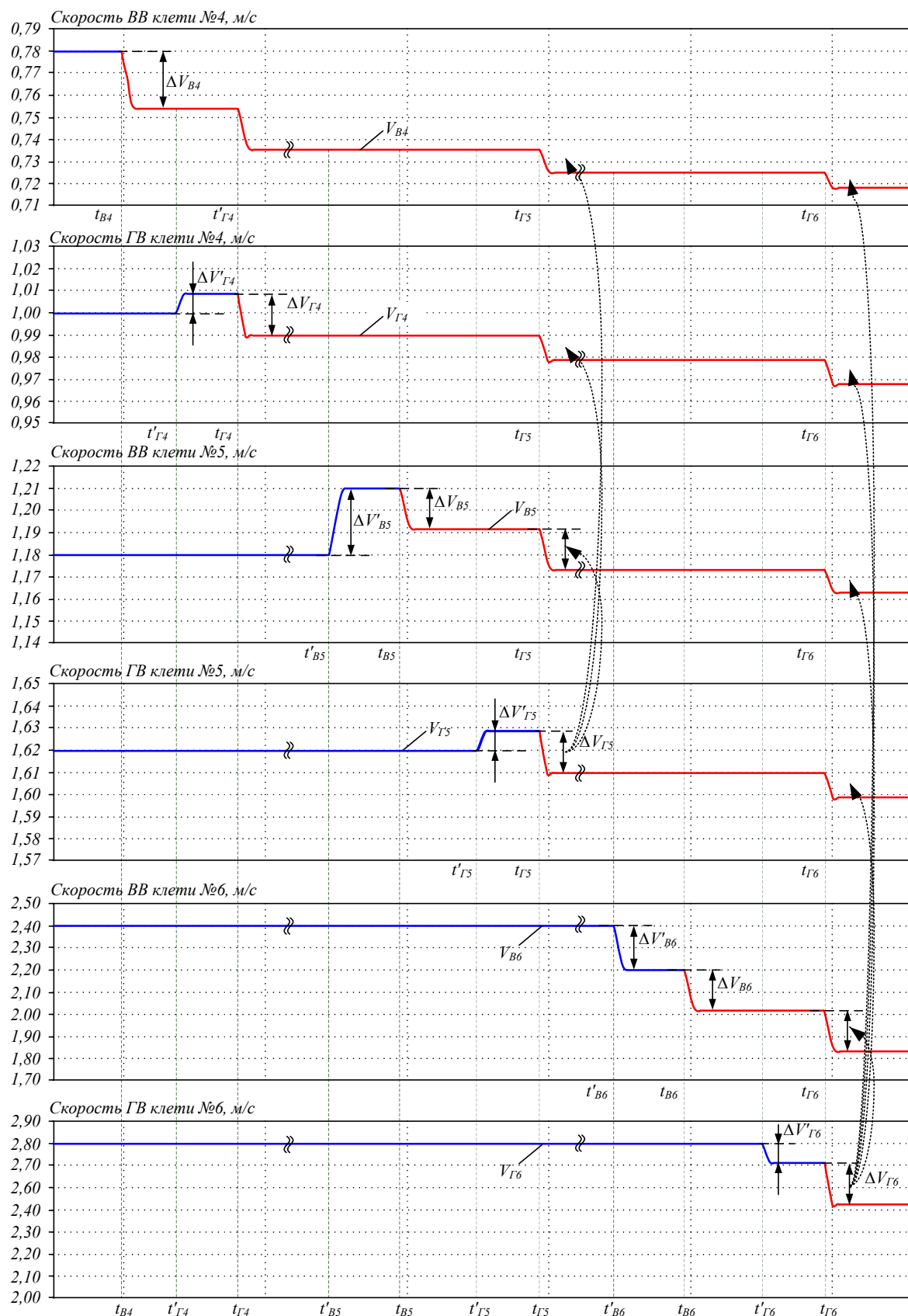
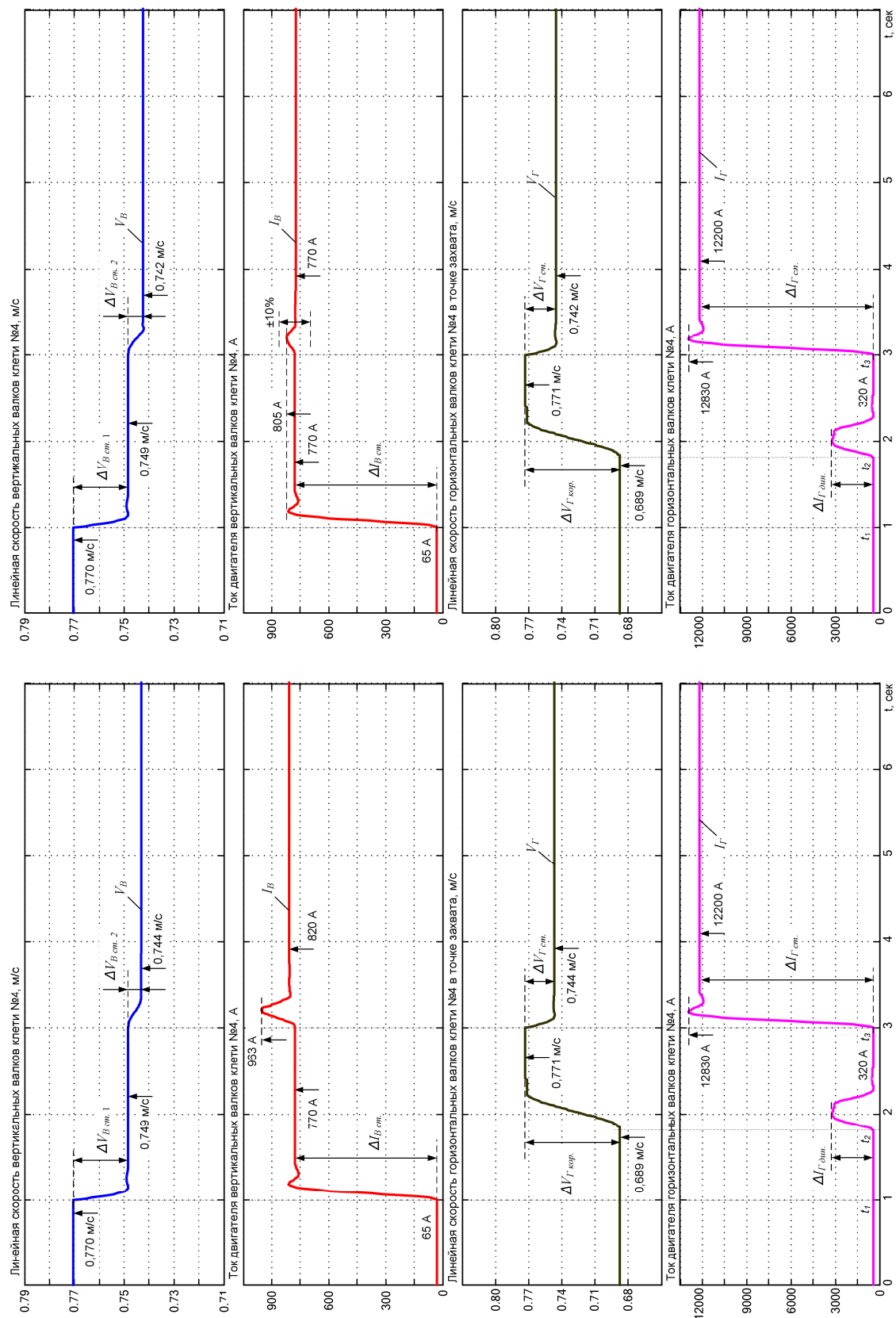


Рис. 2. Результаты моделирования разработанных алгоритмов управления электроприводами клеток: t_{B4}, t_{B5}, t_{B6} – моменты захвата полосы вертикальными валками клеток № 4–6; t_{G4}, t_{G5}, t_{G6} – моменты захвата полосы горизонтальными валками клеток № 4–6; $t'_{B4}, t'_{B5}, t'_{B6}$ – моменты начала коррекции скорости в вертикальных валках; $t'_{G4}, t'_{G5}, t'_{G6}$ – моменты начала коррекции скорости в горизонтальных валках



а) б) **Рис. 3. Результаты моделирования переходных процессов электроприводов вертикальных и горизонтальных валков при реализации способа компенсации динамической составляющей момента**

каждой последующей (горизонтальной либо вертикальной) клетки и скорости выхода полосы из предыдущей клетки. За счет последовательной коррекции обеспечивается установка наиболее точного соотношения скоростей валков перед захватом полосы, что обеспечивает улучшение динамических процессов.

Ниже рассматриваются результаты исследования переходных процессов электроприводов вертикальных и горизонтальных валков при захвате полосы горизонтальными валками.

Моделирование способа ограничения динамических нагрузок электропривода вертикальных валков

Моделирование также выполнялось с использованием разработанной математической модели [1]. На первом этапе исследовались процессы при реализации способа, осуществляющего последовательное согласование скоростей электроприводов непрерывной подгруппы. Результаты представлены на рис. 3, а.

После входа полосы в вертикальные валки в интервале времени $t_1 - t_2$ происходит снижение их линейной скорости V_B на величину $\Delta V_{B\text{ст}1}$, составляющую 2,7 % (от 0,770 до 0,749 м/с). Ток двигателя I_B вертикальных валков изменяется на величину $\Delta I_{B\text{ст}}$ от 65 до 770 А без перерегулирования. В момент времени t_2 осуществляется автоматическая коррекция скорости V_G горизонтальных валков: скорость увеличивается на величину $\Delta V_{G\text{кор}}$ от 0,689 до 0,771 м/с.

После захвата полосы валками горизонтальной клетки (момент t_3) происходит снижение скорости валков V_B вертикальной клетки на $\Delta V_{B\text{ст}2}$ (от 0,749 до 0,744 м/с) вследствие статической ошибки регулирования и подпора со стороны горизонтальных валков. Установившийся ток нагрузки двигателя I_B возрастает незначительно от 770 до 820 А с динамическим броском до 963 А (на 17,4 %). В горизонтальной клетке происходит снижение скорости $\Delta V_{G\text{ст}}$ на 3,5 % (от 0,771 до 0,744 м/с) и изменение тока I_G от 320 А (холостой ход) до 12 200 А (установившееся значение) с динамическим приращением до 12 830 А, что составляет 5,2 %.

При совместной прокатке линейные скорости вертикальных и горизонтальных валков выравниваются на уровне 0,744 м/с. Превышение тока двигателя вертикальных валков над своим установившимся значением при свободной прокатке говорит о наличии подпора полосы в промежутке между вертикальными и горизонтальными валками.

Далее выполнялось моделирование рассмотренного способа компенсации динамической составляющей момента, результаты представлены на рис. 3, б.

Процессы, происходящие в интервале времени $t_1 - t_3$, аналогичны представленным на рис. 3, а. Согласно способу, после захвата полосы горизон-

тальными валками в момент t_3 осуществляется переход от регулирования скорости к регулированию статического тока электропривода вертикальных валков, в соответствии с зависимостью (4). В результате снижается динамический ток двигателя вертикальных валков, его максимальное значение не превышает 4,5 %. При этом неизменное значение тока двигателя вертикальных валков (770 А) до и после входа полосы в горизонтальные валки говорит об отсутствии подпора со стороны горизонтальных валков.

Обсуждение результатов

Сравнение расчетных кривых на рис. 3, а с аналогичными зависимостями, рассчитанными для действующей системы (см. рис. 3, а в [2]), позволяет сделать следующие выводы:

1. При реализации предложенного способа согласования скоростей вертикальных и горизонтальных валков максимальный динамический ток, вызванный мгновенным подпором вертикальных валков при захвате полосы горизонтальными валками, снижается в 1,5 раза: от 1490 до 963 А при установившемся токе 770 А.

2. Максимальные значения токов электропривода горизонтальных валков после захвата в момент t_3 отличаются в 1,2 раза: 12 830 А на рис. 3, а и 14 580 А на аналогичном рисунке в [2] при установившемся токе прокатки 12 200 А.

3. В существующей системе статическая ошибка регулирования скорости, вызванная подпором после захвата полосы горизонтальными валками, $\Delta V_{B\text{ст}2} = 7,8 \%$. В разработанной системе аналогичная ошибка составляет 0,7 %, т. е. снижается в 10 раз и находится в пределах погрешности моделирования.

Сравнение расчетных кривых, представленных на рис. 3, а и 3, б, позволяет оценить преимущества разработанного способа компенсации динамической составляющей момента. Мгновенный подпор, формирующийся в полосе, и повторный переходный процесс в электроприводе вертикальных валков практически устранены. Анализ аналогичных кривых, полученных при различных соотношениях скоростей валков, позволил сделать вывод, что отклонения тока после захвата в момент времени t_3 находятся в диапазоне $\pm 10 \%$ установившегося значения.

При совместной прокатке линейные скорости вертикальных и горизонтальных валков находятся практически на одном уровне: 0,742 и 0,744 м/с. Это подтверждает отсутствие подпора полосы со стороны горизонтальных валков в установившемся режиме.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили, что предложенный способ управления процессом прокатки с автоматическим согласованием скоростей

электроприводов последовательно расположенных горизонтальных либо вертикальных валков клеток непрерывной подгруппы обеспечивает установку наиболее точного соотношения скоростей этих валков перед захватом полосы. За счет этого обеспечивается автоматическое согласование линейной скорости валков последующей клетки и скорости выхода полосы из предыдущей клетки. В результате снижаются динамические броски тока (момента) как при захвате полосы, так и при повторном переходном процессе.

В результате моделирования разработанного способа компенсации ошибки регулирования скорости и динамической составляющей момента электропривода подтверждены ограничение динамического тока двигателя вертикальных валков на уровне $\pm 10\%$ и практически полное отсутствие подпора со стороны горизонтальных валков при совместной прокатке.

В целом проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при реализации разработанных способов снижаются динамические нагрузки механического и электрического оборудования [19]. Внедрение представленных технических решений обеспечит повышение долговечности оборудования, а также снижение простоев из-за его поломок.

Достоверность сделанных выводов подтверждается результатами экспериментальных исследований алгоритмов, реализующих предложенные способы на стане 2000, представленными в [20]. В процессе опытно-промышленной эксплуатации обоснована техническая эффективность их промышленного внедрения.

Разработанные технические решения рекомендуются для внедрения на широкополосных станах горячей прокатки, толстолистовых и сортовых станах, в том числе оснащенных электроприводами переменного тока с частотным регулированием скорости. Их преимуществом является высокая эффективность при отсутствии капитальных затрат.

Работа выполняется в рамках госзадания (№ 2014/80) Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, А.С. Евдокимов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 59–73. DOI: 10.14529/power150108
2. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 2. Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, А.С. Евдокимов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 67–76. DOI: 10.14529/power150209
3. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill / V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov et al. // Metallurgist. – July 2015. – Vol. 59, № 3–4. – P. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8
4. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клеток черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16, № 34 (251). – С. 35–41.
5. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клеток черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, А.А. Радионов и др. // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». – Иваново, 2012. – С. 652–657.
6. Храмин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 360 с.
7. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрюшин и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 34–40.
8. Басков, С.Н. Энергосиловые параметры приводов и система профилированной прокатки слабых стана 2800 / С.Н. Басков, А.С. Карандаев, О.И. Осипов // Приводная техника. – 1999. – № 1–2. – С. 21–24.
9. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клеток стана горячей прокатки / В.Р. Храмин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 69–77.
10. Ограничение ударных нагрузок электрооборудования клеток непрерывной подгруппы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрюшин и др. // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. – Саранск. Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. – Т. 2. – С. 305–309.
11. Фомин, Г.Г. Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки / Г.Г. Фомин, А.В. Дубейковский, П.С. Гринчук – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
12. Восканьянц, А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки: учеб. пособие / А.А. Восканьянц. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 85 с.

13. Согласование скоростных режимов электроприводов клеток непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов и др. // Вестник ИГЭУ – Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ», 2013. – Вып. 1. – С. 98–103.

14. Пат. 2494828 Российская Федерация, МПК В21В37/52. Способ автоматического регулирования натяжения полосы в черновой группе клеток непрерывного прокатного стана / И.Ю. Андриюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев и др. // БИМП. – 2013. – № 28.

15. Ограничение минимальных скоростей электроприводов стана 2000 при прокатке трубной заготовки / А.А. Радионов, И.Ю. Андриюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. – № 3. – С. 20–23.

16. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клеток стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андриюшин, В.В. Галкин, В.В. Головин и др. // Известия вузов. Электромеханика. – 2011, № 4. – С. 31–35.

17. Храмшин, В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клеток широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин // Электротехника. – 2013. – № 4. – С. 49–55.

18. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андриюшин и др. // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 12–20.

19. Храмшин, В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – № 6. – С. 100–104.

20. Снижение динамических нагрузок в универсальных клетях прокатного стана / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов и др. // Металлург. – 2015. – № 4. – С. 41–47.

Храмшин Вадим Рифхатович, д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; hvrmgn@gmail.com.

Радионов Андрей Александрович, д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе, профессор кафедры «Мехатроника», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; radionovaa@susu.ac.ru.

Карандаев Александр Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Мехатроника», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; askaran@mail.ru.

Евдокимов Сергей Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроника и микроэлектроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; evdmgtu@yandex.ru.

Шубин Андрей Григорьевич, начальник Центральной электротехнической лаборатории, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск; shubin_ag@mmk.ru.

Логинов Борис Михайлович, ведущий инженер Центральной электротехнической лаборатории, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск; loginov_bm@mmk.ru.

Поступила в редакцию 15 января 2016 г.

MATHEMATICAL MODELLING OF THE INTERRELATED ELECTRIC AND MECHANICAL SYSTEMS OF CONTINUOUS SUB-GROUP OF THE ROLLING MILL STANDS. Part 3. STUDY OF WAY TO COORDINATE LINEAR SPEEDS OF EDGING AND HORIZONTAL ROLLS

V.R. Khramshin¹, hvrmgn@gmail.com,
A.A. Radionov², radionovaa@susu.ac.ru,
A.S. Karandaev², karandaevas@susu.ac.ru,
S.A. Evdokimov¹, evdmgtu@yandex.ru,
A.G. Shubin³, shubin_ag@mmk.ru,
B.M. Loginov³, loginov_bm@mmk.ru

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

³ Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation

The paper describes interrelated electromechanical systems of the continuous sub-train of the wide-strip hot-rolling mill (WSHRM). It notes peculiarities of interrelation of edging and horizontal rolls of the universal train that result in the repeated transient process within the electromechanical systems of edging rolls at strip gripping by horizontal rolls. It justifies the need for developing means to control electric drives of the universal stand providing limitation of their dynamic currents in this transient mode. The paper proposes a conceptual approach at which dynamic loads are limited due to consistent coordination of speed of the strip leaving rolls of the previous stand and linear one of the next stand with transfer of the control action in the rolling direction. It considers the methods for control of speed modes of electric drives installed at the continuous WSHRM sub-train than ensures implementation of this approach. A static error of speed control and dynamic torque of the electric motor of the next stand formed at strip gripping may be compensated by means of high-speed non-corresponding control of electric drive of the previous stand. The study provides outcome of study of the above methods by means the developed mathematical model of the interrelated stands of the roughing continuous WSHRM train. It is proven that the proposed method of speed mode control helps to establish the best possible roll speed relation before strip grip. Based on the comparison of transient processes within the existing system of the electric drive control and those in the system implementing the methods developed, the study confirms that dynamic current of the edging roll motor may be reduced by $\pm 10\%$. At this, there is practically no looping at the side of horizontal rolls at simultaneous rolling. It provides recommendations for commercialization of these technical solutions.

Keywords: wide-strip hot-rolling mill, continuous train, automated electric drive, dynamic loads, speed coordination, compensation of dynamic torque, control methods, mathematical modelling, outcome.

References

1. Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Shubin A.G. Mathematical Modelling of the Interrelated Electric and Mechanical Systems of Continuous Sub-Group of the Rolling Mill Stands. Part 1. Development of the Mathematical Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 59–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150108
2. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Shubin A.G., Gasiyarov V.R. Mathematical Modelling of the Interrelated Electric and Mechanical Systems of Continuous Sub-Group of the Rolling Mill Stands. Part 2. Study of Dynamic Loads in the Universal Mill Stands. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 67–76. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150209
3. V. R. Khramshin, A. S. Karandaev, S. A. Evdokimov, I. Yu. Andryushin, A. G. Shubin, A. N. Gostev Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. *Metallurgist*, vol. 59, no. 3-4, 2015, pp. 315-323. DOI:10.1007/s11015-015-0103-8.
4. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Gostev A.N. [Speed Adjustment Algorithm Improvement of the Stand Electric Drives of the Hot Rolling Mill Roughing Train]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2011, vol. 16, no. 34 (251), pp. 35–41. (in Russ.)
5. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. [Coordination Speeds of the Interconnected Electric Drives of Cages of Draft Group Rolling Mill]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VII International (XVIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric]. Ivanovo, ISPU, 2012, pp. 652–657. (in Russ.)

6. Khramshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos. Dokt. Diss.* [Development of Electrotechnical Systems of Continuous Hot Rolling Mill Group when Expanding Assortment of Bands. Doct. Diss.]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 360 p.
7. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Petryakov S.A., Lukin A.A. [New Technical Solutions in Electric Drives and Control Systems of Manufacturing Parameters of Hot Rolling Mills]. *Proceedings of TulGU. Technical Sciences.*, 2010, issue 3, part 2, pp. 34–40. (in Russ.)
8. Baskov S.N., Karandaev A.S., Osipov O.I. [Power Parameters of the Drives and System of the 2,800 mm Mill Sectional Slabbing]. *Drive Equipment*, 1999, no. 1–2, pp. 21–24. (in Russ.)
9. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. [Dynamic Loads Reduction of Mechanical and Electrical Equipment of the Hot Rolling Mill Roughing Train]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 69–77. (in Russ.)
10. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Shurygina G.V. [Limitations of the Shock Loads of the Electrical Equipment of the Continuous Sub-Trains of the Wide-Strip Hot-Rolling Mill]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on the Automatic Electric Drive]. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 305–309. (in Russ.)
11. Fomin G.G., Dubeikovskii A.V., Grinchuk P.S. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki* [Mechanization and automation of broadband hot rolling mills]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982. 128 p.
12. Voskaniants A.A. *Avtomatizirovannoe upravlenie protsessami prokatki: ucheb. posobie* [Automatic Control of the Rolling Process: Proc. Guide]. Moscow: MSTU N.E. Bauman, 2010. 85 p.
13. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. [Coordination of the Speed Modes of the Electric Drives of the Continuous Train of the Rolling Mill]. *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, 2013, vol. 1, pp. 98–103. (in Russ.)
14. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N., Kazakov I.V., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshin R.R. [Method of the Automated Control of the Strip Tension in the Roughing Train of the Continuous Rolling Mill]. Patent RF, no. 2494828, 2013.
15. Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. [Limitation of the Minimum Speeds of the 2,000 mm Rolling Mill Electric Drives at the Rolling Hollow Billets]. *Bulletin of the Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2011, no. 3, pp. 20–23. (in Russ.)
16. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. [Automated Speed Correction of the 2,000 mm Rolling Mill Electric Drives at the Rolling Hollow Billets]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 31–35. (in Russ.)
17. Khramshin V.R. [Ways of Compensation Static Deviations Speed the Electric Drive of the Broad-Strip Hot Rolling Mill]. *Elektrotekhnika*, 2013, no. 4, pp. 49–55. (in Russ.)
18. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin A.Ju., Golovin V.V., Shiljaev P.V. [Mathematical Modeling of Interconnected Electromechanical System of Stand Interspace of Hot-Strip Rolling]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 12–20. (in Russ.)
19. Khramshin V.R. [Developing and Implementation of Automated Electric Drive and Systems of Controlling the Process Parameters of Wide-Strip Hot Rolling Mill]. *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, 2012, no. 6, pp. 100–104. (in Russ.)
20. Khramshin V.R., Karandaev 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], *Metallurg*, vol. 59, no. 4, 2015, pp. 41–47. (in Russ.)

Received 15 January 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 3. Исследование способа согласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков / В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 47–57. DOI: 10.14529/power160108

FOR CITATION

Khramshin V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Shubin A.G., Loginov B.M. Mathematical Modelling of the Interrelated Electric and Mechanical Systems of Continuous Sub-Group of the Rolling Mill Stands. Part 3. Study of Way to Coordinate Linear Speeds of Edging and Horizontal Rolls. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 47–57. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160108