

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГРУППЫ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНОГО СТАНА. Часть 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В УНИВЕРСАЛЬНЫХ КЛЕТЯХ\*

А.А. Радионов<sup>1</sup>, А.С. Карандаев<sup>2</sup>, В.Р. Храмшин<sup>2</sup>, А.С. Евдокимов<sup>2</sup>,  
И.Ю. Андрюшин<sup>3</sup>, А.Н. Гостев<sup>3</sup>, А.Г. Шубин<sup>3</sup>, В.Р. Гасияров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск;

<sup>3</sup> ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск

Исследования повторных динамических процессов, возникающих в электромеханических системах вертикальных валков универсальных клетей прокатных станов при захвате полосы валками последовательно расположенных горизонтальных клетей, предложено выполнить с помощью математической модели, рассмотренной в части 1 данной статьи. В результате анализа осциллограмм переходных процессов токов и скоростей электроприводов горизонтальных и вертикальных валков универсальной клетки № 4 широкополосного стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат (ОАО «ММК»)) определены причины, вызывающие недопустимые динамические нагрузки. Основной причиной является несогласованность скорости выхода полосы из вертикальных валков и линейной скорости вращения горизонтальных валков. Представлены результаты математического моделирования данного динамического режима при начальных условиях, соответствующих реальным процессам на стане. С целью обобщения результатов выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных при прокатке более 90 полос различного сортамента. Установлена зависимость (близкая к линейной) отклонений тока электропривода вертикальных валков от относительного рассогласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков. На основании этого, с целью ограничения динамических нагрузок, обосновано формирование пропорционального управляющего воздействия на скорость электропривода горизонтальных валков. Показано, что на соотношение линейных скоростей значительное влияние оказывает статическая ошибка регулирования, возникающая в электроприводе с пропорциональным регулятором скорости. Представлены способы и технические решения, обеспечивающие ограничение динамических нагрузок за счет согласования скоростей валков универсальной клетки и компенсации ошибки регулирования скорости за счет ее увеличения перед захватом либо непосредственно в момент захвата полосы.

*Ключевые слова:* стан горячей прокатки, универсальная клеть, горизонтальные валки, вертикальные валки, автоматизированный электропривод, динамические нагрузки, математическое моделирование, экспериментальные исследования, способы управления.

## Введение

Наиболее эффективным методом исследования динамических нагрузок, возникающих в электромеханических системах универсальных клетей прокатного стана, является математическое моделирование. Это связано с тем, что в условиях интенсивного производства, как правило, может проводиться только пассивный эксперимент без вмешательства в технологический процесс и изменения настроек систем регулирования. В исследуемом случае это не позволяет дать обобщенную оценку влияния соотношения скоростей выхода полосы из валков предыдущей (вертикальной) клетки и окружной скорости валков последующей горизонтальной клетки на характер тока и соответственно момента при повторном динамическом процессе. Данный процесс возникает в электромеханических системах вертикальной клетки при захвате полосы горизонтальными валками и сопро-

вождается ударными нагрузками, значительно превышающими нагрузки при непосредственно захвате полосы [2]. Как известно, динамические перегрузки приводят к преждевременному износу оборудования и увеличению вероятности возникновения аварийных ситуаций.

В первой части статьи представлена математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем универсальных клетей непрерывной подгруппы черновой группы широкополосного стана 2000 ОАО «ММК» [1]. Наиболее подробно рассмотрена модель очага деформации, основанная на уравнении сохранения энергии при прокатке, предложенном В.Н. Выдриным [3], получившая развитие в работах [4, 5]. Применение этой модели позволяет наиболее точно описать процессы передачи кинетической энергии на вал электропривода предыдущей клетки в исследуемом динамическом режиме.

\* Часть 1 «Разработка математической модели» опубликована в предыдущем номере журнала [1].

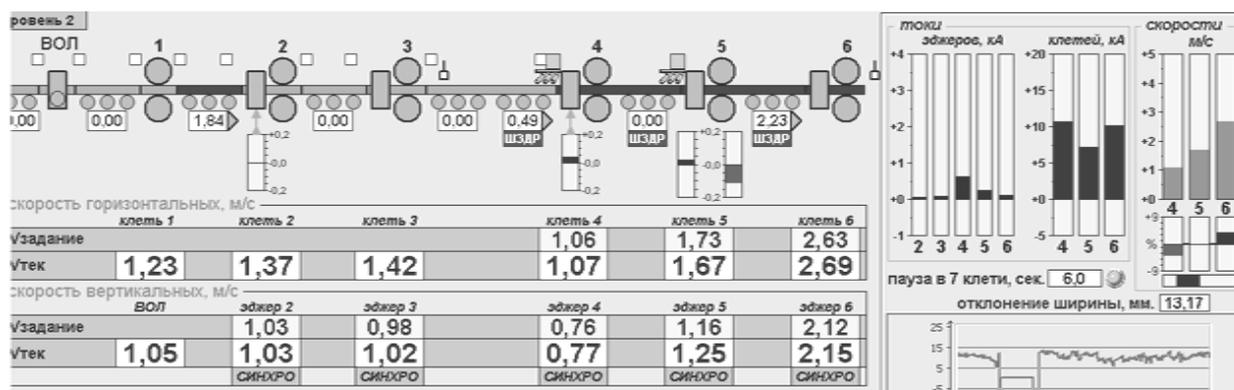


Рис. 1. Схема расположения клеток черновой группы стана 2000

## Постановка задачи

На рис. 1 представлен фрагмент технологической линии стана 2000, выделенный из основного экрана АСУ ТП черновой группы [6]. Непрерывная подгруппа черновой группы состоит из трех универсальных клеток № 4–6, содержащих приводные вертикальные и горизонтальные валки, взаимосвязанные в процессе прокатки через металл. Системы автоматического регулирования скорости электроприводов выполнены двухконтурными с пропорциональными регуляторами скорости и внутренними контурами тока.

Основной причиной, вызывающей ударные нагрузки в вертикальных валках, является мгновенный подпор, формирующийся в полосе во время ее захвата последующей горизонтальной клетью. Он воспринимается валками предыдущей клетки в виде дополнительного сопротивления. В ходе проведенных экспериментальных [2, 7] и теоретических [8–10] исследований выявлены следующие причины, вызывающие возникновение мгновенного подпора при захвате полосы горизонтальными валками:

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.

В подтверждение данных выводов на рис. 2 представлены осциллограммы переходных процессов токов и скоростей электроприводов горизонтальных и вертикальных валков клетки № 4. После захвата полосы горизонтальными валками начинается процесс совместной прокатки. Несогласованность линейных скоростей приводит к динамическому снижению скорости валков вертикальной клетки на 10 % от 0,733 до 0,66 м/с и трехкратному динамическому увеличению тока (от 370 до 1120 А). В горизонтальной клетке происходит сни-

жение скорости от 0,694 м/с до 0,652 м/с (на 6,1 %) и изменение тока от 240 А (холостой ход) до 10000 А (установившееся значение) с динамическим броском до 11 940 А, составляющим 19,4 %.

На рис. 2, б представлены аналогичные осциллограммы при обратном соотношении скоростей валков вертикальной и горизонтальной клеток: окружная скорость валков вертикальной клетки, равная скорости выхода полосы 0,661 м/с, ниже линейной скорости валков горизонтальной клетки 0,704 м/с. В результате после захвата полосы валками горизонтальной клетки возникает не динамический подпор, а переднее натяжение. Ток двигателя вертикальной клетки снижается в 1,9 раза от 1890 до 1000 А, очевидно, что аналогично изменяется момент на валу двигателя. Как следует из осциллограмм, в анализируемом случае «динамического удара» в клетки нет, после захвата полосы происходит разгон валков вертикальной клетки горизонтальной клетью.

Очевидно, что представленные результаты характеризуют частные случаи динамических процессов и не могут быть признаны исчерпывающими. Необходимы исследования с использованием разработанной математической модели, которые позволят дать оценку влияния соотношения (как положительного, так и отрицательного) скоростей валков вертикальной и горизонтальной клеток на показатели переходного процесса тока электропривода вертикальной клетки.

## Основная часть

На рис. 3 приведены расчетные кривые переходных процессов, аналогичные представленным на рис. 2, построенные по результатам математического моделирования. Значения скоростей холостого хода и нагрузок электроприводов вертикальных и горизонтальных валков клетки № 4 приняты по осциллограммам, полученным непосредственно на стане.

После входа полосы в вертикальные валки до ее захвата горизонтальными валками (рис. 3, а, промежуток времени  $t_1-t_2$ ) в течение 2 с осуществляется процесс свободной прокатки в вертикальных

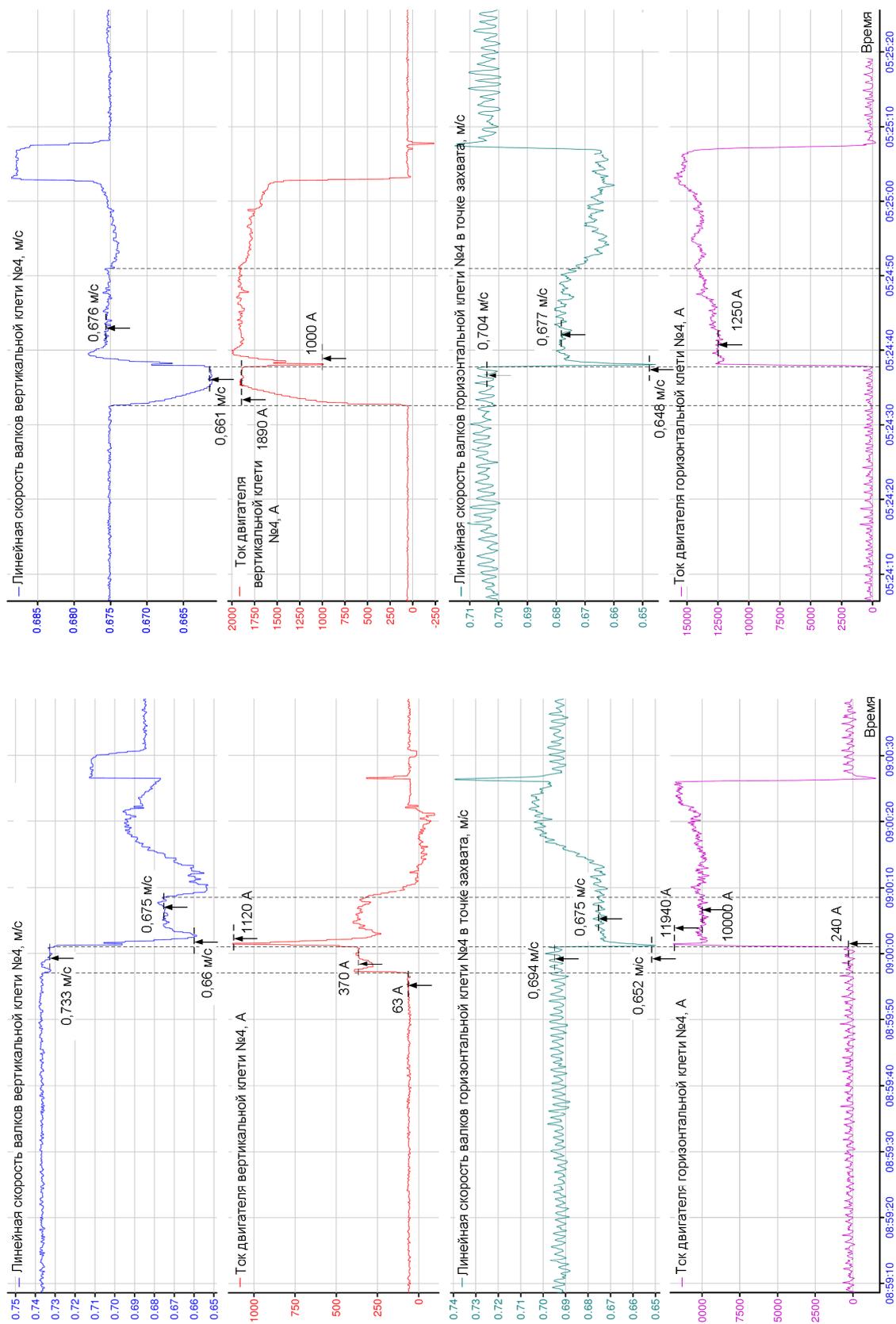
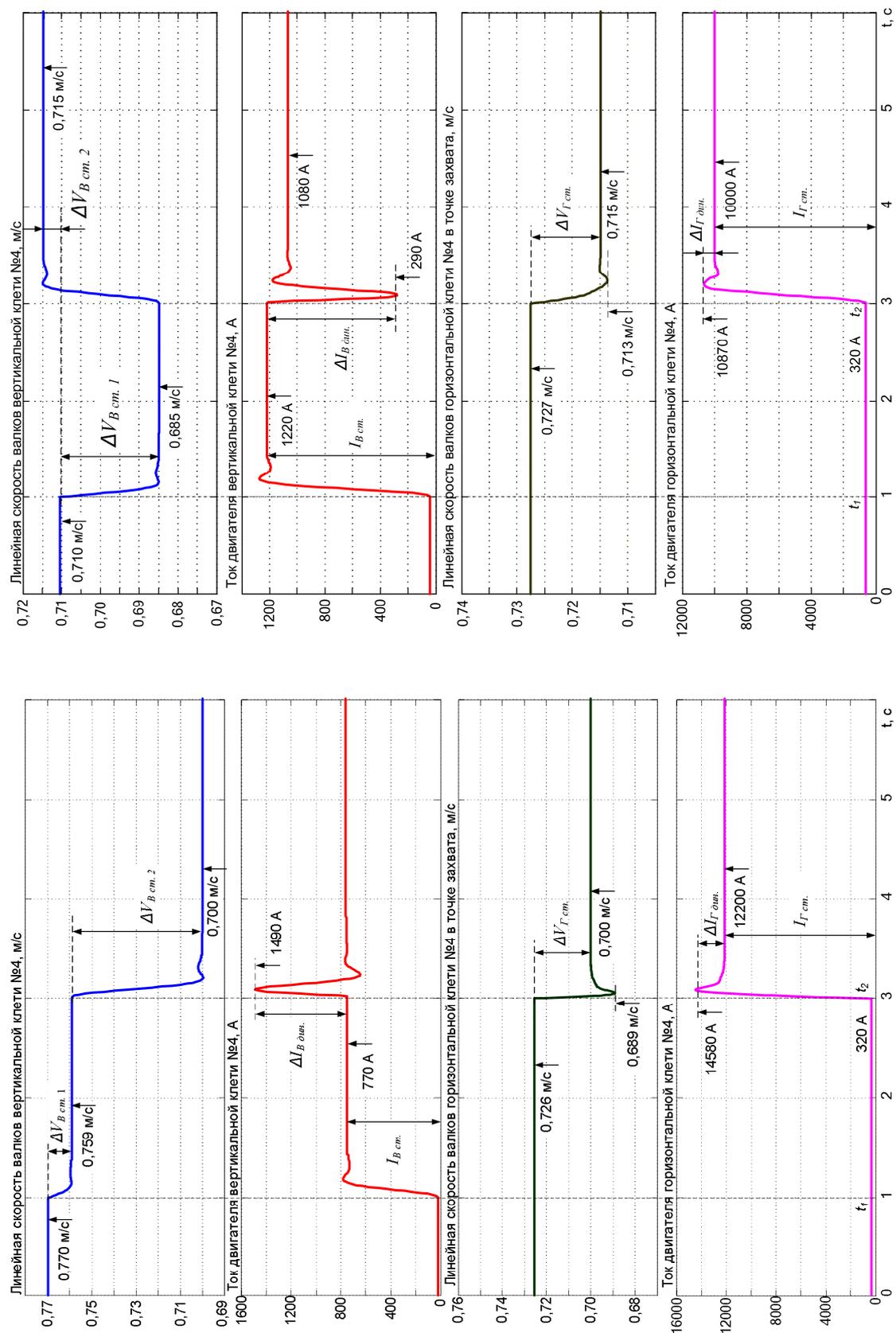
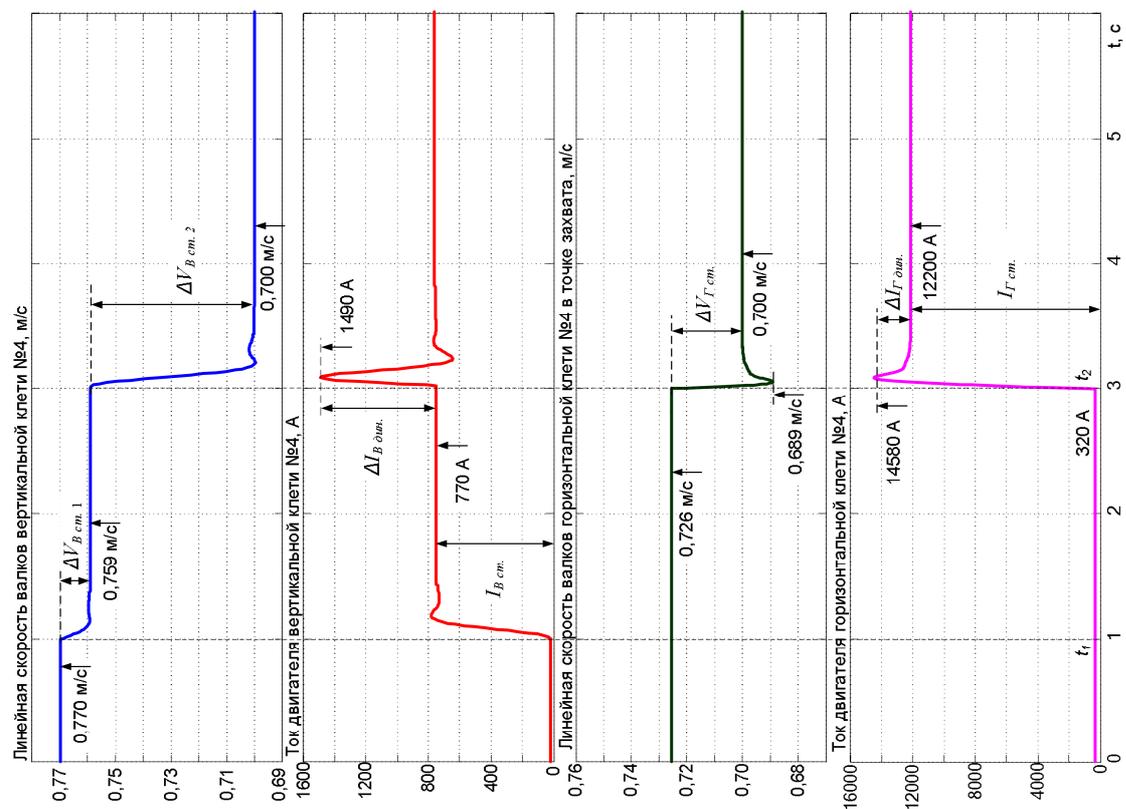


Рис. 2. Осциллограммы токов и скоростей горизонтальных и вертикальных валков клетки № 4 стана 2000



б)



а)

Рис. 3. Результаты моделирования переходных процессов

валках. Он сопровождается снижением линейной скорости  $V_B$  от 0,77 до 0,759 м/с, соответственно статическая ошибка регулирования скорости вертикальных валков  $\Delta V_{B\text{ст.1}}$  составляет 1,5 %. Изменение тока электропривода  $\Delta I_{B\text{ст}}$  от 62 до 770 А происходит практически без динамического пере-регулирования.

При совместной прокатке в вертикальных и горизонтальных валках (время  $t > t_2$ ) скорость  $V_B$  снижается до 0,7 м/с. Это происходит вследствие подпора вертикальных валков горизонтальными через металл. Статическая ошибка регулирования скорости  $\Delta V_{B\text{ст.2}}$  составляет 8,5 %. Несогласованность скоростей валков вертикальной и горизонтальной клетей приводит к динамическому броску тока  $\Delta I_{B\text{дин}}$  на 94 % (от 770 до 1490 А).

В горизонтальных валках в момент захвата происходят снижение скорости  $\Delta V_{Г\text{ст}}$  на 4,1 % (от 0,726 до 0,7 м/с) и изменение тока  $\Delta I_{Г\text{ст}}$  от 320 А (холостой ход) до 12 200 А (установившееся значение) с ударным увеличением до 14 580 А. Таким образом, динамическая составляющая тока  $\Delta I_{Г\text{дин}}$  достигает 20 %. В электроприводе постоянного тока аналогичным образом изменяется момент двигателя. Эксперименты показали, что его бросок при приложении нагрузки составляет 25–30 %.

Аналогичные переходные процессы для случая обратного соотношения скоростей валков вертикальной и горизонтальной клетей представлены на рис. 3, б. Характер процессов аналогичен характеру осциллограмм на рис. 2, б, конкретные численные значения указаны непосредственно на временных зависимостях.

На рис. 4 представлены расчетная кривая и экспериментальные данные, позволяющие выпол-

нить обобщенный анализ влияния относительного рассогласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков клетки № 4 на отклонения тока при повторном динамическом процессе. Скорость выхода полосы из вертикальных валков рассчитана без учета опережения и соответствует горизонтальной составляющей их линейной скорости. Это обосновано тем, что небольшие обжатия в вертикальных валках, предназначенные для снятия уширения и выравнивания боковых граней, практически не оказывают влияния на опережение металла. Относительные значения рассогласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков клетки № 4 и динамического тока при повторном динамическом процессе рассчитаны по формулам:

$$\Delta V_{\text{о.е.}} = \frac{V_{B\text{xx}} - V_{Г\text{лин.хх}}}{V_{B\text{xx}}}; \quad \Delta I_{\text{о.е.}} = \frac{\Delta I_{B\text{дин}}}{\Delta I_{B\text{ст}}},$$

где  $V_{B\text{xx}}$ ,  $V_{Г\text{лин.хх}}$  – линейные скорости вертикальных и горизонтальных валков в режиме холостого хода (обозначения токов приведены на рис. 3).

Значения динамических отклонений тока, показанные на рис. 4 точками, получены в результате осциллографирования координат при прокатке более 90 полос различного сортамента. Очевидно, что соотношения скоростей валков вертикальной и горизонтальной клетей в этих случаях изменялись случайным образом.

#### Обсуждение результатов исследований

Анализ расчетной кривой на рис. 4 позволяет сделать вывод о практически линейном характере зависимости отклонений тока от соотношения скоростей валков. Разброс экспериментальных

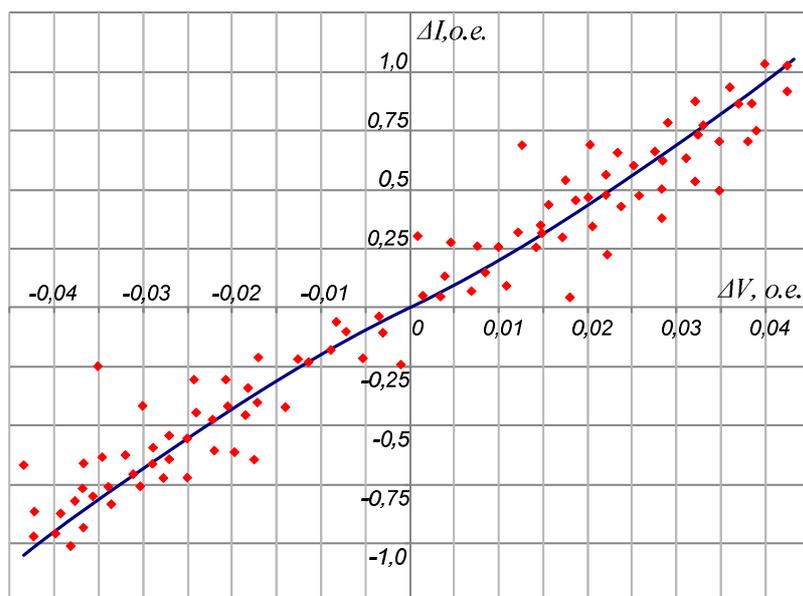


Рис. 4. График зависимости динамических отклонений тока при повторном переходном процессе от рассогласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков клетки № 4

данных объясняется тем, что на исследуемый динамический процесс, наряду с несоответствием скоростей валков смежных клетей, оказывают влияние многие факторы, определяющие условия захвата полосы. К ним относятся скорость входа металла в клеть, величина зазора валков, температура, толщина и форма переднего конца полосы и др. В связи с этим провести «чистый эксперимент» по оценке влияния рассогласования скоростей на динамический ток (момент) практически невозможно. Поэтому выполненное математическое моделирование дает наиболее достоверные результаты.

Анализ результатов моделирования подтверждает, что соотношение скоростей валков смежных клетей является главным фактором, определяющим величину отклонений тока при повторном динамическом процессе. Практически линейный характер зависимости позволяет сделать вывод о целесообразности формирования управляющего воздействия в систему электропривода горизонтальной клетки, пропорционального указанному соотношению скоростей. Пропорциональное регулирование целесообразно осуществлять независимо от знака рассогласования, т. е. независимо от того какой режим возникнет после захвата полосы валками горизонтальной клетки: натяжение или подпор.

Вместе с тем, анализ результатов исследований показал, что на соотношение скоростей вертикальных и горизонтальных валков помимо их заданных значений оказывает значительное влияние отклонение скорости валков горизонтальной клетки при совместной прокатке. Статическая ошибка регулирования скорости  $\Delta V_{Гст}$  валков горизонтальной клетки (рис. 3, а) после захвата полосы в момент времени  $t_2$  составляет около 3,5 % (скорость снижается от 0,726 до 0,7 м/с), аналогичное отклонение скорости имеет место на рис. 3, б. Эти отклонения соизмеримы с рассогласованием заданных скоростей, составляющим 5,7 % (на рис. 3, а: 0,77 м/с – скорость горизонтальных валков и 0,726 м/с – скорость вертикальных валков). Это подтверждает, что величина статической ошибки скорости после захвата полосы является вторым значимым фактором, определяющим характер повторного динамического процесса.

Следует констатировать, что статическая ошибка регулирования скорости в существующей однократно-интегрирующей системе зависит от величины прикладываемого момента и настройки замкнутого контура регулирования скорости [11]. Настройка регуляторов осуществляется таким образом, чтобы обеспечить максимально возможное быстрое действие контура скорости при полном отсутствии перерегулирования. Это объясняется тем, что даже небольшое перерегулирование осложняет процессы, протекающие при захвате полосы валками [12].

Математическая модель АСУ ТП черновой группы рассчитывает заданные значения скоро-

стей валков для каждой из прокатываемых полос. Они поступают в качестве заданий для систем автоматического регулирования скоростей электроприводов клетей. В ходе прокатки измеренные значения скорости используются моделью для адаптации проведенных предварительных расчетов. В процессе адаптации учету поддаются все составляющие скорости, внесенные в ходе прокатки: ручные коррекции, изменения скорости, температура и др. Однако статическая ошибка регулирования скорости под нагрузкой, не может быть учтена. При последующих пересчетах она вносит значительную погрешность регулирования. В результате управление от математической модели становится неэффективным [13].

Перечисленные недостатки потребовали разработки алгоритмов, направленных на снижение динамических нагрузок вертикальных валков универсальной клетки. С этой целью разработан способ согласования скоростей, согласно которому осуществляется регулирование угловой скорости горизонтальных валков пропорционально произведению угловой скорости вертикальных валков на отношение диаметров вертикальных и горизонтальных валков [14]. Коррекция осуществляется с учетом угла захвата и вытяжки металла в горизонтальных валках.

В [11, 15] рассмотрен способ и предложены технические решения, обеспечивающие компенсацию установившейся ошибки при применении пропорциональных регуляторов скорости. Это достигается за счет предварительного увеличения скорости (подразгона) валков горизонтальной клетки на величину установившейся ошибки  $\Delta V_{Гст}$  (рис. 3, а). Предложены два варианта управления:

- подразгон электроприводов клетей перед захватом полосы, при этом установившиеся скорости по клетям определяются заранее и задаются программно для каждого прокатываемого профиля;
- подразгон непосредственно после захвата с вычислением и дополнительной коррекцией скорости по параметрам, полученным при прокатке предыдущих полос.

В работах [16–18] представлены результаты исследований и доказана эффективность внедрения предложенных технических решений.

### Заключение

Задача исследования повторных динамических процессов в универсальных клетях прокатных станов является актуальной и, несмотря на относительную давность постановки, малоизученной. В ходе экспериментов, выполненных на стане 2000, показано, что в зависимости от соотношения скоростей горизонтальных и вертикальных валков возникают кратные динамические отклонения тока электропривода вертикальной клетки как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения относительно установившегося тока прокатки. На осно-

вании этого сделан вывод о возможности ограничения динамических нагрузок за счет автоматического согласования скоростей валков универсальных клетей.

Сложность проведения экспериментов и ограниченные возможности физического моделирования предопределили проведение исследований методами математического моделирования. В ходе таких исследований установлены причины возникновения ударных динамических нагрузок. Исследована взаимосвязь между динамическими отклонениями тока и соотношением скоростей валков последовательно расположенных клетей. Сделан вывод о возможности и целесообразности регулирования скорости валков горизонтальной клетки пропорционально разности скоростей выхода полосы из предыдущей вертикальной клетки и горизонтальной составляющей линейной скорости валков данной клетки.

Показано, что статическая ошибка регулирования скорости в двухконтурной однократно-интегрирующей системе также является фактором, негативно влияющим на величину динамического тока.

Обоснованы способы управления, обеспечивающие согласование скоростей электроприводов и компенсацию статической ошибки без применения пропорционально-интегральных регуляторов. Предложенные технические решения могут найти практическое применение в электроприводах клетей широкополосных и толстолистовых станов.

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

### Литература

1. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, И.Ю. Андрияшин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 59–73. DOI: 10.14529/power150108

2. Ограничение ударных нагрузок электрооборудования клетей непрерывной подгруппы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин 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.

3. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургия. – 1960. – 256 с.

4. Радионов, А.А. Автоматизированный электропривод совмещенного прокатно-волочильного проволочного стана: дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Радионов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «Маг-

нитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – 2009. – 332 с.

5. Радионов, А.А. Автоматизированный электропривод станов для производства стальной проволоки / А.А. Радионов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2007. – 311 с.

6. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клетей черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16, № 34 (251). – С. 35–41.

7. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 69–77.

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

9. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 47–53.

10. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 12–21.

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

12. Андрияшин, И.Ю. Экспериментальные исследования системы автоматической коррекции натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки / И.Ю. Андрияшин, П.В. Шляев, В.В. Головин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11, № 15 (148). – С. 51–59.

13. Технологические схемы управления электроприводами чистой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин и др. // Труды VII конгресса прокатчиков. – М., 2007. – Т. 1. – С. 71–75.

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

15. Пат. 2477187 Российская Федерация, МПК7 В 21 В 37/52. Способ автоматического управления процессом прокатки в непрерывной группе клетей / И.Ю. Андриюшин, В.В. Галкин, В.В. Головин и др. // БИМП. – 2013. – № 7.

16. Храмышин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук / В.Р. Храмышин. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 360 с.

17. *Speed and Load Modes of Rolling Hollow Billet at the Wide-Strip Rolling Mill* / A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin et al. // *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. – 2014. 5 p. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986841.

18. Храмышин, В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмышин // *Электротехника*. – 2013. – № 4. – С. 49–55. DOI: 10.3103/S1068371213040032

**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 «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; askaran@mail.ru.

**Храмышин 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.

**Евдокимов Алексей Сергеевич**, научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; evdmgtu84@mail.ru.

**Андриюшин Игорь Юрьевич**, канд. техн. наук, главный инженер Управления главного энергетика ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск; andryushin.iy@mmk.ru.

**Гостев Анатолий Николаевич**, электрик цеха ЛПЦ-10 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск; gostev\_an@mmk.ru.

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

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

*Поступила в редакцию 2 марта 2015 г.*

---

DOI: 10.14529/power150209

## 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

**A.A. Radionov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, radionovaa@susu.ac.ru,

**A.S. Karandaev**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, askaran@mail.ru,

**V.R. Khramshin**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, hvrmgn@gmail.com,

**A.S. Evdokimov**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, evdmgtu84@mail.ru,

**I.Yu. Andryushin**, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation, andryushin.iy@mmk.ru,

**A.N. Gostev**, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation, gostev\_an@mmk.ru,

**A.G. Shubin**, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation, shubin\_ag@mmk.ru

**V.R. Gasiyarov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, gasiiarovvr@susu.ac.ru

It was proposed to use the mathematical model considered in [1] for study of the repeated dynamical processes emerging within the electric and mechanical systems of the edging rolls of the universal mill stands at the strip gripping by rolls of the tandem horizontal stands. The analysis of the oscillograms representing transient processes of current and speeds of the electric drives of the horizontal and edging rolls installed at the universal stand No. 4 of the 2.000 mm wide-strip mill at OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works (OAO MMK) has helped to define reasons of the unallowable dynamical loads. The main reason is the incoordination of the speed of the strip leaving the edging stand rolls and linear rotation speed of the horizontal stand rolls. The paper provides results of the mathematical modelling of this dynamic mode under the starting conditions that correspond to the actual processes at the stand. To generalize the results, we compared designing and experimental data obtained at rolling of over 90 variable gauge strips. It has been proven that there is a (near-linear) dependence of current of the electric drive of the edging rolls on the related incoordination of the linear speeds of the edging and horizontal rolls. Based on this fact, it is justified to apply proportional control action on the speed of the electric drive of the horizontal rolls which provides dynamical load limitation. It has been shown that the relation of the linear speeds is greatly influenced by the steady-state error appearing in the electric drive with the proportional speed controller. The paper presents methods and technical solutions providing dynamic load limitation due to the coordination of the universal stand roll speeds and compensation of the speed control error by means of its increase before or immediately at the strip gripping.

*Keywords:* hot-rolling mill, continuous train, universal stand, strip, interrelated electromechanical systems, mathematical model, deformation zone, power interaction, tension, looping, automated electric drive, structure, conformity.

### References

1. Radionov A.A., Karandaev A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Shubin A.G. [Mathematical Modelling of the Interrelated Electric and Mechanical Systems of Inter-Stand Space of the Rolling Mill. 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. Karandaev A.S., Khrumshin 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]. *VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on the Automatic Electric Drive]. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 305–309. (in Russ.)
3. Vydrin V.N. *Dinamika prokatnykh stanov* [Dynamics of the Rolling Mills]. Sverdlovsk, Metallurgy, 1960, 256 p.
4. Radionov A.A. *Avtomatizirovannyi elektroprivod sovmeshchennogo prokatno-volochil'nogo provolochnogo stana* [Automated Electric Drive of the Combined Rolling and Drawing Rod Mill]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009. 332 p.
5. Radionov A.A. *Avtomatizirovannyi elektroprivod stanov dlya proizvodstva stal'noy provoloki* [Automated Electric Drive for Production of Steel Wire]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2007. 311 p.
6. Karandaev A.S., Khrumshin 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.)
7. Khrumshin 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.)
8. Karandaev A.S., Khrumshin 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.)
9. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. [Mathematical Modeling of Thyristor Structure with Switchable]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2010, no. 3, pp. 47–53. (in Russ.)
10. Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. [Mathematical Model of Interrelated Electrical Systems of Continuous Train of Wide Strip Rolling Mill]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 1, pp. 12–21. (in Russ.)
11. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khrumshin V.R. [Automated Speed Correction of the 2,000 mm Rolling Mill Electric Drives at the Rolling Hollow Billets]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 31–35. (in Russ.)
12. Andryushin I.Yu., Shiljaev P.V., Golovin V.V. [Experimental Study of the Automatic Correction of Tension Interstand Interval Broadband Hot Rolling Mill]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2009, vol. 18, no. 15, pp. 51–59. (in Russ.)
13. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shiljaev P.V. [Manufacturing Scheme of the Finishing Train Electric Drive Control of the Wide Strip Hot Rolling Mill]. *Trudy VII kongressa prokatchikov*. [Papers of the VII Millmen Congress]. Moscow, 2007, vol. 1. pp. 71–75. (in Russ.)

14. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N., Kazakov I.V., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Khrumshin 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. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Shiljaev P.V., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Khrumshin R.R. [Automatic Control Method of Rolling in the Continuous Train]. Patent RF, no. 2477187, 2013. (in Russ.)

16. Khrumshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Development of Electrotechnical Systems of Continuous Hot Rolling Mill Group when Expanding Assortment of Bands]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 360 p.

17. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin 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.

18. Khrumshin V.R. [Ways of Compensation Static Deviations Speed the Electric Drive of the Broad-Strip Hot Rolling Mill]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 4, pp. 49–55. (in Russ.) DOI: 10.3103/S1068371213040032

*Received 2 March 2015*

---

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть. 2. Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 67–76. DOI: 10.14529/power150209

### REFERENCE TO ARTICLE

Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin 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