

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГРУППЫ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНОГО СТАНА. Часть 1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ\*

А.А. Радионов<sup>1</sup>, А.С. Карандаев<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>

<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

Рассматриваются вопросы разработки математической модели взаимосвязанных клеток непрерывной подгруппы черновой группы широкополосного стана горячей прокатки. Обоснована задача исследования повторных динамических процессов, возникающих в электромеханических системах вертикальных валков универсальной клетки при захвате полосы валками последовательно расположенной горизонтальной клетки. Отмечено, что динамический момент в данном режиме может превышать установившийся момент прокатки в 2–2,5 раза. Основной причиной возникновения повторных ударных нагрузок является несогласованность скорости выхода полосы из валков вертикальной клетки и линейной скорости валков горизонтальной клетки. С целью исследования передачи кинетической энергии на вал двигателя предыдущей клетки обоснована целесообразность разработки уточненной математической модели очага деформации. Предложено разработать данную модель на основе уравнения закона сохранения энергии при прокатке. Представлена структурная схема математической модели взаимосвязанных электроприводов вертикальных и горизонтальных валков трехклетевой прокатной группы стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Представлены аналитические выражения для расчета мощности, подводимой к очагу деформации со стороны приводного двигателя валков, мощности, подводимой за счет переднего натяжения (подпора) и заднего подпора (натяжения), мощности, затрачиваемой на формоизменение проката и мощности трения скольжения. Для этого исследовано поведение металла в очаге деформации, представлены математические выражения изменения элементарных скоростей точек на поверхностях входного и выходного сечений. Приведены зависимости скольжения металла относительно валков и мощностей трения скольжения для зон опережения и отставания, полученные с учетом изменения сечения обрабатываемого металла и его сопротивления деформации. На основе полученных выражений построена структурная схема модели очага деформации. Представлены аналитические и операторные выражения для моделирования сил натяжения и подпора и структура модели, описывающей упругие свойства полосы в межклетевом промежутке. Приведена структура математической модели системы регулирования скорости электропривода, основанная на известных уравнениях якорной цепи двигателя постоянного тока. В результате сравнения переходных процессов координат электроприводов и параметров прокатки, полученных при моделировании и путем осциллографирования на стане, подтверждена адекватность разработанной модели исследуемому объекту. Представленная математическая модель рекомендуется для исследования силового взаимодействия электромеханических систем прокатного стана, а также исследования динамических режимов, возникающих при захвате полосы валками горизонтальных и вертикальных клеток.

*Ключевые слова:* стан горячей прокатки, непрерывная группа клеток, универсальная клетка, полоса, взаимосвязанные электромеханические системы, математическая модель, очаг деформации, силовая взаимосвязь, натяжение, подпор, автоматизированный электропривод, структура, адекватность.

## Введение

При прокатке полос в универсальных клетях толстолистового стана и черновой группы широкополосного стана горячей прокатки возникают ударные динамические нагрузки в электромеханических системах валков вертикальных клеток при захвате полосы валками последовательно расположенных горизонтальных клеток [1, 2]. Это связано с несогласованностью скорости выхода полосы из предыдущей вертикальной клетки и линейной скорости валков горизонтальной клетки. Причиной

несогласованности являются недостаточная точность вычисления и задания скоростных режимов. Кроме того, в двухконтурной системе регулирования скорости электроприводов клеток при изменении нагрузки возникают статическая и динамическая ошибки регулирования скорости, которые не контролируются и не регулируются [3, 4]. Мгновенный подпор, формирующийся в полосе во время ее захвата валками последующей клетки, воспринимается валками предыдущей клетки в виде дополнительного сопротивления. В результате

\*Ч. 2 «Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях» будет опубликована в следующем номере журнала.

## Электромеханические системы

в линии привода предыдущей клетки возникает повторный колебательный процесс, а максимальный момент сил упругости становится соизмеримым с пиковым моментом при собственно захвате полосы [5, 6].

Экспериментальные исследования динамических нагрузок универсальных клеток показали, что при захвате полосы горизонтальными валками максимальный момент в вертикальных валках может превышать установившийся момент прокатки в 2–2,5 раза. В [7] представлены характерные осциллограммы, полученные на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), подтверждающие данный вывод.

### Постановка задачи

Для исследования названного динамического режима необходима математическая модель, учитывающая передачу кинетической энергии на вал электродвигателя предыдущей клетки через очаг деформации. Для этого необходимо наиболее точное описание очага деформации, основанное на балансе затрачиваемых мощностей и законе сохранения энергии. При этом математическая модель, описывающая упругие свойства полосы, может быть принята упрощенной, основанной на законе Гука, согласно выражениям, предложенным Н.Н. Дружининым и Д.П. Морозовым [8]. Это обосновано тем, что в черновой группе клеток отсутствует автоматическое регулирование толщины посредством изменения межвалкового зазора, принцип которого рассмотрен в [9, 10]. Более точная математическая модель полосы в межклетевом промежутке исследована в [11, 12].

Математическое описание автоматизированных электроприводов клеток может быть разрабо-

вано без учета действия систем автоматического регулирования нулевого натяжения (САРНН) и автоматической коррекции скоростей электроприводов клеток. Это связано с тем, что динамические процессы при отработке мгновенного подпора опережаются только настройкой быстродействующей двухконтурной системы автоматического регулирования скорости, в то время как САРНН вступает в работу только после захвата полосы валками последующей горизонтальной клетки непрерывной подгруппы.

### Основная часть

#### Структура модели взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы черновой группы стана 2000

На рис. 1 показана непрерывная подгруппа черновой группы клеток № 4–6 стана 2000 ОАО «ММК». Универсальные клетки содержат приводные вертикальные валки (двигатели  $D_{4в}$ – $D_{6в}$ ) и горизонтальные валки, приводимые двигателями  $D_{4г}$ – $D_{6г}$ , взаимосвязанные в процессе прокатки через обрабатываемую полосу [13, 14].

Анализ физических процессов, происходящих в трехклетевой группе как взаимосвязанной электромеханической системе, позволяет с целью создания математического описания разбить его на следующие объекты: автоматизированные электроприводы, клетки (включая редукторы), очаги деформации, межклетевые промежутки. Причем если первые представляют собой различные технологические узлы и физические границы между ними легко определимы, то границы между очагами деформации и межклетевыми промежутками устанавливаются на поверхностях, все точки которых имеют скорости, равные скорости входа (выхода) металла в клеть [15, 16].

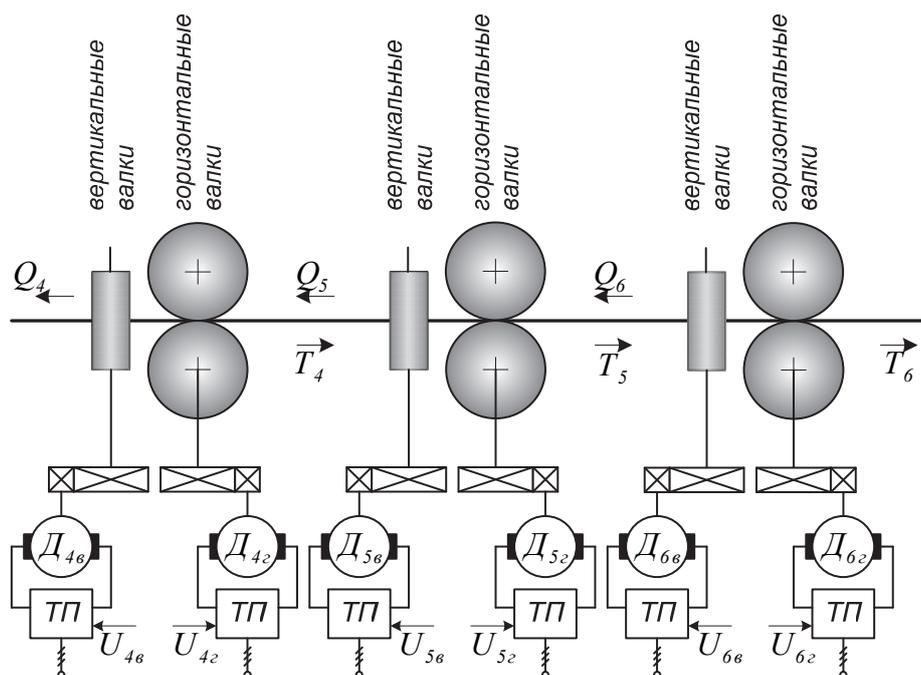


Рис. 1. Схема непрерывной трехклетевой прокатной группы

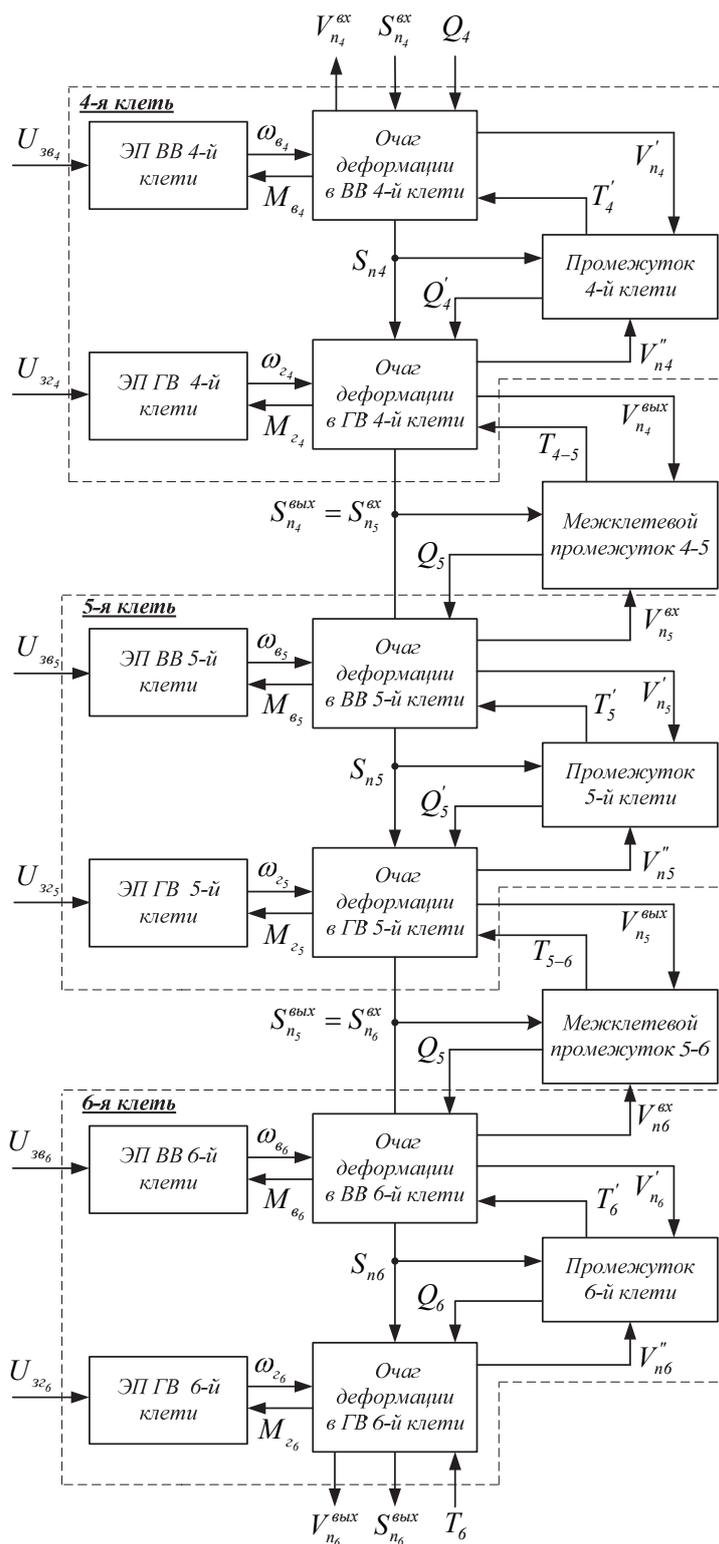


Рис. 2. Структурная схема математической модели взаимосвязанных электроприводов клеток № 4–6 стана 2000

Структурная схема комплексной математической модели взаимосвязанных электромеханических систем трехклетевой группы представлена на рис. 2. Структура содержит модели электроприводов (ЭП) вертикальных (ВВ) и горизонтальных валков (ГВ) клеток № 4, 5, 6 и модели поло-

сы как объекта управления. Расшифровка обозначений, принятых на рис. 2, приводится ниже при описании математических моделей данных объектов.

Модель полосы представлена блоками «Очаг деформации в валках  $i$ -й клетки», содержащими

математическое описание изменения давления и момента прокатки. В нее также входят блоки «Межклетевой промежуток ( $i - 1 - i$ )» и «Промежуток  $i$ -й клетки», включающие математическое описание упругих свойств полосы между горизонтальными валками смежных клетей и вертикальными и горизонтальными валками универсальной клетки. Как будет показано ниже, свойства полосы в этих промежутках описываются одинаковыми аналитическими зависимостями.

Модель имеет входные воздействия в виде напряжений управления на входах тиристорных электроприводов и шесть выходных координат: скорости полосы на выходе из вертикальных и горизонтальных валков, натяжения либо подпор в межклетевых промежутках и два возмущающих воздействия: заднее натяжение в первом очаге и переднее натяжение в последнем очаге деформации непрерывной подгруппы. В структуре модели содержатся логически связанные объекты, которые должны иметь входные и выходные координаты, согласующиеся между собой в количественных соотношениях. Далее рассматриваются математические описания отдельно каждого из этих объектов.

### Математическое описание очага деформации

Математическая модель очага деформации разработана на основе закона сохранения энергии, упрощенная формула которого для процесса прокатки предложена В.Н. Выдриным [17]:

$$N_{v_i} \pm N_{Q_i} \pm N_{T_i} = N_{\Phi_i} + N_{m_i}, \quad (1)$$

где  $N_v$  – мощность, подводимая к очагу деформации со стороны электропривода валков;  $N_Q$  – мощность, подводимая к очагу деформации подпором  $Q$  (знак « $\leftarrow$ ») либо натяжением (знак « $\rightarrow$ ») через задний конец проката;  $N_T$  – мощность, подводимая к очагу деформации тянущим усилием  $T$  (знак « $\rightarrow$ ») либо подпором (знак « $\leftarrow$ ») через передний конец проката;  $N_{\Phi}$  – мощность, затрачиваемая на формоизменение (вытяжку) металла;  $N_m$  – мощность сил трения скольжения на контактной поверхности полосы с валками;  $i$  – порядковый номер клетки.

В данном выражении не приняты во внимание мощность, расходуемая на упругую деформацию проката, мощность, затрачиваемая на создание дополнительных деформаций (сдвигов), обусловленных формой очага деформации, и другие виды мощностей (на изменение кинетической энергии проката и др.), удельный вес которых в балансе мощностей не превышает 2–3 % [18, 19].

Мощности, подводимые за счет переднего натяжения (подпора) и заднего подпора (натяжения), определяются согласно зависимостям [17, 18]

$$N_T = T \cdot V_n^{\text{ВЫХ}}; N_Q = Q \cdot V_n^{\text{ВХ}} = Q \cdot \frac{V_n^{\text{ВЫХ}}}{\mu}, \quad (2)$$

где  $V_n^{\text{ВХ}}$ ,  $V_n^{\text{ВЫХ}}$  – скорости проката на входе и выходе очага деформации;  $\mu$  – вытяжка при прокатке, определяемая выражением:

$$\mu = \frac{S_n^{\text{ВХ}}}{S_n^{\text{ВЫХ}}} = \frac{L_n^{\text{ВЫХ}}}{L_n^{\text{ВХ}}},$$

где  $S_n^{\text{ВХ}}$ ,  $S_n^{\text{ВЫХ}}$ ,  $L_n^{\text{ВХ}}$ ,  $L_n^{\text{ВЫХ}}$  – соответственно сечения и длины обрабатываемой полосы на входе в очаг деформации и на выходе из него.

Мощность, подводимая к очагу деформации от приводного двигателя, определяется как произведение элементарных сил трения  $\tau$ , направление которых совпадает с траекторией перемещения точек контактной поверхности, на окружную скорость валков  $V_v$ , просуммированное по поверхности  $S$  соприкосновения металла с валками:

$$N_v = \iint_S \tau(S) \cdot V_v(S) \cdot dS. \quad (3)$$

С учетом предположения о прямолинейном законе изменения ширины  $b$  и предела текучести металла вдоль очага деформации

$$\sigma = \frac{\sigma^{\text{ВХ}} + \sigma^{\text{ВЫХ}}}{2}, b = \frac{b^{\text{ВХ}} + b^{\text{ВЫХ}}}{2} \quad (4)$$

и отсутствия упругой деформации валков

$$R_v = \text{const}, V_v = \text{const} \quad (5)$$

выражение (3) принимает вид:

$$N_v = V_v \cdot R_v \cdot b \cdot \int_{\alpha} \tau \cdot d\alpha, \quad (6)$$

где  $R_v$  – радиус валков клетки;  $\alpha$  – текущее значение угла в очаге деформации (в пределах от 0 до  $\alpha_0$ , см. рис. 3).

Направление продольной силы трения  $\tau$  в очаге деформации изменяется. Согласно теории жестких концов, предложенной И.М. Павловым [20], скорости  $V_n^{\text{ВХ}}$  частиц входного сечения, как и скорости  $V_n^{\text{ВЫХ}}$  частиц выходного сечения очага деформации, равны между собой (см. рис. 3). При этом выполняется условие

$$V_n^{\text{ВХ}} < V_v < V_n^{\text{ВЫХ}}.$$

Очевидно, что в этом случае в очаге деформации имеют место две зоны, показанные на рис. 3 [18]. В первой – зоне отстаивания – скорость металла ниже окружной скорости валков, поэтому энергия в ней передается от валка к металлу. Во второй зоне – зоне опережения, наоборот, скорость металла выше окружной скорости валков, следовательно, энергия передается в обратном направлении (от металла к валкам). Существует некоторый центральный угол  $\gamma$ , определяющий линию на поверхности валков, в которой скорости металла и валка равны. Этот угол, как и указанную линию, принято называть критическим.

Данная схема построена для «классического» случая прокатки с передним натяжением и задним

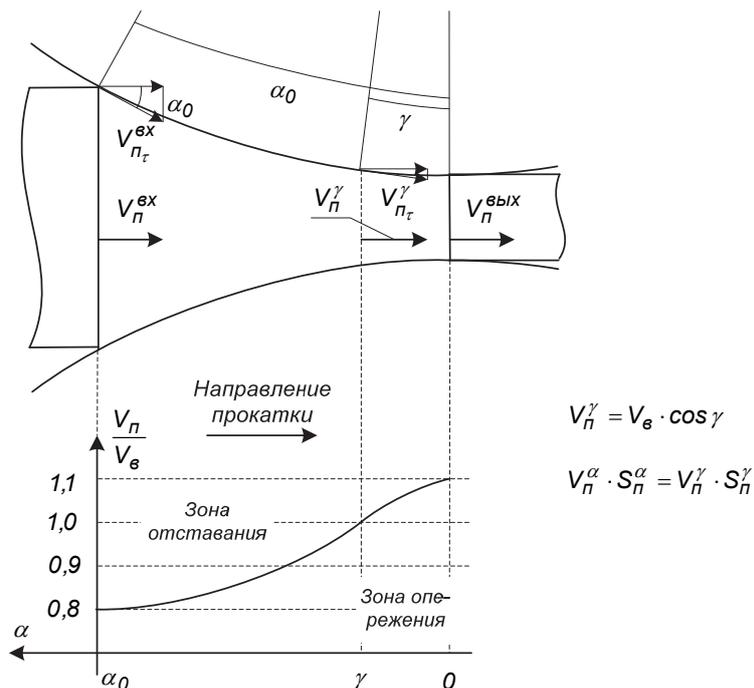


Рис. 3. Скольжение на поверхности полосы в очаге при равномерной деформации

подпором, возникающим вследствие отставания металла. Вместе с тем, представленные ниже выкладки справедливы для случая обратного распределения сил натяжения (подпора), возникающего при упомянутом выше повторном динамическом процессе. Отличия режимов натяжения и подпора должны быть учтены в конечной модели введением соответствующих знаков во взаимосвязях между блоками.

В зонах отставания и опережения продольные силы трения  $\tau'$  и  $\tau''$  направлены противоположно, поэтому выражение (6) для двух валков следует переписать в виде

$$N_B = 2 \cdot V_B \cdot R_B \cdot b \cdot \left( \int_0^{\alpha} \tau^I \cdot d\alpha - 2 \cdot \int_0^{\gamma} \tau^{II} \cdot d\alpha \right). \quad (7)$$

При условии, что

$$\tau = f \cdot \sigma, \quad f = \text{const}, \quad (8)$$

выражение (7) примет вид

$$N_B = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_B \cdot R_B \cdot b \cdot (\alpha_0 - 2 \cdot \gamma), \quad (9)$$

где  $\alpha_0$  – угол захвата;  $\sigma$  – сопротивление деформации;  $f$  – коэффициент трения.

Мощность формоизменения может быть получена путем дифференцирования зависимости Финка [17]:

$$N_\Phi = \frac{dA_\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot (\theta \cdot \sigma \cdot \ln \mu) = \sigma \cdot \frac{d\theta_{см}}{dt}. \quad (10)$$

где  $A_\Phi$  – работа, затрачиваемая на формоизменение проката;  $\theta$  – объем металла;  $\theta_{см}$  – смещенный объем при деформации.

В течение времени  $\Delta t$  через очаг деформации проходит объем металла, равный площади его

критической поверхности  $S_n^\gamma$  (поверхности внутри очага деформации, все точки которой имеют скорость, равную окружной скорости валков), умноженной на поступательную скорость частиц этой поверхности, соответствующей поступательной скорости валков в точке критического сечения  $V_B^\gamma$ :

$$\Delta \theta = S_n^\gamma \cdot V_B^\gamma \cdot \Delta t = S_n^\gamma \cdot V_B \cdot \cos \gamma \cdot \Delta t.$$

Площадь при принятом прямолинейном законе изменения ширины (рис. 4) определяется зависимостью [18]:

$$S_n^\gamma = b^\gamma \cdot h^\gamma = \left[ b^{BX} + \frac{b^{BЫX} - b^{BX}}{\alpha_0 / \gamma} \right] \times \left[ h^{BЫX} + 2 \cdot R_B \cdot (1 - \cos \gamma) \right]. \quad (11)$$

Указанный объем, определяемый размерами ( $S_n^\gamma$ ;  $V_n^\gamma \cdot \Delta t$ ), входит в очаг деформации, подвергается там конечной деформации  $\ln \mu$  и выходит из него с новыми размерами ( $S_n^{BЫX}$ ;  $V_n^{BЫX} \cdot \Delta t$ ). Таким образом, смещенный объем за время  $\Delta t$  будет определен как

$$\Delta \theta_{см} = \Delta \theta \cdot \ln \mu = S_n^\gamma \cdot V_B \cdot \cos \gamma \cdot \ln \mu \cdot \Delta t,$$

или при условии, что  $\Delta t \rightarrow 0$ ,

$$d\theta_{см} = S_n^\gamma \cdot V_B \cdot \cos \gamma \cdot \ln \mu \cdot dt. \quad (12)$$

После подстановки (12) в (10) получено выражение для определения мощности формоизменения при прокатке:

$$N_\Phi = \sigma \cdot S_n^\gamma \cdot V_B \cdot \cos \gamma \cdot \ln \mu. \quad (13)$$

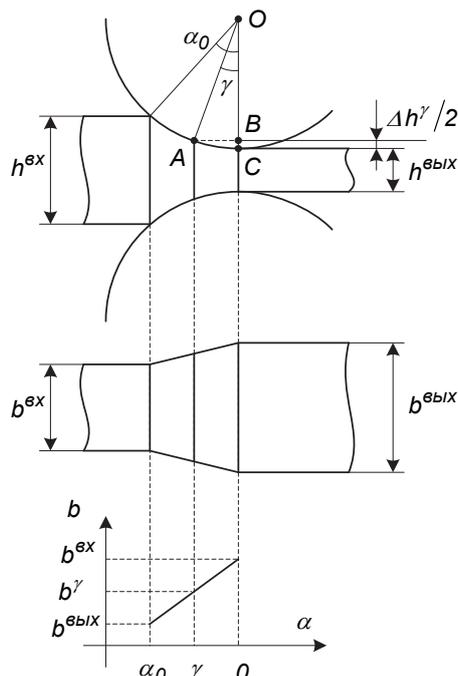


Рис. 4. К определению площади критической поверхности

$$\cos \gamma = \frac{OB}{R} \Rightarrow OB = R_{\text{e}} \cdot \cos \gamma$$

$$\frac{\Delta h^{\gamma}}{2} = BC = R_{\text{e}} - OB =$$

$$= R_{\text{e}} - R_{\text{e}} \cdot \cos \gamma = R_{\text{e}} \cdot (1 - \cos \gamma)$$

$$h^{\gamma} = h^{\text{blx}} + 2 \cdot \Delta h^{\gamma} =$$

$$= h^{\text{blx}} + 2 \cdot R_{\text{e}} \cdot (1 - \cos \gamma)$$

$$b^{\gamma} = b^{\text{ex}} + \frac{b^{\text{blx}} - b^{\text{ex}}}{\alpha_0 / \gamma}$$

Мощность трения скольжения на контактной поверхности  $N_m$  также следует определять с учетом зон отставания и опережения. В общем случае для двух валков величина трения скольжения может быть найдена по выражению:

$$N_m = 2 \cdot \iint_S \tau(S) \cdot \Delta V(S) \cdot dS,$$

или с учетом (4), (5), (8)

$$N_m = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot R_{\text{в}} \cdot b \cdot \int_{\alpha} \Delta V \cdot d\alpha. \quad (14)$$

Скорость скольжения металла относительно валков определяется зависимостями:

– для зоны отставания

$$\Delta V(\alpha) = V_{\text{в}} - V_n^{\alpha} = \left( 1 - \frac{S_n^{\gamma} \cdot \cos \gamma}{S_n^{\alpha} \cdot \cos \alpha} \right) \cdot V_{\text{в}}; \quad (15)$$

– для зоны опережения

$$\Delta V(\alpha) = V_n^{\alpha} - V_{\text{в}} = \left( \frac{S_n^{\gamma} \cdot \cos \gamma}{S_n^{\alpha} \cdot \cos \alpha} - 1 \right) \cdot V_{\text{в}}, \quad (16)$$

где  $S_n^{\alpha}$ ,  $V_n^{\alpha}$  – площадь поверхности соприкосновения и поступательная скорость валков в точке, соответствующей текущему значению угла  $\alpha$ .

При подстановке (15) и (16) в (14) получаем выражения мощностей трения скольжения:

– для зоны отставания

$$N_m^I = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_{\text{в}} \cdot R_{\text{в}} \cdot b \cdot \int_{\gamma}^{\alpha_0} \left( 1 - \frac{S_n^{\gamma} \cdot \cos \gamma}{S_n^{\alpha} \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha;$$

– для зоны опережения

$$N_m^{II} = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_{\text{в}} \cdot R_{\text{в}} \cdot b \cdot \int_0^{\gamma} \left( 1 - \frac{S_n^{\gamma} \cdot \cos \gamma}{S_n^{\alpha} \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha;$$

– для полной мощности трения

$$N_m = N_m^I - N_m^{II} = 2 \cdot f \cdot \sigma \cdot V_{\text{в}} \cdot R_{\text{в}} \cdot b \times$$

$$\times \left[ \int_{\gamma}^{\alpha_0} \left( 1 - \frac{S_n^{\gamma} \cdot \cos \gamma}{S_n^{\alpha} \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha - \right.$$

$$\left. - \int_0^{\gamma} \left( 1 - \frac{S_n^{\gamma} \cdot \cos \gamma}{S_n^{\alpha} \cdot \cos \alpha} \right) \cdot d\alpha \right]. \quad (17)$$

При условии постоянства угловой скорости валков на протяжении всего очага деформации с учетом соотношения момента и мощности  $M = \frac{N}{\omega}$

выражения (1), (2), (13), (17) для  $i$ -й клетки можно представить в виде:

$$M_{\text{в}i} = M_{Q_i} - M_{T_i} + M_{\Phi_i} + M_{m_i}, \quad (18)$$

$$M_{T_i} = \frac{T_i \cdot V_{n_i}^{\text{в}i\text{л}x}}{\omega_{\text{в}i}}, \quad (19)$$

$$M_{Q_i} = \frac{Q_i \cdot V_{n_i}^{\text{в}i\text{л}x}}{\omega_{\text{в}i}}, \quad (20)$$

$$M_{\Phi_i} = \sigma_i \cdot S_{n_i}^{\gamma} \cdot R_{\text{в}i} \cdot \cos \gamma_i \cdot \ln \mu_i, \quad (21)$$

$$M_{m_i} = 2 \cdot f_i \cdot \sigma_i \cdot R_{\text{в}i}^2 \cdot b_i \times$$

$$\times \left[ \int_{\gamma_i}^{\alpha_{0i}} \left( 1 - \frac{S_{n_i}^{\gamma} \cdot \cos \gamma_i}{S_{n_i}^{\alpha} \cdot \cos \alpha_i} \right) \cdot d\alpha_i + \right.$$

$$\left. + \int_0^{\gamma_i} \left( \frac{S_{n_i}^{\gamma} \cdot \cos \gamma_i}{S_{n_i}^{\alpha} \cdot \cos \alpha_i} - 1 \right) \cdot d\alpha_i \right], \quad (22)$$

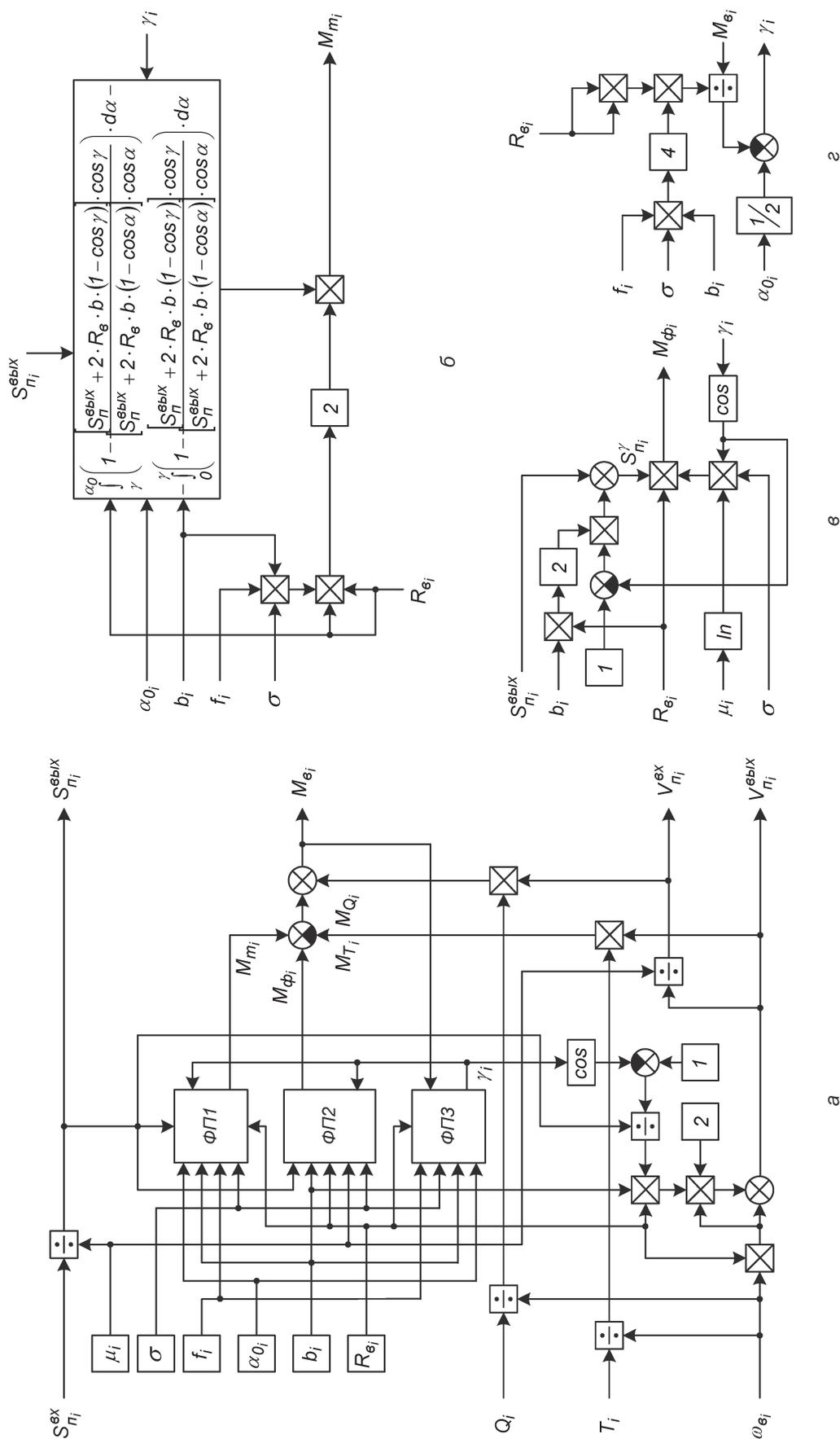


Рис. 5. Структурная схема математической модели очага деформации: а – укрупненная структурная схема; б, в, г – структурные схемы функциональных преобразователей ФП1, ФП2 и ФП3 соответственно

где площадь в произвольном сечении (в том числе нейтральном) может быть найдена из (11) при пренебрежении уширением:

$$S_{n_i}^{\alpha} = S_{n_i}^{\text{ВЫХ}} + 2 \cdot R_{b_i} \cdot b_i \cdot (1 - \cos \alpha_i), \quad (23)$$

$$S_{n_i}^{\gamma} = S_{n_i}^{\text{ВЫХ}} + 2 \cdot R_{b_i} \cdot b_i \cdot (1 - \cos \gamma_i), \quad (24)$$

где  $S_{n_i}^{\text{ВХ}}$ ,  $S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}$  – площади поперечного сечения полосы на входе и выходе  $i$ -го очага деформации.

Угол нейтрального сечения может быть определен по зависимости (9):

$$\gamma_i = \frac{\alpha_{0i}}{2} - \frac{M_{b_i}}{4 \cdot f_i \cdot \sigma_i \cdot R_{b_i}^2 \cdot b_i}. \quad (25)$$

Скорость металла на выходе из клетки определяется угловой скоростью вращения валков и зависит от величины критического угла

$$V_{n_i}^{\text{ВЫХ}} = \omega_{b_i} \cdot R_{b_i} + \frac{2 \cdot \omega_{b_i} \cdot R_{b_i}^2 \cdot b_i}{S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}} \cdot (1 - \cos \gamma_i). \quad (26)$$

Скорость металла на входе в клеть:

$$V_{n_i}^{\text{ВХ}} = \frac{V_{n_i}^{\text{ВЫХ}}}{\mu_i}. \quad (27)$$

Изменения сечения обрабатываемого металла и его сопротивления деформации могут быть определены как:

$$S_{n_i}^{\text{ВЫХ}} = \frac{S_{n_i}^{\text{ВХ}}}{\mu_i}, \quad (28)$$

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} \cdot \sqrt[4]{\mu_i}, \quad (29)$$

$$\sigma_{\text{ср}i} = \frac{\sigma_{i-1} + \sigma_i}{2}. \quad (30)$$

На рис. 5 приведена структурная схема математической модели очага деформации, составленная по уравнениям (18)–(30). Функциональные преобразователи ФП1...ФП3 реализуют зависимости (22), (21) и (25) соответственно. Представленная математическая модель наиболее точно определяет взаимосвязь между четырьмя входными и четырьмя выходными координатами, представленными на рис. 2.

## Математическая модель полосы в межклетевом промежутке

Изменение свойств полосы на участках между очагами деформации поясняется с помощью рис. 6. Вследствие несоответствия мгновенных значений скоростей выхода полосы из предыдущей клетки и входа в последующую клеть возникает натяжение (подпор). Под действием этой силы полоса упруго деформируется: при натяжении – удлиняется и утончается, при подпоре – укорачивается и уширяется. При этом упругая деформация может быть описана интегральными уравнениями [8]:

$$T_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}}{L_{T_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_{(i+1)}}^{\text{ВХ}} - V_{n_i}^{\text{ВЫХ}}) \cdot dt - T_{\text{нач}i}, \quad (31)$$

$$Q_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВХ}}}{L_{Q_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_i}^{\text{ВХ}} - V_{n_{(i-1)}}^{\text{ВЫХ}}) \cdot dt - Q_{\text{нач}i}, \quad (32)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $L_{T_i}$ ,  $L_{Q_i}$  – длины участков полосы, на которых действуют силы  $T_i$  и  $Q_i$ ;  $T_{i\text{нач}}$ ,  $Q_{i\text{нач}}$  – начальные переднее и заднее натяжения.

Дифференцируя зависимости (31), (32) и переходя к операторным изображениям, получаем:

$$p \cdot T_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}}{L_{T_i}} \cdot (V_{n_{(i+1)}}^{\text{ВХ}} - V_{n_i}^{\text{ВЫХ}}), \quad (33)$$

$$p \cdot Q_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВХ}}}{L_{Q_i}} \cdot (V_{n_i}^{\text{ВХ}} - V_{n_{(i-1)}}^{\text{ВЫХ}}), \quad (34)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования по времени.

Согласно этим выражениям в условиях свободной прокатки  $T_i = Q_{(i+1)}$ . При возникновении натяжения  $T_i = Q_{(i+1)} > 0$ , при подпоре  $T_i = Q_{(i+1)} < 0$ .

Влияние вертикальных валков на процесс формирования межклетевого натяжения и подпора значимо, но невелико, поскольку мощность уста-

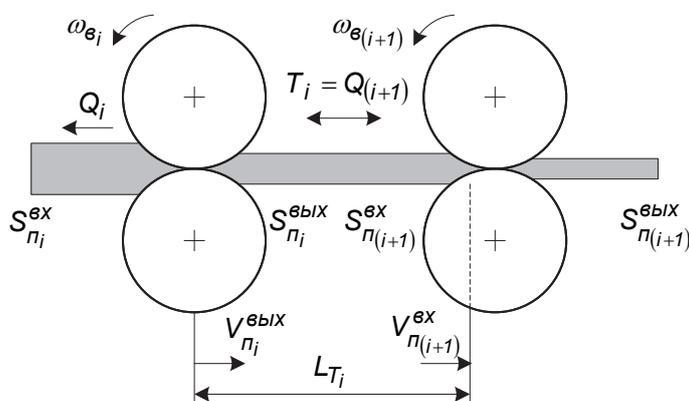


Рис. 6. Расчетная схема межклетевого промежутка

новленных электродвигателей меньше мощности двигателей приводов горизонтальных валков более чем в 50 раз. Влияние на натяжение (подпор) несогласованности окружной скорости вертикальных валков может быть учтено выражением

$$\Delta T_i = \Delta Q_{(i+1)} = \frac{M_{B_{\Sigma}} - M_{xx_{\Sigma}} - M_{деф_{\Sigma}}}{R_{B_{\Sigma}}}, \quad (35)$$

где  $M_{B_{\Sigma}}$  – момент на бочке вертикального валка (эджера);  $M_{xx_{\Sigma}}$  – момент холостого хода;  $M_{деф_{\Sigma}}$  – момент, необходимый для деформации металла в вертикальных валках;  $R_{B_{\Sigma}}$  – радиус вертикальных валков.

На рис. 7 приведена структурная схема динамической модели межклетевого промежутка, составленная по уравнениям (33)–(35). Она наглядно представляет взаимосвязь между тремя входными, одной выходной координатами и одним возмущающим воздействием.

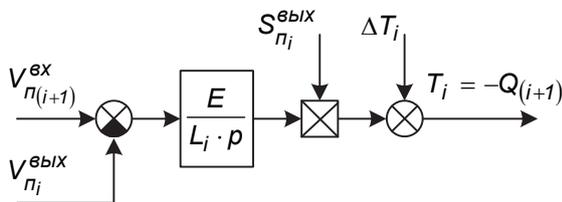


Рис. 7. Структурная схема математической модели межклетевого промежутка

Статический момент, создаваемый электродвигателем клетки, может быть определен как сумма момента на бочке валков  $M_{B_i}$ , идущего на деформацию металла, и момента, необходимого для преодоления сил трения механизма  $M_{xx_i}$ , приведенного к валу двигателя. В этом случае при пренебрежении упругими свойствами поведение редуктора описывается системой операторных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M_{c_i}(p) &= \frac{M_{B_i}(p)}{j_{ред_i}} + M_{xx_i}(p) \\ \omega_{B_i}(p) &= \frac{\omega_{дв_i}(p)}{j_{ред_i}} \end{aligned} \right\},$$

где  $j_{ред_i}$  – передаточное число редуктора (для понижающего редуктора  $j_{ред_i} > 1$ );  $M_{c_i}$  – момент сил статического сопротивления, приведенный к валу двигателя;  $\omega_{дв_i}$  – угловая скорость двигателя  $i$ -го валка.

#### Математическая модель системы регулирования скорости электропривода

Модель каждого межклетевого промежутка включает модели электроприводов горизонтальных и вертикальных валков в замкнутых двухконтурных системах однозонного регулирования скорости. Поскольку структуры и настройки систем

управления этих электроприводов идентичны, ниже приводится описание модели якорной цепи, общей для обеих групп электроприводов. Данная модель описывается известной системой операторных уравнений [21]:

$$\begin{cases} E_{di} = \frac{k_{mni}}{T_{\mu i} p + 1} u_{yi}; \\ E_{di} = E_{дв_i} + R_{\Sigma i} I_{\Sigma i} (T_{\Sigma i} p + 1); \\ M_i = k\Phi_{\Sigma i} I_{\Sigma i}; \\ E_{дв_i} = k\Phi_{\Sigma i} \omega_i; \\ M_i - M_{c_i} = J_{\Sigma i} p \omega_i, \end{cases} \quad (36)$$

где  $E_d$  и  $E_{дв}$  – ЭДС тиристорного преобразователя (ТП) и двигателя;  $k_{mn}$  и  $T_{\mu}$  – коэффициент усиления и постоянная времени ТП;  $u_y$  – напряжение управления ТП;  $R_{\Sigma}$  и  $T_{\Sigma}$  – эквивалентные активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи;  $M$  и  $M_c$  – моменты двигателя и статических сопротивлений, приведенные к валу двигателя;  $I_{\Sigma}$  – ток якорной цепи;  $J_{\Sigma}$  – суммарный приведенный момент инерции;  $\Phi$  – поток возбуждения;  $k$  – конструктивная постоянная двигателя.

Структурная схема математической модели двухконтурной системы автоматического регулирования скорости электропривода, соответствующая системе уравнений (36), представлена на рис. 8. Синтез регуляторов тока и скорости для каждого электропривода выполнен по известной методике синтеза систем подчиненного регулирования [22].

Блок переключения (БП) введен в структуру электропривода для моделирования разработанного способа ограничения динамических нагрузок в электромеханических системах универсальной клетки [7, 23]. С его помощью запоминается среднее значение тока свободной прокатки, при входе полосы в последующую клетку осуществляется размыкание контура регулирования скорости и запомненное значение тока подается на вход регулятора тока.

Преимуществом разработанной модели, является то, что она может быть применена для исследования динамических режимов в электромеханических системах универсальных клеток независимо от рода тока электропривода. Так, для исследования электроприводов переменного тока вместо модели, представленной на рис. 8, в структуру модели на рис. 2 (блоки «ЭП ВВ  $i$ -й клетки» и «ЭП ГВ  $i$ -й клетки» должны быть включены модели замкнутых двухконтурных систем регулирования скорости асинхронного либо синхронного двигателей, рассмотренные, например, в [24, 25].

#### Оценка адекватности математической модели

Адекватность разработанной математической модели исследуемому объекту оценивалась по результатам сравнения переходных процессов

## Электромеханические системы

координат электроприводов и параметров прокатки, полученных при моделировании и путем осциллографирования на стане 2000.

При моделировании приняты параметры прокатки полосы из сляба шириной 1600 мм, марка стали 08Ю, экспериментальное исследование прокатки которого проводилось на стане. Толщина полосы на входе в клеть № 4 – 120 мм, обжатия в клетях № 4 – 40 мм (33 %), в клетях № 5 – 30 мм (38 %), в клетях № 6 – 20 мм (40 %). Скорости полосы при свободной прокатке на выходах клетей № 4, 5 и 6: 1,05; 1,91 и 3,66 м/с соответственно [3, 26].

Характерные осциллограммы переходных процессов, полученные экспериментальным способом

для электроприводов горизонтальных валков клетки № 4, представлены на рис. 9, а. На рис. 9, б показаны аналогичные переходные процессы, полученные расчетным путем с использованием разработанной математической модели. На осциллограммах и расчетных кривых указаны фиксированные параметры, по которым проводилось сравнение данных в характерных точках. Для других координат электромеханических систем межклетевого промежутка адекватность оценивалась аналогично.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных, представленных на рис. 9, позволяют сделать вывод, что в большинстве характерных точек относительная погрешность

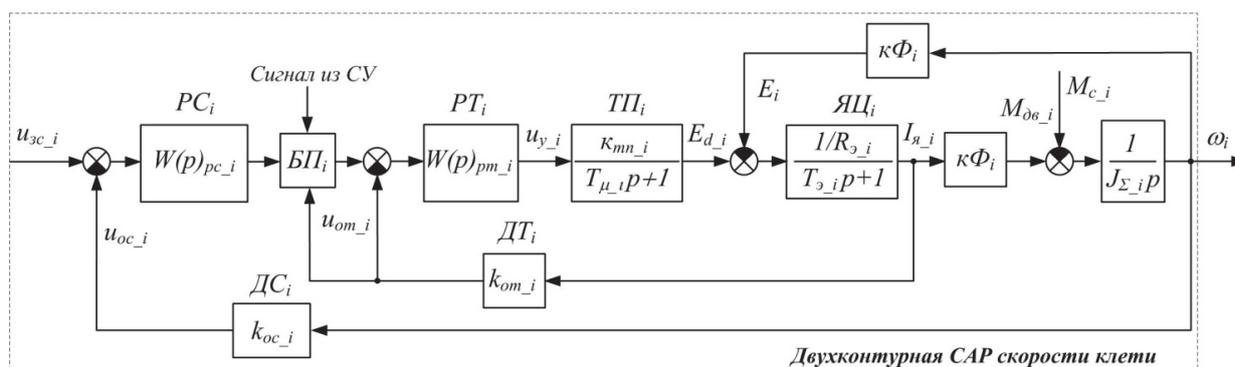
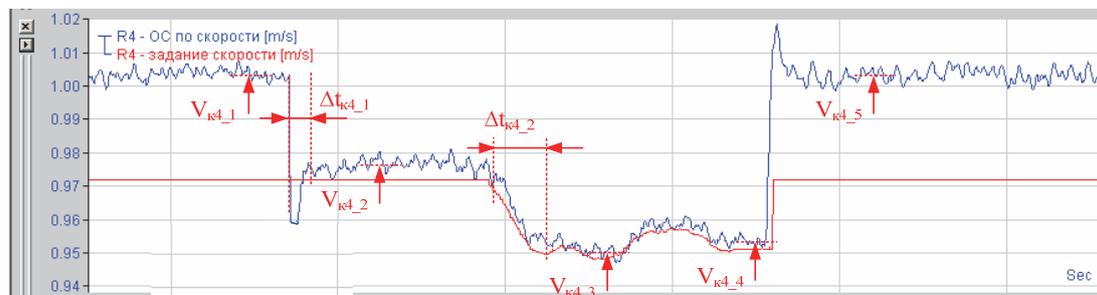
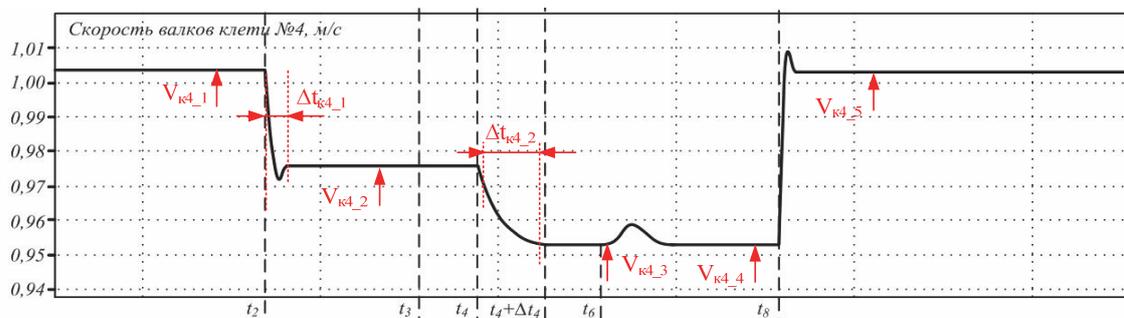


Рис. 8. Структура математической модели электропривода  $i$ -й клетки как объекта управления: ЯЦ – якорная цепь; РТ – регулятор тока с передаточной функцией  $W(p)_{pm}$ ; РС – регулятор скорости с передаточной функцией  $W(p)_{pc}$ ; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости; БП – блок переключения;  $k_{от}$ ,  $k_{ос}$  – коэффициенты датчиков;  $u_{от}$ ,  $u_{ос}$  – напряжения обратных связей по току и скорости



а



б

Рис. 9. Оценка адекватности математической модели по скорости горизонтальных валков клетки № 4

не превышает 5 %. Такие расхождения находятся в пределах погрешности измерений и являются допустимыми при моделировании сложного взаимосвязанного объекта. Аналогичный анализ адекватности математической модели выполнен по скорости вертикальных валков клетки № 4, результаты представлены в [27].

### Заключение

Ударное изменение нагрузки, возникающее в электромеханической системе вертикальных валков при захвате полосы горизонтальными валками универсальной клетки, представляет собой сложный динамический процесс, исследование которого целесообразно выполнить методами математического моделирования. Разработанная математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем трехклетевой непрерывной группы прокатного стана позволяет наиболее точно исследовать процесс передачи кинетической энергии через очаг деформации.

Достоверное математическое описание силовой взаимосвязи электроприводов смежных горизонтальных и вертикальных клетей позволяет анализировать причины отклонений натяжения либо возникновения подпора в межклетевых промежутках. Это обеспечит возможность исследования усовершенствованных алгоритмов регулирования нулевого натяжения [28, 29].

Модель рекомендуется для анализа динамических режимов, возникающих в электроприводах универсальных клетей при управляющих и возмущающих воздействиях. Применение модели также целесообразно при исследовании разработанного способа снижения динамических нагрузок в черновой группе клетей широкополосного стана горячей прокатки [1, 23].

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

### Литература

1. Ограничение ударных нагрузок электрооборудования клетей непрерывной подгруппы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрюшин и др. // Труды VIII Международ. (XIX Всерос.) конф. по автоматизиров. электроприводу АЭП-2014: в 2 т. – Саранск. Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 305–309.

2. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, А.А. Радионон и др. // Вестник ИГЭУ. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Вып. 1. – С. 98–103.

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

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

5. Большаков, В.И. Развитие идей С.Н. Кожевникова в области исследования динамики прокатных станов / В.И. Большаков, В.В. Веренев // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. – Днепропетровськ: ИЧМ НАН України, 2006. – Вып. 12. – С. 245–252.

6. Путники А.Ю., Веренев В.В. Модель динамического взаимодействия смежных черновых клетей широкополосного стана при непрерывной прокатке / А.Ю. Путники, В.В. Веренев // Металл и литье Украины. – 2002. – № 12. – С. 26–30.

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

8. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н.Н. Дружинин. – М.: Металлургия, 1967. – 336 с.

9. Совершенствование системы автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмин и др. // Труды VII Международ. (XVIII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизиров. электроприводу, Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2012. – С. 556–560.

10. Храмин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ, 2013. – 360 с.

11. Автоматическая коррекция толщины голового участка полосы в гидравлической системе автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / В.В. Галкин, С.А. Петряков, А.С. Карандаев, В.Р. Храмин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 46–50.

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

13. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, А.А. Радионон и др. // Труды VII Международ. (XVIII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизиров. электроприводу, Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2012. – С. 652–657.

14. 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.
15. Басков, С.Н. Энергосиловые параметры приводов и система профилированной прокатки слябов стана 2800 / С.Н. Басков, А.С. Карандаев, О.И. Осипов // Приводная техника. – 1999. – № 1-2. – С. 21–24.
16. Радионов, А.А. Автоматизированный электропривод совмещенного прокатно-волоочильного проволочного стана: дис. ... д-ра техн. наук. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2009. – 332 с.
17. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургия, 1960. – 256 с.
18. Радионов, А.А. Автоматизированный электропривод для производства стальной проволоки / А.А. Радионов. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2007. – 311 с.
19. Определение энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров // Деп. 20.04.2000, № 1085-В00.
20. Павлов, И.М. Теория прокатки / И.М. Павлов. – М.: Металлургиздат, 1950. – 610 с.
21. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 3. – С. 47–53.
22. Шрейнер, Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Часть I. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. – 279 с.
23. Пат. РФ 2494828, МПК В21В37/52. Способ автоматического регулирования натяжения полосы в черновой группе клеток непрерывного прокатного стана / И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев и др. – Опубликовано. 10.10.2013, Бюл. № 28.
24. Synthesis methodology of frequency converter's voltage regulator for the kinematic buffering mode / T.R. Khramshin, G.P. Kornilov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov: Bukva, 2014. – Vol. 2. – P. 410–417. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958286
25. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 654 с.
26. Ограничение минимальных скоростей электроприводов стана 2000 при прокатке трубной заготовки / А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – № 3. – С. 20–23.
27. Андрияшин, И.Ю. Разработка математической модели взаимосвязанных электромеханических систем черновой группы прокатного стана / И.Ю. Андрияшин, А.Г. Шубин, А.Н. Гостев // Электротехн. системы и комплексы. – 2014. – № 3. – С. 24–31.
28. Пат. РФ № 147042, МПК В21В 37/52. Устройство автоматического регулирования натяжения металла в двух межклетевых промежутках черновой группы стана горячей прокатки / В.Р. Храмин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмин и др. – Опубликовано. 27.10.2014, Бюл. № 30.
29. Способ коррекции скоростей захвата полосы в непрерывной подгруппе клеток широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмин, А.Н. Гостев // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. трудов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – Вып. 20. – С. 141–149.

**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.

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

**Андрияшин 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.

Поступила в редакцию 27 января 2015 г.

## 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)

**A.A. Radionov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, [radionovaa@susu.ac.ru](mailto:radionovaa@susu.ac.ru),  
**A.S. Karandaev**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, [askaran@mail.ru](mailto:askaran@mail.ru),

**A.S. Evdokimov**, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, [evdmgtu84@mail.ru](mailto:evdmgtu84@mail.ru),

**I.Yu. Andryushin**, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation, [andryushin.iy@mmk.ru](mailto:andryushin.iy@mmk.ru),

**A.N. Gostev**, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation, [gostev\\_an@mmk.ru](mailto:gostev_an@mmk.ru),

**A.G. Shubin**, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation, [shubin\\_ag@mmk.ru](mailto:shubin_ag@mmk.ru)

The paper considers development of the mathematical model of the interrelated stands of the continuous sub-group belonging to the roughing train of the wide-strip hot-rolling mill. The paper substantiates the task of studies on repeated dynamic processes occurring in the electromechanical systems of the universal mill stand edging rolls at the strip gripping by rolls of the tandem horizontal roll stand. The dynamic torque is registered to be 2 to 2.5 times greater than the steady mill torque in this mode. The main reason for occurring repeated shock loads is incoordination of the speed of the strip leaving the edging stand rolls and linear speed of the horizontal stand rolls. To study the transfer of the kinetic energy to the motor shaft of the previous stand it is proved that developing the improved mathematical model of the deformation zone is reasonable. We propose to develop this model in reliance on the equation of the energy conservation at rolling. In the paper there is the structural diagram of the mathematical model of the interrelated electric drives of the edging and horizontal rolls of the three-stand 2,000 mm mill trains of OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works. The paper offers analytic expressions for calculation of the power supplied to the deformation zone from the roll drive motor side, the power supplied due to the metal front tension (looping) and rear looping (tension), the power consumed at gauge forming and power of the slipping friction power. In connection with it, the metal behavior in the deformation zone has been studied; mathematical expressions of the changing elementary velocities of points on the surfaces of the entrance and exit sections are provided. The paper gives dependencies of the metal sliding related to the rolls and slipping friction powers for lead and lag areas obtained with regard to the changing area of the proceeded metal and its resistance to deformation. Based on the obtained expressions, the structural diagram of the deformation zone model has been developed. Analytical and operator expressions for modeling tension and looping forces, as well as structure of the model describing elastic properties of the strip in the inter-stand space are presented. The paper delivers the structure of the mathematical model for electric drive speed control system based on the known equations of the anchor chain of the DC motor. After the comparison of the transient processes of the electric drive coordinates and rolling settings obtained at the modeling and oscillography at the mill the conformity of the developed model to the studied object has been proved. The provided mathematical model is recommended to be applied for examination of the power interaction of the electromechanical rolling mill systems, as well as for the analysis of the dynamical modes at the strip gripping by the edging and horizontal stand rolls.

*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. 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]. *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.)

2. Karandaev A.S., Khrumshin 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.)

3. 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* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 31–35. (in Russ.)
4. 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
5. Bolshakov V.I., Vereneev V.V. [Development of the Ideas of S.N. Kozhevnikov for Studying Dynamics of the Rolling Mills]. *Fundamental and Applied Issues of the Iron and Steel Industry*. Dnepropetrovsk, Ukrainian Institute of the Iron and Steel Industry Publ., 2006, Iss. 12, pp. 345–252. (in Ukr.)
6. Putnoki A.U., Vereneev V.V. [Model of the Dynamic Interaction of the Adjacent Roughing Stands of the Wide-Strip Mill at the Continuous Rolling]. *Ukraine's Metal and Casting*, 2002, no. 12, pp. 26–30.
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. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak ob"ekt avtomatizatsii* [Continuous Stands as an Automation Object]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 336 p.
9. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Ju., Petrjakov S.A. [Improvement of Automatic Control Thickness Wide Hot 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. 556–561. (in Russ.)
10. Khrumshin 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.
11. Galkin V.V., Petrjakov S.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. [Automatic Correction of the Strip Head Section Thickness in a Hydraulic System of Automatic Control of Wide-Strip Hot Mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Sci. Electromechanics], 2011, no 4, pp. 46–50. (in Russ.)
12. 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* [Sci. electromechanics], 2009, no.1, pp. 12–20. (in Russ.)
13. Karandaev A.S., Khrumshin 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.)
14. 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, no. 34, pp. 35–41. (in Russ.)
15. 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.)
16. Radionov A.A. *Avtomatizirovannyy elektroprivod sovmeshchennogo prokatno-volochil'nogo provolochnogo stana. Dokt. Diss.* [Automated Electric Drive of the Combined Rolling and Drawing Rod Mill. Doct. Diss.]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2009. 332 p.
17. Vydrin V.N. *Dinamika prokatnykh stanov* [Dynamics of the Rolling Mills]. Sverdlovsk, Metallurgiya Publ., 1960. 256 p.
18. Radionov A.A. *Avtomatizirovannyy elektroprivod dlya proizvodstva stal'noy provoloki* [Automated Electric Drive for Production of Steel Wire]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2007. 311 p. (in Russ.)
19. Radionov A.A., Usatyj D.Yu., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. *Opredelenie energosilovykh parametrov protsessov obrabotki metallov davleniem kosvennym metodom* [Specification of the Power Parameters of the Metal-Forming Processes with the Indirect Method]. Dep. 20.04.2000, No. 1085-V00.
20. Pavlov I.M. *Teoriya prokatki* [Theory of Rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1950. 610 p.
21. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. [Mathematical modeling of thyristor structure with switchable]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Sci. Electromechanics], 2010, no. 3, pp. 47–53. (in Russ.)
22. Shrejner R.T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov. Chast' 1. Elektroprivody postoyannogo toka s podchinennym regulirovaniem koordinat* [Systems of Subordinated Control of the Electric Drives. Part 1. DC Electric Drives with Subordinated Coordinate Control]. Ekaterinburg, Ural Professional Teacher Training University Publ., 1997. 279 p.

23. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N., Kazakov I.V., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshin R.R. *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya natyazheniya polosy v chernovoy gruppe kletey nepreryvnogo proklatnogo stana* [Method of the Automated Control of the Strip Tension in the Roughing Train of the Continuous Rolling Mill]. Patent RF, no. 2494828, 2013. (in Russ.)
24. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Synthesis methodology of frequency convertor's voltage regulator for the kinematic buffering mode. *2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Bukva Publ., 2014, vol. 2, pp. 410–417. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958286
25. Shrejner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical Modelling AC Electric Drives with Semiconductor Frequency Converters]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000. 654 p. (in Russ.)
26. 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.)
27. Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. [Development of mathematical model for interrelated electrical and mechanical systems of rolling mill roughing train]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2014, vol. 3, pp. 24–31. (in Russ.)
28. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Khramshin R.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. *Ustroystvo avtomaticheskogo regulirovaniya natyazheniya metalla v dvukh mezhkletevykh promezhutkakh chernovoy gruppy stana goryachey prokatki* [Unit of the Automated Control of the Metal Tension in Two Inter-Stand Gaps of the Hot-Rolling Mill Roughing Train]. Patent RF, no. 147042, 2014. (in Russ.)
29. Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gostev A.N. [Method of Correction of the Strip Grip Speed in the Continuous Sub-Train of the Wide-Strip Hot-Rolling Mill]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], Magnitogorsk, MSTU, 2012, vol. 20, pp. 141–149. (in Russ.)

Received 27 January 2015

---

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионо́в, А.С. Кара́ндаев, А.С. Евдо́кимов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 59–73. DOI: 10.14529/power150108

#### REFERENCE TO ARTICLE

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

---