

Андрюшин И.Ю., Шубин А.Г., Гостев А.Н.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЧЕРНОВОЙ ГРУППЫ ПРОКАТНОГО СТАНА

Дана характеристика электроприводов непрерывной подгруппы черновой группы стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Представлена структура модели взаимосвязанных электромеханических систем двух межклетевых промежутков. Рассмотрены математическая модель силовой части электропривода клетки и модель прокатываемой полосы как объекта управления. Отмечены особенности моделирования системы автоматического регулирования нулевого натяжения. Дана оценка адекватности математической модели исследуемому объекту. С этой целью выполнено моделирование переходных процессов, зафиксированных при прокатке полосы путем прямого осциллографирования на стане. Показано, что в большинстве характерных точек относительная погрешность результатов менее 5%, поэтому является допустимой. Отмечена целесообразность использования модели для исследования алгоритмов согласования скоростных режимов и ограничения ударных нагрузок в горизонтальных и вертикальных валках универсальных клеток.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, непрерывная группа клеток, электромеханические системы, взаимосвязь, натяжение, математическая модель, разработка, адекватность.

ВВЕДЕНИЕ

При расширении сортамента полос, производимых на широкополосных станах горячей прокатки (ШСП), значительное внимание уделяется совершенствованию электротехнических систем: автоматизированных электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров [1–4]. В работах [5–7] представлены разработки, направленные на совершенствование взаимосвязанных электротехнических систем чистой группы ШСП. Вопросы, связанные с разработкой электроприводов и систем управления непрерывной подгруппы черновой группы, не исследовались. В современных публикациях других авторов информация о подобных исследованиях и разработках также практически отсутствует.

Вместе с тем точность геометрических размеров проката на выходе черновой группы оказывает значительное влияние на размерную точность полосы на выходе стана. Значительное влияние на геометрические размеры проката оказывает точность поддержания натяжения, близкого к нулевому, в межклетевых промежутках непрерывной подгруппы [8, 9]. Кроме того, недостаточно изучены вопросы возникновения мгновенного подпора и повторных колебательных процессов в электромеханических системах вертикальных валков универсальных клеток при захвате полосы горизонтальными валками [10, 11].

Перечисленные вопросы требуют проведения всесторонних исследований. Пассивные эксперименты на действующем прокатном стане, в связи с их ограниченностью, не обеспечивают возможности получения необходимых результатов. Оптимальным способом исследования сложных систем является математическое моделирование. С этой целью разработана математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной под-

группы стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), описание которой представлено ниже.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

На **рис. 1** показан фрагмент технологической линии стана 2000: непрерывная подгруппа черновой группы универсальных клеток № 4–6. 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 [12].

Клетки оснащены автоматизированными электроприводами постоянного тока. Клеть №4 имеет привод горизонтальных валков от двух электродвигателей мощностью 2×8200 кВт (125/250 об/мин) через общий редуктор и шестеренную клеть. Электропривод вертикальных валков мощностью 2×150 кВт (490 об/мин) также выполнен с общим редуктором. Валки клетки №5 имеют аналогичные электроприводы, отличающиеся только передаточными числами редукторов. Клеть №6 имеет безредукторный привод горизонтальных валков от двухъякорного электродвигателя мощностью 2×7200 кВт (50/100 об/мин) и привод вертикальных валков аналогичный приводу клеток №4 и 5.

В настоящее время в составе системы автоматического управления черновой группой функционирует система автоматического регулирования нулевого натяжения (САРНН) [13]. Она представляет собой управляющую программу, загруженную в контроллер АСУ ТП, который задает скоростные режимы главных электроприводов клеток этой группы. САРНН поддерживает заданное натяжение полосы между 4-й и 5-й клетями, изменяя скорость 4-й клетки, а натяжение между клетями №5 и 6 регулируется изменением скорости 6-й клетки. На скорость 5-й клетки САРНН влияния не оказывает.

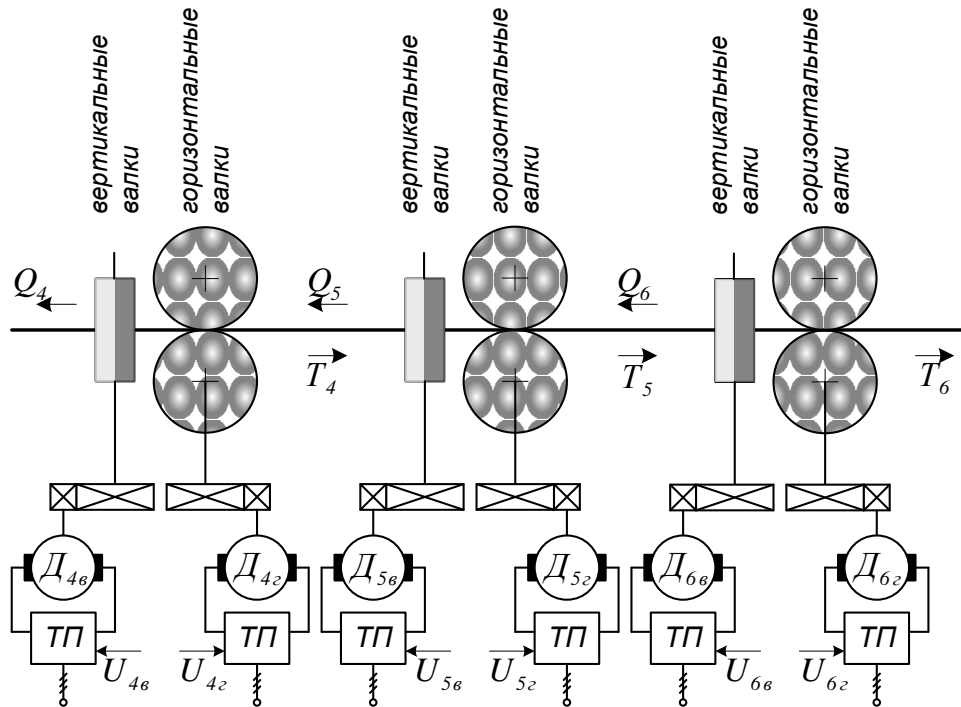


Рис. 1. Схема непрерывной трехклетевой прокатной группы

СТРУКТУРА МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДВУХ МЕЖКЛЕТЕВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ЧЕРНОВОЙ ГРУППЫ 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) клетей №4, 5, 6 и модели полосы как объекта управления.

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 одной 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.

Расшифровка обозначений, принятых на рис. 2,

приводится ниже при описании математических моделей объектов регулирования. Модель реализована в программной среде Simulink, являющейся приложением пакета MATLAB.

ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Силовая часть электропривода постоянного тока с питанием обмотки якоря от тиристорного преобразователя представляет собой электромеханическую систему, при математическом моделировании которой используется ряд допущений [5]:

- тиристорный преобразователь рассматривается как управляемый эквивалентный генератор ЭДС с внутренним активным сопротивлением и внутренней индуктивностью, не зависящими от нагрузки преобразователя; ток двигателя считается непрерывным; пульсирующие составляющие ЭДС и тока двигателя не учитываются; полезная ЭДС преобразователя пропорциональна управляющему воздействию на входе его системы управления. Таким образом, тиристорный преобразователь совместно с системой импульсно-фазового управления рассматривается как апериодическое звено первого порядка, коэффициент которого равен коэффициенту усиления тиристорного преобразователя;
- приводные двигатели горизонтальных и вертикальных валков моделируются нагрузкой с противо-ЭДС, внутренними активными сопротивлениями и индуктивностями, не зависящими от нагрузки; влияние реакции якоря двигателя на возбуждение, а также действие вихревых токов не учитываются;
- механическая часть рассматривается как абсолютно жесткая приведенная одномассовая система с постоянной величиной момента инерции.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОЙ ЧАСТИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА КЛЕТЫ

Модель каждого межклетевого промежутка включает модели электроприводов горизонтальных и вертикальных валков в замкнутой двухконтурной системе однозонного регулирования скорости. Поскольку структуры и настройки систем управления этих электроприводов взаимно идентичны, ниже приводится описание модели якорной цепи, общей для обеих групп электроприводов.

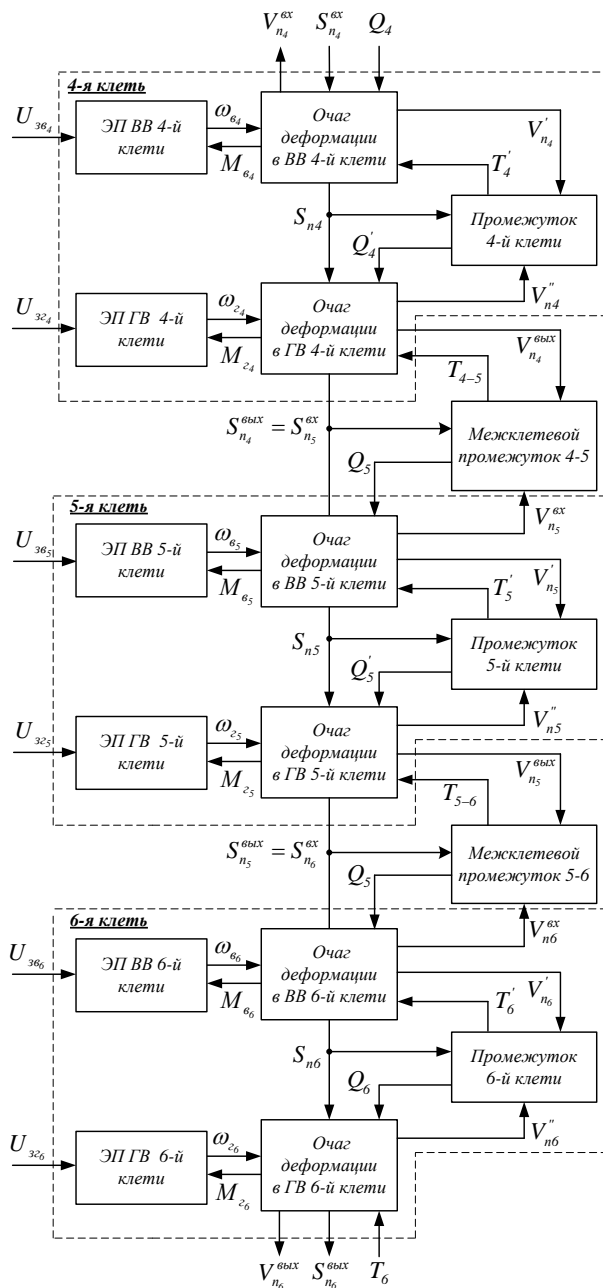


Рис. 2. Структурная схема математической модели взаимосвязанных электроприводов клеток №4-6 стана 2000

При принятых выше допущениях математическая модель якорной цепи электропривода описывается известной системой операторных уравнений [14]:

$$\begin{cases} E_{di} = \frac{K_{тпi}}{T_{\mu i}p + 1} u_{yi}; \\ E_{двi} = E_{двi} + R_{\Sigma i} I_{яi} (T_{\Sigma i} p + 1); \\ M_i = k\Phi_{нi} I_{яi}; \\ E_{двi} = k\Phi_{нi} \omega_i; \\ M_i - M_{ci} = J_{\Sigma i} p \omega_i. \end{cases} \quad (1)$$

где E_d и $E_{дв}$ – ЭДС тиристорного преобразователя (ТП) и двигателя; $k_{тп}$ и T_{μ} – коэффициент усиления и постоянная времени ТП; u_y – напряжение управления ТП; R_{Σ} и T_{Σ} – эквивалентные активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи; M и M_c – моменты двигателя и статических сопротивлений, приведенные к валу двигателя; $I_{я}$ – ток якорной цепи; J_{Σ} – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя; $p=d/dt$ – оператор дифференцирования по времени; i – порядковый номер клетки.

Структурная схема математической модели силовой части электропривода горизонтальных либо вертикальных валков, соответствующая системе уравнений (1), представлена на рис. 3. На схеме показаны каналы обратных связей по якорному току и скорости, предназначенные для подключения соответствующих сигналов в двухконтурной системе регулирования скорости с внутренним контуром тока.

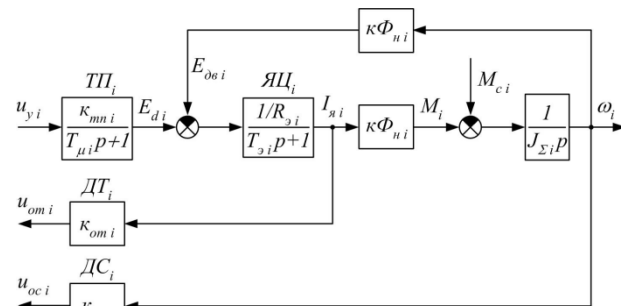


Рис. 3. Математическая модель силовой части электропривода как объекта управления:

ТП – тиристорный преобразователь; ЯЦ – якорная цепь; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости; $K_{от}$, $K_{ос}$ – коэффициенты датчиков

Синтез регуляторов тока и скорости для каждого электропривода выполнен по известной методике синтеза систем подчиненного регулирования [15].

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Взаимосвязь между электроприводами описывается следующими моделями [16–18]:

- прокатываемой полосы в межклетевом промежутке на основе зависимостей, предложенных Н.Н. Дружининым и Д.П. Морозовым;
- момента прокатки, в основу которой положены зависимости, предложенные А.И. Целиковым и А.А.

Королевым;
– опережения и отставания, основанной на формуле Дрездена.

Изменение свойств полосы на участках между очагами деформации поясняется с помощью **рис. 4**. Вследствие несоответствия мгновенных значений скоростей выхода полосы из предыдущей и входа в последующую клетки возникает натяжение (подпор). Под действием этих сил полоса упруго деформируется: при натяжении – удлиняется и утончается; при подпоре – укорачивается и уширяется. При этом упругая деформация может быть описана интегральными уравнениями [19]:

$$T_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}}{L_{T_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_{(i+1)}}^{\text{ВХ}} - V_{n_i}^{\text{ВЫХ}}) \cdot dt - T_{\text{нач}_i}; \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВХ}}}{L_{Q_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_i}^{\text{ВХ}} - V_{n_{(i-1)}}^{\text{ВЫХ}}) \cdot dt - Q_{\text{нач}_i}, \quad (3)$$

где E_i – модуль упругости; $S_{n_i}^{\text{ВХ}}$, $S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}$ – площади поперечного сечения полосы на входе и выходе i -ого очага деформации; L_{T_i} , L_{Q_i} – длины участков полосы, на которых действуют силы T_i и Q_i ; $T_{\text{нач}_i}$, $Q_{\text{нач}_i}$ – начальные переднее и заднее натяжения.

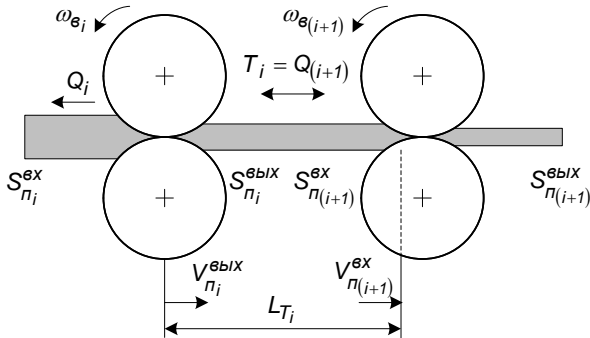


Рис. 4. Расчетная схема межклетевого промежутка

Дифференцируя зависимости (2), (3)

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{E_i \cdot S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}}{L_{T_i}} \cdot (V_{n_{(i+1)}}^{\text{ВХ}} - V_{n_i}^{\text{ВЫХ}});$$

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{E_i \cdot S_{n_i}^{\text{ВХ}}}{L_{Q_i}} \cdot (V_{n_i}^{\text{ВХ}} - V_{n_{(i-1)}}^{\text{ВЫХ}})$$

и переходя к операторным изображениям, получаем

$$p \cdot T_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВЫХ}}}{L_{T_i}} \cdot (V_{n_{(i+1)}}^{\text{ВХ}} - V_{n_i}^{\text{ВЫХ}}); \quad (4)$$

$$p \cdot Q_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{\text{ВХ}}}{L_{Q_i}} \cdot (V_{n_i}^{\text{ВХ}} - V_{n_{(i-1)}}^{\text{ВЫХ}}). \quad (5)$$

Согласно (4), (5) в условиях свободной прокат-

ки $T_i = Q_{(i+1)}$. 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 установленных электродвигателей составляет 150 кВт, что меньше мощности двигателей приводов горизонтальных валков более чем в 50 раз. Поэтому влияние на натяжение (подпор) от несогласованности окружной скорости вертикальных валков может быть учтено выражением

$$\Delta T_i = \Delta Q_{(i+1)} = \frac{M_{B_3} - M_{\text{хх}_3} - M_{\text{деф}_3}}{R_{B_3}}, \quad (6)$$

где M_{B_3} – момент на бочке вертикального валка (эджера); $M_{\text{хх}_3}$ – момент холостого хода; $M_{\text{деф}_3}$ – момент, необходимый для деформации металла в вертикальных валках; R_{B_3} – радиус вертикальных валков.

На **рис. 5** приведена структурная схема динамической модели межклетевого промежутка прокатного блока, составленная на основе уравнений (4)–(6). Она наглядно представляет взаимосвязь между тремя входными, одной выходной координатами и одним возмущающим воздействием.

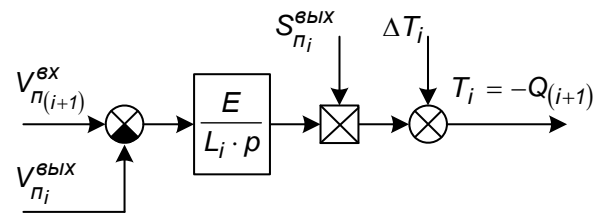


Рис. 5. Структурная схема математической модели межклетевого промежутка

Моделирование системы автоматического регулирования нулевого натяжения выполнено упрощенно. Для этого в модель введены сигналы, пропорциональные натяжениям в межклетевых промежутках, рассчитанные по статическим токам двигателей валков горизонтальных клеток (на **рис. 2** не показаны). При этом влияние вертикальных валков на натяжение не учитывается. Такое допущение обосновано ранее при экспериментальных исследованиях, результаты которых представлены в [20]. В реальных условиях величина натяжения вычисляется по сигналу давления, поступающему от месдоз, установленных под подушками опорных валков, при этом вычисляется плечо прокатки [9]. Принятый вариант вычисления позволяет упростить модель и повышает точность определения натяжения.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

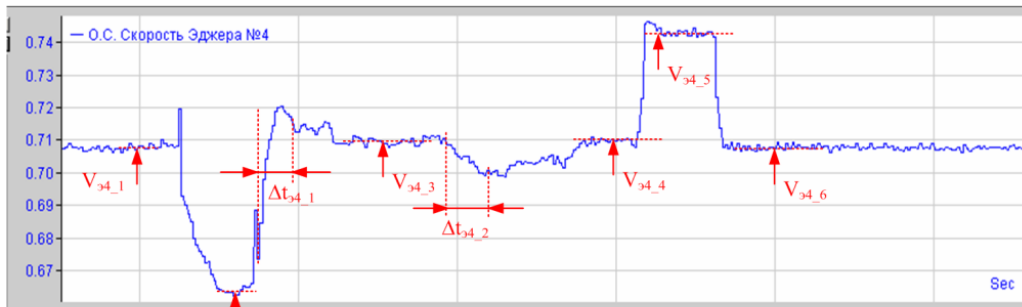
Адекватность разработанной математической модели исследуемому объекту исследовалась путем сравнения переходных процессов координат элек-

троприводов и параметров прокатки, полученных при моделировании и осциллографировании на стане.

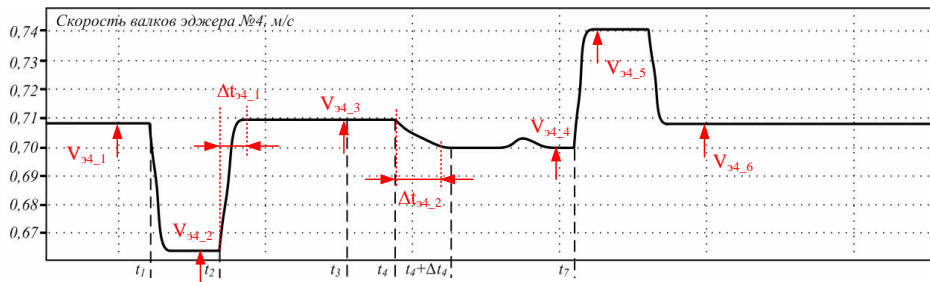
При моделировании приняты параметры прокатки полосы из сляба шириной 1600 мм, марка стали 08Ю, экспериментальное исследование прокатки которого проводилось на стане. Толщина полосы на входе в клету №4 – 120 мм, обжатие в клету №4 – 40 мм (33%), в клету №5 – 30 мм (38%), в клету №6 – 20 мм (40%). Скорости полосы при свободной прокатке на выходе клету №4, 5 и 6: 1,05, 1,91 и 3,66 м/с соответственно [21].

Характерные осциллограммы переходных про-

цессов, полученные экспериментальным путем для электроприводов вертикальных и горизонтальных валков клету №4, представлены на рис. 6, а и 7, а соответственно. На рис. 6, б и 7, б показаны аналогичные переходные процессы, полученные расчетным путем с использованием разработанной математической модели. На осциллограммах и расчетных кривых указаны фиксированные параметры (маркеры), по которым производилось сравнение данных в характерных точках. Для других параметров электромеханических систем межклетевого промежутка адекватность оценивалась аналогично.

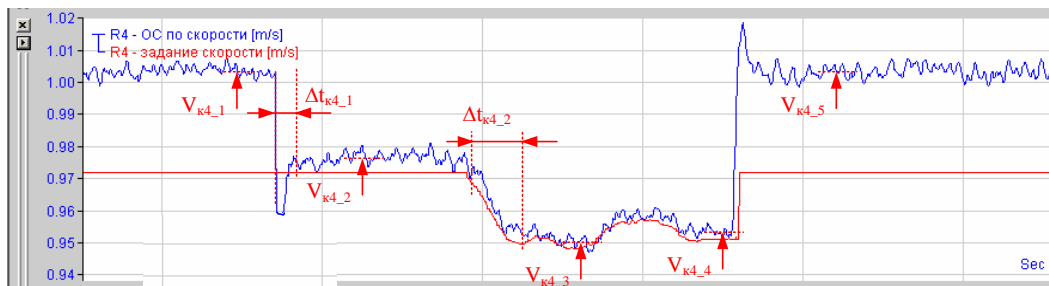


а

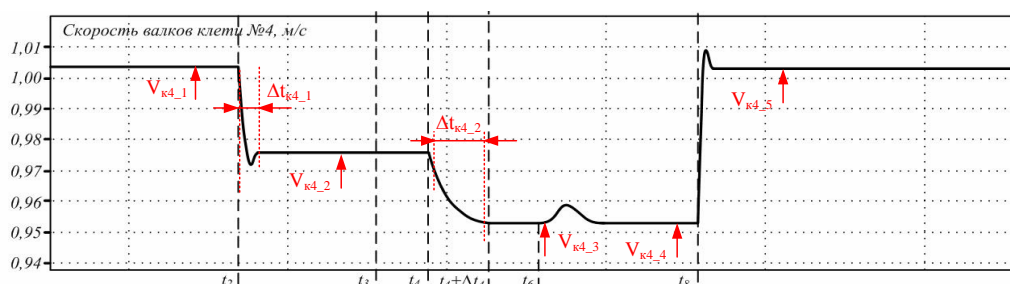


б

Рис. 6. Оценка адекватности математической модели по скорости вертикальных валков клету №4



а



б

Рис. 7. Оценка адекватности математической модели по скорости горизонтальных валков клету №4

В табл. приведены значения фиксированных параметров и указаны относительные погрешности результатов моделирования. Из них следует, что в большинстве характерных точек относительная погрешность не превышает 5%. Такие расхождения находятся в пределах погрешности измерений и являются допустимыми при моделировании сложного взаимосвязанного объекта.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных, представленных на рис. 6 и 7

Маркеры на осциллограммах	Эксперимент на стане	Расчет на модели	Прим.
V_{34_1}	0,708 об/мин	0,708 об/мин	<5 %
V_{34_2}	0,674 об/мин	0,673 об/мин	<5 %
V_{34_3}	0,709 об/мин	0,710 об/мин	<5 %
V_{34_4}	0,710 об/мин	0,700 об/мин	<5 %
V_{34_5}	0,743 об/мин	0,740 об/мин	<5 %
V_{34_6}	0,707 об/мин	0,708 об/мин	<5 %
Δt_{34_1}	2,62 с	2,44 с	6,8 %
Δt_{34_2}	2,82 с	2,94 с	<5 %
$V_{к4_1}$	1,003 об/мин	1,003 об/мин	<5 %
$V_{к4_2}$	0,977 об/мин	0,976 об/мин	<5 %
$V_{к4_3}$	0,950 об/мин	0,953 об/мин	<5 %
$V_{к4_4}$	0,953 об/мин	0,953 об/мин	<5 %
$V_{к4_5}$	1,003 об/мин	1,003 об/мин	<5 %
$\Delta t_{к4_1}$	1,33 с	1,36 с	<5 %
$\Delta t_{к4_2}$	3,32 с	2,29 с	<5 %

Таким образом, по представленным результатам можно сделать вывод об адекватности разработанной математической модели реальному физическому объекту: взаимосвязанным электромеханическим системам трехклетевой непрерывной подгруппы стана 2000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы черновой группы стана 2000 ОАО «ММК» адекватна промышленному объекту. Модель рекомендуется для исследования динамических режимов, возникающих при управляющих и возмущающих воздействиях. Достоверное математическое описание силовой взаимосвязи электроприводов смежных горизонтальных клетей позволяет анализировать причины отклонений натяжения либо возникновения подпора в межклетевых промежутках. Это позволит выполнить исследование усовершенствованных алгоритмов регулирования нулевого натяжения. Применение модели также це-

лесообразно для исследования динамических нагрузок, возникающих при захвате полосы валками горизонтальных и вертикальных клетей, и для исследования способа автоматического регулирования натяжения полосы в черновой группе клетей [22], разработанного при участии авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
2. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, П.В. Шилиев, С.А. Петряков, А.А. Лукин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. С. 34-40.
3. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Совершенствование электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки при расширении сортамента полос // Электротехнические системы и комплексы, 2014. № 1. – С. 22-31.
4. Карандаев А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 3-15.
5. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 360 с.
6. Андрушин И.Ю. Совершенствование системы управления скоростными режимами электроприводов непрерывной группы широкополосного стана горячей прокатки: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 204 с.
7. Храмшин В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. 2013. №4. С. 49-55.
8. Определение энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров. Магнитогорск, 2000. Деп. в ВИНТИ 20.04.2000, №1085-В00.
9. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 98-103.
10. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андрушин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 69-77.
11. Басков С.Н., Карандаев А.С., Осипов О.И. Энергосиловые параметры приводов и система профилированной прокатки слябов стана 2800 // Приводная техника. 1999. № 1-2. С. 21-24.
12. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической кон-

ференции по автоматизированному электроприводе: ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново, 2012. С. 652-657.

13. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клетей черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. Вып. 16. 2011. № 34 (251). С. 35-41.

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

15. Шрейнер, Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Часть 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат: Учеб. пособие для вузов. Екатеринбург: Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. 279 с.

16. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрушин, П.В. Шильев, В.В. Головин // Известия вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 12-20.

17. Khrumshin, V.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathe-matical Simulation Methods [Исследование способа коррекции толщины головного участка полосы методом математического моделирования] / V.R. Khrumshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov,

R.R. Khrumshin // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. Вып. 13. 2013. № 1. С. 144-151.

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

19. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1967. 336 с.

20. Способ коррекции скоростей захвата полосы в непрерывной подгруппе клетей широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмин, А.Н. Гостев // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 20. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 141-149.

21. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 31-35.

22. Способ автоматического регулирования натяжения полосы в черновой группе клетей непрерывного прокатного стана / И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев, И.В. Казаков, С.А. Евдокимов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, Р.Р. Храмин // Патент РФ №2494828, МПК В21В37/52. Опубл. 10.10.2013. Бюл. №28.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR INTERRELATED ELECTRICAL AND MECHANICAL SYSTEMS OF ROLLING MILL ROUGHING TRAIN

Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N.

Electric drives of the continuous roughing train of the rolling mill 2000 OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» are described. The model structure of the interrelated electrical and mechanical systems of two interstand gaps is introduced. Mathematical model of the rolling stand electric drive and the model of the strip plate are considered as control objects. The research group noted some specific features of the modeling process for the no pull automatic control system. Model validity to the study object was evaluated. To evaluate it, transient processes characteristic for rolling were recorded by means of oscillographic testing. It was proved that in the majority of characteristic points the output error was less than 5%, which is quite acceptable. The authors believe it is reasonable to use this model to study the algorithms of speed modes coordination and to limit the impact loads in horizontal and vertical rolls of universal rolling stands.

Keywords: wide strip hot rolling mill, continuous train, electromechanical systems, interrelation, tension, mathematical model, development, adequacy.

REFERENCES

1. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteino-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos* [Thin slab casting and rolling units for steel strip production]. Moscow: Bauman MSTU, 2003, 506 p.

2. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Petryakov S.A., Lukin A.A. *Novye tehnicheckie resheniya v elektroprivodah i sistemah*

regulirovaniya tehnologicheskikh parametrov stanov goryachei prokatki [New technical solutions in electric drives and control systems of manufacturing parameters of hot rolling mills]. Proceedings of TulGU. Technical sciences. Issue 3. Tula: Publishing center of TulGU, 2010, part 2, pp. 34-40.

3. Karandaev A.S., Khrumshin V.R. *Sovershenstvovanie elektroprivodov i sistem avtomaticheskogo regulirovaniya tehnologicheskikh parametrov shirokopolosnykh stanov goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Improvement of electric drives and automatic control systems of manufacturing parameters of wide strip hot rolling mills in the process of product range expansion]. Electrotechnical systems and complexes, 2014, no. 1, pp. 22-31.

4. Karandaev A.S. *Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh elektroprivodov agregatov prokatnogo proizvodstva* [Improvement of automatic electric drives of rolling stands]. *Mashinostroenie* [Machine-building]: network electronic scientific journal, 2014, no.1, pp. 3-15.

5. Khrumshin, V.R. *Razrabotka elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy stana goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Development of electrotechnical systems for continuous train of hot rolling mill in the process of product range expansion]: Dissertation for a D.Sc. degree in Engineering. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 360 p.

6. Andryushin, I.Yu. *Sovershenstvovanie sistemy upravleniya skorostnymi rezhimami elektroprivodov nepreryvnoi gruppy shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Improvement of speed control system for electric

drives of continuous train of a wide strip hot rolling mill]: dissertation for a Ph.D. in Engineering. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 204 p.

7. Khramshin, V.R. Sposoby kompensatsii staticheskikh otklonenii skorosti elektroprivodov kletei shirokopolosnogo stana goryachei prokatki [Ways of speed static deflection compensation for electric drives of rolling stands of wide strip hot rolling mill]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2013, no.4, pp. 49-55.

8. Radionov A.A., Usatyi D.Yu., Radionov A.A., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. *Opreделение energosilovyykh parametrov protsessov obrabotki metallov davleniem kosvennym metodom* [Calculation of power parameters of plastic metal working by indirect method]. Magnitogorsk, 2000, dep. in VINITI 20.04.2000, no. 1085-B00.

9. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. *Soglasovanie skorostnykh rezhimov elektroprivodov kletei nepreryvnoi gruppy prokatnogo stana* [Coordination of rolling stand electric drive speed of continuous train of rolling mill]. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISPU]. 2013, issue 1, pp. 98-103.

10. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. *Snizhenie dinamicheskikh nagruzok mehanicheskogo i elektricheskogo oborudovaniyachernovoi podgruppy kletei stana goryachei prokatki* [Reduction of dynamic loads on mechanical and electrical equipment of roughing train of hot rolling mill]. *Mashinostroenie* [Machine building]: network electronic scientific journal. 2013, no.2, pp. 69-77.

11. Baskov S.N., Karandaev A.S., Baskov S.N., Osipov O.I. *Energosilovyye parametry privodov i sistema profilirovannoi prokatki slyabov stana 2800* [Power parameters of electric drives and system of shape rolling of slabs at rolling mill 2800]. *Privodnaya tekhnika* [Driving equipment]. 1999, no. 1-2, pp. 21-24.

12. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. *Soglasovanie skorostei vzaimosvyazannykh elektroprivodov kletei chernovoi gruppy prokatnogo stana* [Speed coordination of interrelated electric drives of roughing train stands of rolling mill]. *Trudy VII mezhdunarodnoi (XVII Vserossiiskoi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of VII International (XVIII All-Russian) scientific conference on automatic electric drive]: FSBEI HPE «Ivanovo state power university», Ivanovo. 2012, pp. 652-657.

13. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Gostev A.N. *Sovershenstvovanie algoritma soglasovaniya skorostei elektroprivodov kletei chernovoi gruppy stana goryachei prokatki* [Improvement of electric drives speed coordination algorithm for roughing train of hot rolling mill]. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state university. Power engineering]. Issue 16, 2011, no. 34(251), pp. 35-41.

14. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. *Matematicheskoe modelirovanie tiristornogo elektropriroda s pereklyuchayuscheysya strukturoi* [Mathemati-

cal modeling of thyristor electric drive with a flipper]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2010, no.3, pp. 47-53.

15. Shreiner R.T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov* [Slave control systems of electric drives]. Part 1. DC electric drives with slave coordinate control: Textbook for universities. Yekaterinburg: Ural state vocational pedagogical university, 1997, 279 p.

16. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Shilyaev, Golovin V.V. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem mezhkletjevogo promezhutka shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Mathematical modeling of interrelated electrical systems of interstand gap of wide strip hot rolling mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2009, no.1, pp. 12-20.

17. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin R.R. *Issledovanie sposoba korrektsii golovnogo uchastka polosy metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods]. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of south-Ural state university. Power engineering series]. Issue 13, 2013, no. 1, pp. 144-151.

18. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. *Matematicheskaya model vzaimosvyazannykh elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy shirokopolosnogo stana* [Mathematical model of interrelated electrical systems of continuous train of wide strip rolling mill]. *Mashinostroenie* [Machine building]: network electronic scientific journal, 2013, no.1, pp. 12-21.

19. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak objekt avtomatizatsii* [Continuous mills as automation object]. – Moscow: Metallurgy, 1967, 336 p.

20. Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gostev A.N. *Sposob korrektsii skorostei zahvata polosy v nepreryvnoi podgruppe kletei shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Way of strip clamp speed in continuous train of wide strip hot rolling mill]. *Electromechanical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers*. Issue 20. Magnitogorsk: Publishing center of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2012, pp. 141-149.

21. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. *Avtomaticheskaya korrektsiya skorostei elektroprivodov kletei stana 2000 pri prokatke trubnoi zagotovki* [Automatic control of stand electric drive speed of 2000 rolling mill during tube stock rolling]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011, no. 4, pp. 31-35.

22. 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 chernovoi gruppe kletei nepreryvnogo prokatnogo stana* [Way of automatic strip tension control in roughing train of continuous rolling mill]. //RF №2494828, МПК В21В37/52. Published 10.10.2013. Bulletin no.28.