

# Расчет и конструирование

УДК 621.311 + 621.34.001

DOI: 10.14529/engin190201

## СПОСОБ ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА

**В.Р. Гасияров**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Обоснована актуальность разработки систем управления, обеспечивающих ограничение динамических моментов электроприводов реверсивной клетки толстолистового прокатного стана при ударном приложении нагрузки. Актуальность заключается в том, что возникающие динамические нагрузки приводят к преждевременному износу технологического оборудования и возникновению аварийных ситуаций во время операций прокатки. Рассмотрены алгоритмы управления, обеспечивающие предварительный выбор зазоров в шпиндельных соединениях и компенсацию динамической ошибки регулирования скорости при захвате металла. Разработан способ управления электроприводами, объединяющий преимущества этих технических решений. Представлена функциональная схема системы управления, поясняющая реализацию способа. Разработана математическая модель электромеханической системы валков с учетом упругих связей в механических передачах. Представлены результаты моделирования переходных процессов скорости и момента электропривода в режиме захвата заготовки при реализации известных и разработанного способов управления. Предложен усовершенствованный алгоритм управления, согласно которому снижение скорости после захвата осуществляется с заданным отрицательным ускорением. Приведены результаты моделирования, подтвердившие техническую эффективность алгоритма. По результатам моделирования дано обоснование оптимального темпа замедления электропривода. Представлены осциллограммы скоростей и моментов электроприводов реверсивной клетки стана 5000, полученные при реализации разработанного способа. В результате длительных исследований подтверждено улучшение динамических показателей по сравнению с аналогичными характеристиками в существующей системе электропривода. Ограничения динамических нагрузок достигается за счет предварительного выбора люфтов в валопроводах валков, а ограничения динамического момента – путем компенсации ошибки регулирования скорости. Сделан вывод о целесообразности внедрения разработанных технических решений.

*Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, прокатная клеть, электропривод, динамические нагрузки, ограничение, способ, динамическая модель, математическое моделирование, экспериментальные исследования, рекомендации.*

### Введение

Расширение сортамента толстолистовых прокатных станов за счет увеличения доли проката из труднодеформируемых марок стали, предназначенного для производства труб большого диаметра, является общепризнанной мировой тенденцией. В этих условиях увеличиваются нагрузки электромеханических систем горизонтальных валков прокатной клетки в установившемся и динамических режимах. Поэтому проблема ограничения динамических нагрузок в момент захвата металла валками приобретает дополнительную актуальность.

Физические процессы, возникающие при заполнении очага деформации, изучались многими авторами. Среди известных публикаций следует отметить труды специалистов SMS-Demag, Siemens, General Electric и ряда японских фирм [1–5]. В научных публикациях [6–8] представлены разработки, направленные на ограничение динамических нагрузок электромеханических систем широкополосных станов горячей прокатки, выполненные авторским коллективом представленной статьи. Алгоритмы управления, обеспечивающие снижение нагрузок электроприводов вертикальных валков универсальных клетей, прошли промышленные испытания на широкополос-

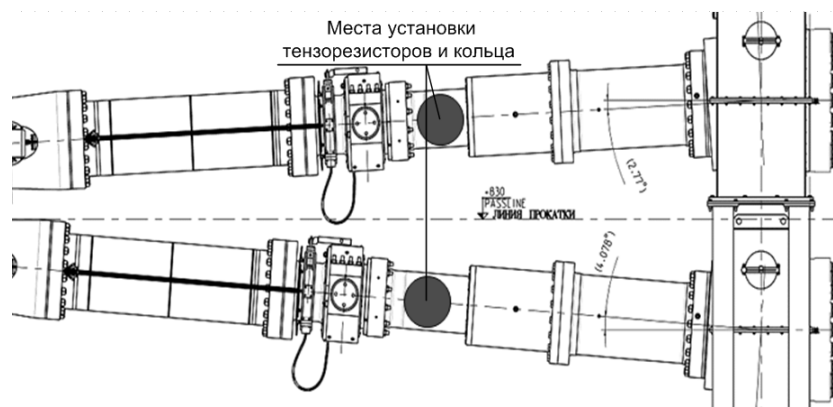
## Расчет и конструирование

ном стане 2000 [9–11]. При этом проблема ограничения динамических моментов в валопроводах горизонтальных валков остается нерешенной.

Названная проблема актуальна для электромеханических систем реверсивных клетей толстолистовых прокатных станов, в том числе для стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Главным технологическим устройством стана является прокатная клеть «кварто» (рис. 1, а), обеспечивающая усилие прокатки до 12 000 т. Клеть оснащена двумя опорными и двумя рабочими валками, передающими усилие прокатки и мощность электропривода на обрабатываемый металл. Электроприводы этих станов выполняются безредукторными, с минимальным количеством соединений в механических передачах.



а)



б)

Рис. 1. Реверсивная клеть стана 5000: общий вид (а); верхний и нижний шпиндели рабочих валков (б)

Привод каждого рабочего валка выполнен индивидуальным и осуществляется синхронным двигателем через универсальные шпиндели слипперного типа (slipper type). Конструктивное исполнение шпинделя показано на рис. 1, б. Он состоит из головки со стороны ролика, вала и головки со стороны двигателя. Вал шпинделя имеет шлицевую конструкцию для компенсации осевого смещения при сдвигке валков  $CVC^{plus}$  [12]. Опорный подшипник расположен в районе середины вала. Каждый шпиндель уравнивается индивидуально с помощью гидроцилиндра, рычагов и штоков в вертикальном и горизонтальном направлениях при использовании  $CVC^{plus}$  [13]. На рис. 1 также показаны места установки измерительных устройств (тензорезисторов и кольца), с помощью которых осуществляется измерение упругих моментов

Динамические нагрузки, возникающие в момент захвата металла валками, приводят к ударам в механических соединениях шпинделя, износу и преждевременному выходу из строя механиче-

ского оборудования. В результате повышается вероятность возникновения аварий, наиболее опасной из которых является поломка шпиндельных соединений [14, 15]. Это предопределяет актуальность разработки способов управления электроприводами реверсивной клетки, обеспечивающих ограничение динамических нагрузок при захвате металла валками.

### 1. Постановка задачи

Обоснованность сделанного вывода подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных на стане 5000. На рис. 2 представлены осциллограммы моментов на валу верхнего и нижнего шпинделей (окно 1), крутильных колебаний валопроводов (окна 3 и 4) и давления в гидроцилиндрах осевой сдвижки валков (окно 5) [16]. Осциллограммы получены с помощью системы измерения моментов на валах, разработанной специалистами фирмы SMS-Demag.

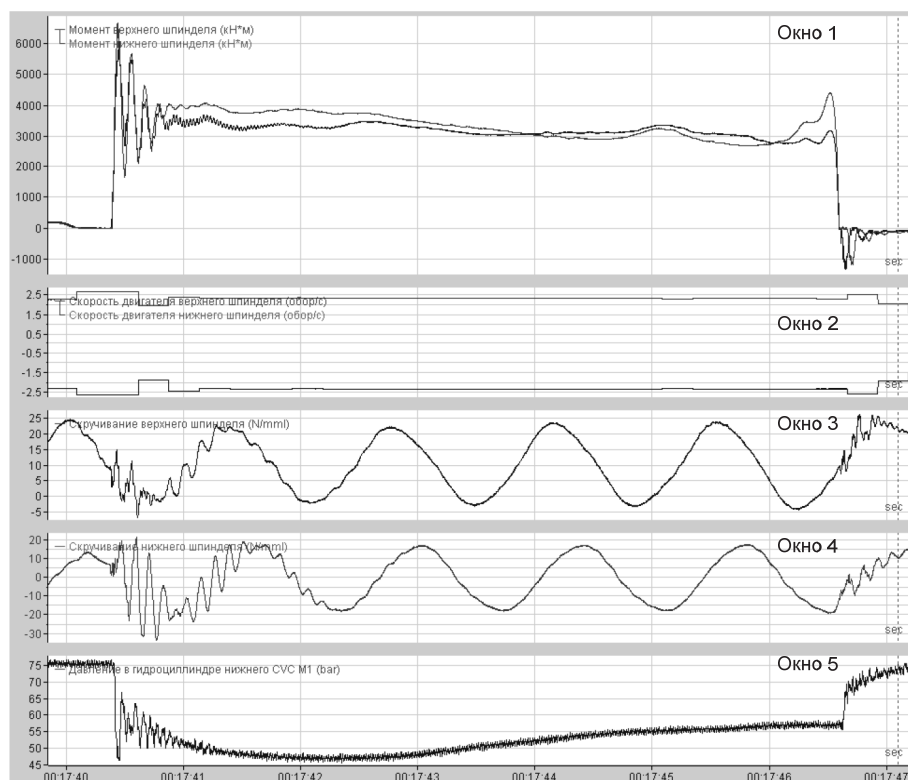


Рис. 2. Осциллограммы моментов на валу верхнего и нижнего шпинделей

Анализ осциллограмм позволяет сделать следующие выводы:

– амплитуда ударного момента (окно 1) при захвате более чем в 2 раза превышает установившийся момент прокатки;

– затухающие колебания накладываются на синусоиду (окна 3, 4), вызванную вращением валков, и имеют значительную амплитуду на валу нижнего шпинделя (окно 4).

В результате проведенных исследований установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на величину динамических нагрузок, являются:

1. Ударные моменты, связанные с выбором зазоров в шпиндельных соединениях. Они не могут контролироваться, но могут быть устранены средствами электропривода.

2. Колебательные процессы, вызванные настройкой пропорционально-интегрального регулятора скорости в двухконтурной астатической системе. Известно, что переходные процессы скорости и момента электропривода при такой настройке имеют колебательный характер, что приводит к возникновению крутильных колебаний на валу.

Для улучшения рассматриваемых процессов потребовалась разработка способов управления, которые обеспечивают ограничение динамических моментов электромеханических систем горизонтальной клетки. В качестве основных направлений приняты [17]:

1. Разработка способа управления, обеспечивающего предварительный выбор зазоров (люфтов) в шпиндельных соединениях перед захватом металла. Этот способ реализуется за счет бес-

## Расчет и конструирование

печения захвата металла в режиме ускорения электропривода. В направлении решения данной задачи авторами предложен принцип упреждающей коррекции скоростей, обеспечивающий компенсацию динамического снижения скорости электропривода валков широкополосного стана горячей прокатки [18].

2. Разработка способа управления, обеспечивающего компенсацию динамической ошибки регулирования (просадки) скорости и исключение перерегулирования момента двигателя. Это достигается за счет опережающего увеличения скорости электропривода на величину динамической просадки.

Каждый из этих способов реализован в виде алгоритмов автоматизированной системы управления (АСУ) реверсивной клетки и прошел опытно-промышленные испытания на стане 5000. Результаты, подтвердившие техническую эффективность способов, представлены в [17, 19]. Основным недостатком, выявленным при экспериментальных исследованиях, является несогласованность алгоритмов управления, реализующих эти способы. Сигналы на предварительное ускорение электропривода и на увеличение скорости для компенсации динамической ошибки подаются в моменты времени, которые устанавливаются независимо друг от друга. Это приводит к наложению переходных процессов и ухудшению качества регулирования.

В связи с изложенным поставлена задача разработки способа управления электроприводами горизонтальных валков, который обеспечит согласование алгоритмов управления, обеспечивающих предварительный выбор зазоров в шпиндельных соединениях и компенсацию перерегулирования момента двигателя в режиме захвата заготовки.

В качестве методов исследований приняты математическое моделирование и экспериментальные исследования на стане.

### 2. Основная часть

**Разработка способа управления.** Разработанный способ по существу является результатом объединения преимуществ названных способов выбора люфтов в валопроводах и опережающего увеличения скорости перед захватом на величину динамической ошибки ее регулирования. Суть способа поясняется графиком формирования задания скорости электропривода, представленным на рис. 3, а. Он включает выполнение следующих операций:

- до захвата металла валками в интервале  $t_1-t_2$  осуществляется повышение скорости электропривода на величину, компенсирующую динамическое снижение скорости при захвате;
- момент  $t_1$  начала ускорения и длительность интервала  $t_1-t_2$  рассчитываются таким образом, чтобы захват металла осуществлялся на участке ускорения электропривода, что обеспечивает гарантированный выбор зазоров в шпиндельных соединениях;
- после входа металла в клеть в момент  $t_2$  дополнительно увеличенная скорость снижается на величину полученного приращения, после чего (в соответствии с технологией) в интервале  $t_2-t_3$  происходит ускорение от заправочной до рабочей скорости.

На рис. 3, б представлена функциональная схема системы управления, реализующей данный способ. Отличием системы является наличие блока расчета и управления компенсацией просадки скорости. Величина компенсации рассчитывается в модели 2-го уровня по ожидаемому моменту электропривода и характеристикам системы регулирования скорости. Для определения сигнала компенсации предварительно получена экспериментальная зависимость динамической просадки скорости от момента нагрузки. По этой характеристике определяется коэффициент динамической жесткости электромеханической системы.

Согласно тахограмме (см. рис. 3, а) увеличение скорости в интервале  $t_1-t_2$  до захвата металла валками осуществляется с заданным темпом. Скорость в момент захвата получает приращение, необходимое для компенсации динамической просадки. Это является принципиальным отличием предложенного способа. Благодаря указанному отличительному признаку не нужно формировать отдельно сигнал на ускорение для выбора люфтов.

Для формирования добавочной скорости используется дополнительный задатчик интенсивности (ЗИ подрагона, рис. 3, б), выходной сигнал которого суммируется с сигналом с выхода интерполятора. Темп дополнительного ускорения установлен экспериментально и составляет  $0,22 \text{ м/с}^2$ . Алгоритм системы реализован программным путем в управляющем контроллере клетки. Для определения момента начала ускорения используется информация, поступающая из системы слежения за металлом на рольгангах.

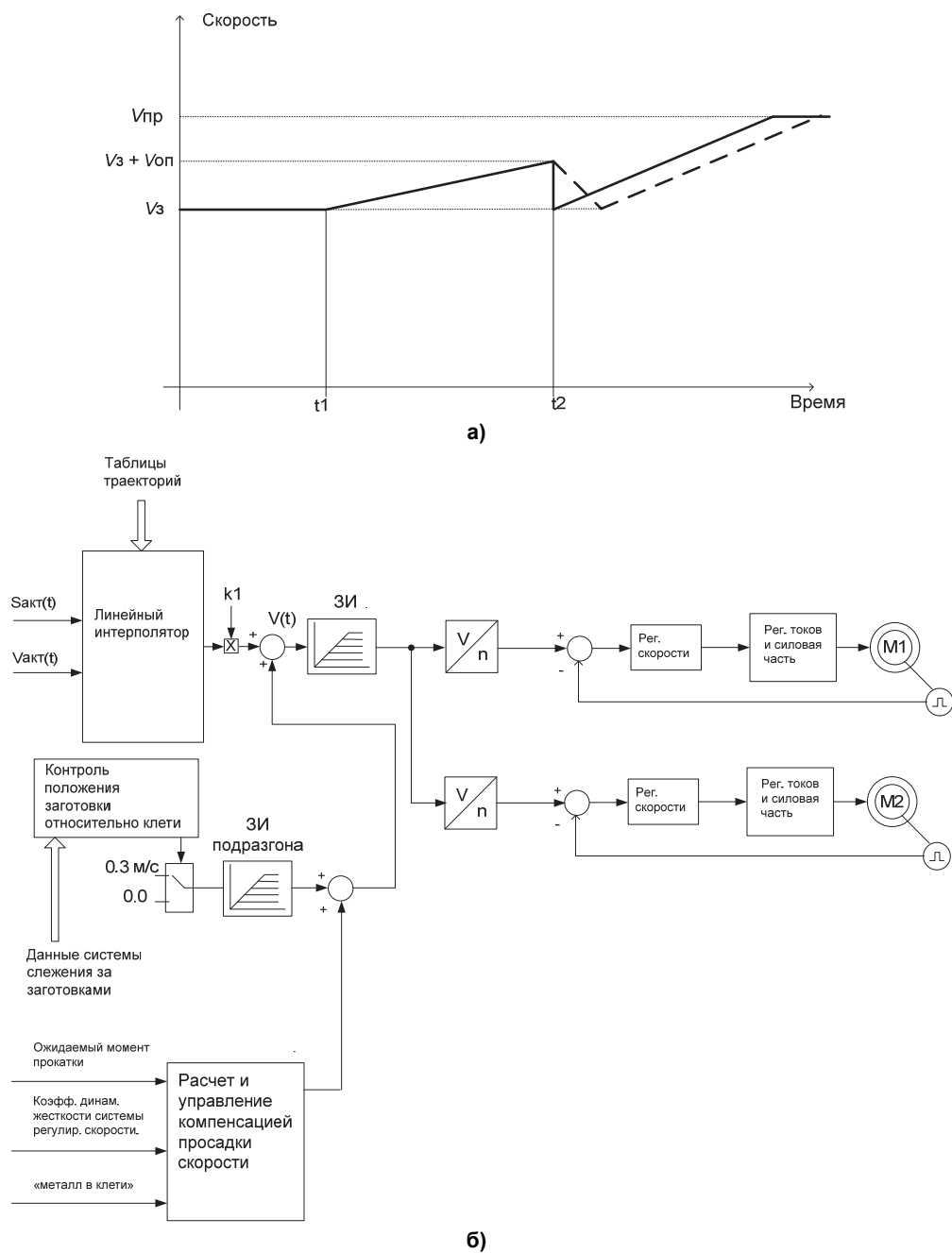


Рис. 3. Заданная тахограмма скорости электропривода (а) и функциональная схема разработанной системы управления (б)

Пояснения для вычисления расстояния от головного участка заготовки до клетки, необходимого для достижения требуемой скорости к моменту захвата, показаны на тахограмме (см. рис. 3, а). По известным значениям заправочной скорости  $V_z$  и скорости опережения  $V_{оп}$  вычисляется требуемое ускорение  $V_{оп}/(t_2 - t_1)$ . Исходя из этого рассчитывается расстояние от «головы» заготовки до клетки, при достижении которого начинается подразгон:

$$S = V_z(t_2 - t_1) + 0,5V_{оп}(t_2 - t_1).$$

При поступлении сигнала «Данные системы слежения за заготовками» о подходе заготовки на расстояние  $S$  подается управляющий сигнал на вход ЗИ подразгона. После захвата металла задание на подразгон обнуляется.

С целью оценки технической эффективности внедрения способа разработана математическая модель электромеханической системы с упругой связью, описывающая динамические процессы в валопроводах клетки стана 5000 [20].

## Расчет и конструирование

**Характеристика математической модели.** Электропривод каждого валка клетки толстолистого стана выполнен индивидуальным. В механических соединениях отсутствуют устройства, обладающие инерцией (массой), соизмеримой с инерцией двигателя и приведенной инерцией рабочих и опорных валков. Поэтому электромеханическая система валков принята как двухмассовая с упругой связью и зазором в механических соединениях [21]. Кинематическая схема системы «двигатель – валок», разработанная в соответствии с этими условиями, представлена на рис. 4, а.

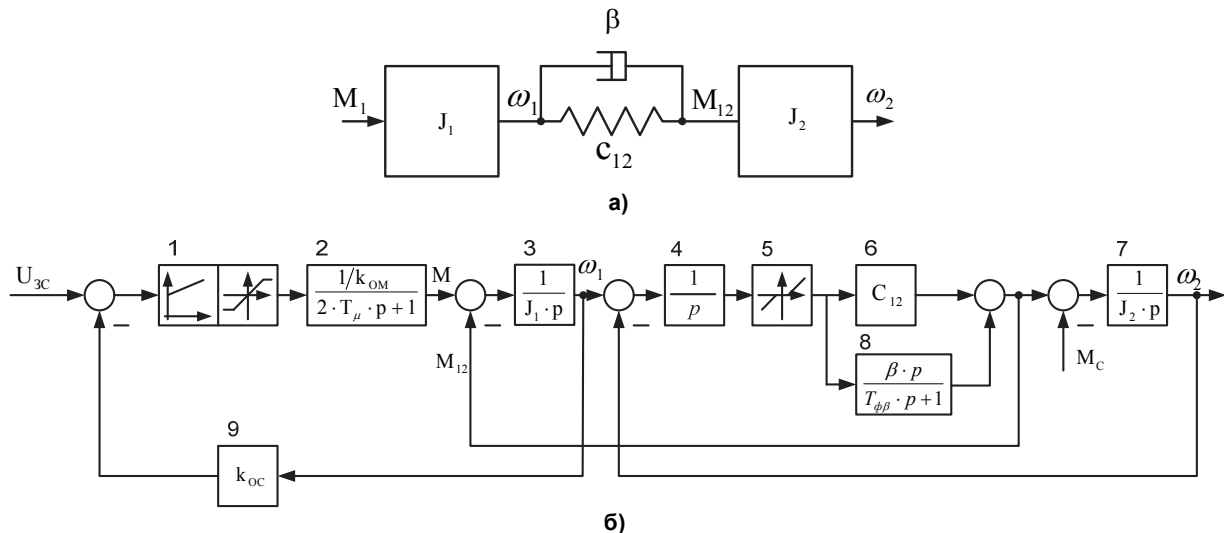


Рис. 4. Кинематическая схема механической передачи (а) и структурная схема двухмассовой электромеханической системы (б)

Приняты обозначения:  $J_1 = J_{ДВ}$  – момент инерции первой массы (двигателя);  $J_2$  – приведенный момент инерции второй массы (рабочего и опорного валков, промежуточных валов и т. д.);  $c_{12}$ ,  $M_{12}$  – жесткость и момент упругой связи;  $\beta$  – показатель затухания;  $M_1$ ,  $\omega_2$  – момент на входе и угловая скорость на выходе системы.

Структурная схема модели представлена на рис. 4, б. Блоки 3, 5–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы [22]. Блок 4 определяет характер переходных процессов в механической части, в том числе естественное затухание колебаний, блок 5 моделирует зазоры в механических передачах. Для обеспечения устойчивости расчета в блок интегрирования 8 введен фильтр с постоянной времени 1 мс. Обратная связь по скорости моделируется блоком 9 с коэффициентом  $k_{oc}$ .

Передаточная функция замкнутой системы механической части при пренебрежении нелинейностью, вызванной зазором в передачах,

$$W_{3M}(p) = \frac{c_{12} \cdot W(p)}{c_{12} \cdot W(p) + J_1 \cdot p}.$$

Для ее определения проведены экспериментальные исследования, которые показали, что изменения скорости электропривода при отключении имеют характер затухающих колебаний. Поэтому данная система должна моделироваться колебательным звеном второго порядка:

$$W_{3M}(p) = \frac{1}{T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot p + 1}.$$

Отсюда передаточная функция блока 4

$$W(s) = \frac{J_1}{T_1^2 \cdot c_{12} \cdot p + 2 \cdot T_1 \cdot \xi \cdot c_{12}}.$$

Параметры всех звеньев системы определены по данным электрооборудования и осциллограммам, полученным на стане. В модели принимается, что контур регулирования момента настроен на технический оптимум. Поэтому для упрощения анализа процессов в механической части он представлен апериодическим звеном первого порядка (блок 2). Контур регулирования ско-

рости настроен на симметричный оптимум с пропорционально-интегральным регулятором скорости (блок 1). Так как при работе электропривода необходимо ограничение момента, на его выходе установлен блок ограничения с изменяемыми пределами.

**Исследования методом математического моделирования.** Выполнялся сравнительный анализ следующих режимов:

1. Проектный режим, при котором захват осуществляется на установившейся заправочной скорости.

2. Режим предварительного выбора люфтов, когда электропривод предварительно разгоняется с заданным ускорением для замыкания зазоров в механических передачах.

3. Режим, реализующий разработанный комбинированный способ ограничения динамического момента за счет ускорения и компенсации динамической ошибки.

На рис. 5 приведены графики изменения сигнала задания скорости (окно 1), актуальной скорости (окно 2) и момента (окно 3) электропривода (ЭП). Обозначения кривых соответствуют номерам сравниваемых режимов. Захват металла валками происходит в момент времени 2,25 с.

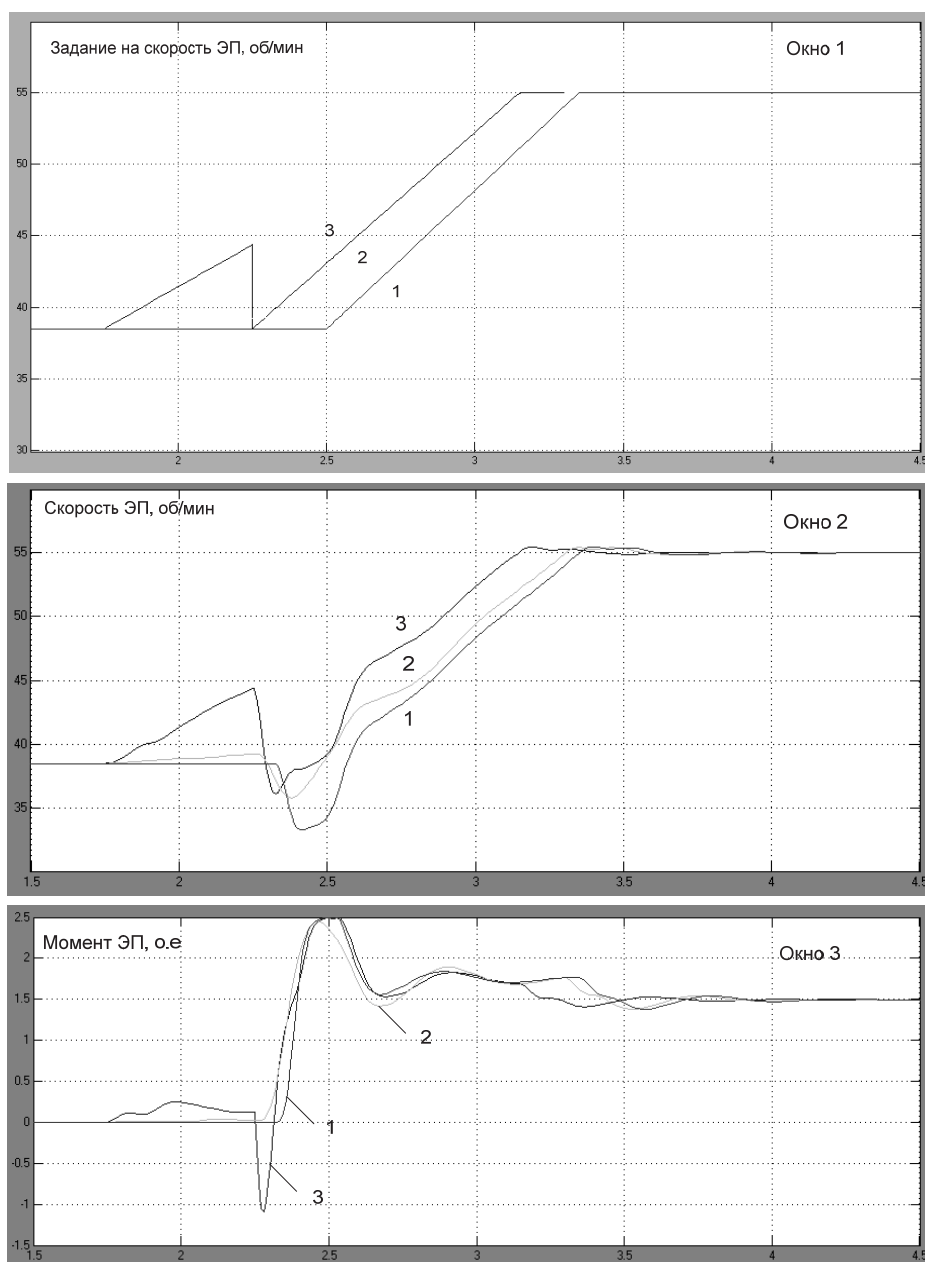


Рис. 5. Переходные процессы при сравнении способов компенсации динамических моментов

## Расчет и конструирование

Анализ графиков показал, что динамическая просадка скорости в первом режиме составляет 13 %, во втором – 5,2 %, в третьем – 18 % исходных значений скорости перед захватом. При этом в третьем случае скорость после сброса приращения практически соответствует скорости до захвата. Таким образом, благодаря компенсации динамической ошибки обеспечивается уменьшение просадки скорости при захвате практически до нуля.

Если рассматривать переходные процессы момента, то в первом и третьем случаях регулятор скорости входит в насыщение, перерегулирование момента достигает предельного значения. Кроме того, в третьем случае наблюдаются значительные знакопеременные колебания момента непосредственно после захвата. Существенным недостатком этого варианта также являются значительные отклонения кривой 3 скорости от заданной тахограммы (от кривой 1 в окне 1). При внедрении это потребует постоянной перенастройки вспомогательных механизмов.

**Совершенствование алгоритма управления.** В связи с указанными недостатками предложен усовершенствованный алгоритм управления, согласно которому снижение задания скорости в момент захвата предлагается осуществлять не скачком, как это показано на тахограмме (см. рис. 3, а), а с заданным регулируемым темпом (отрицательным ускорением). Этот вариант поясняется с помощью расчетных кривых, представленных на рис. 6.

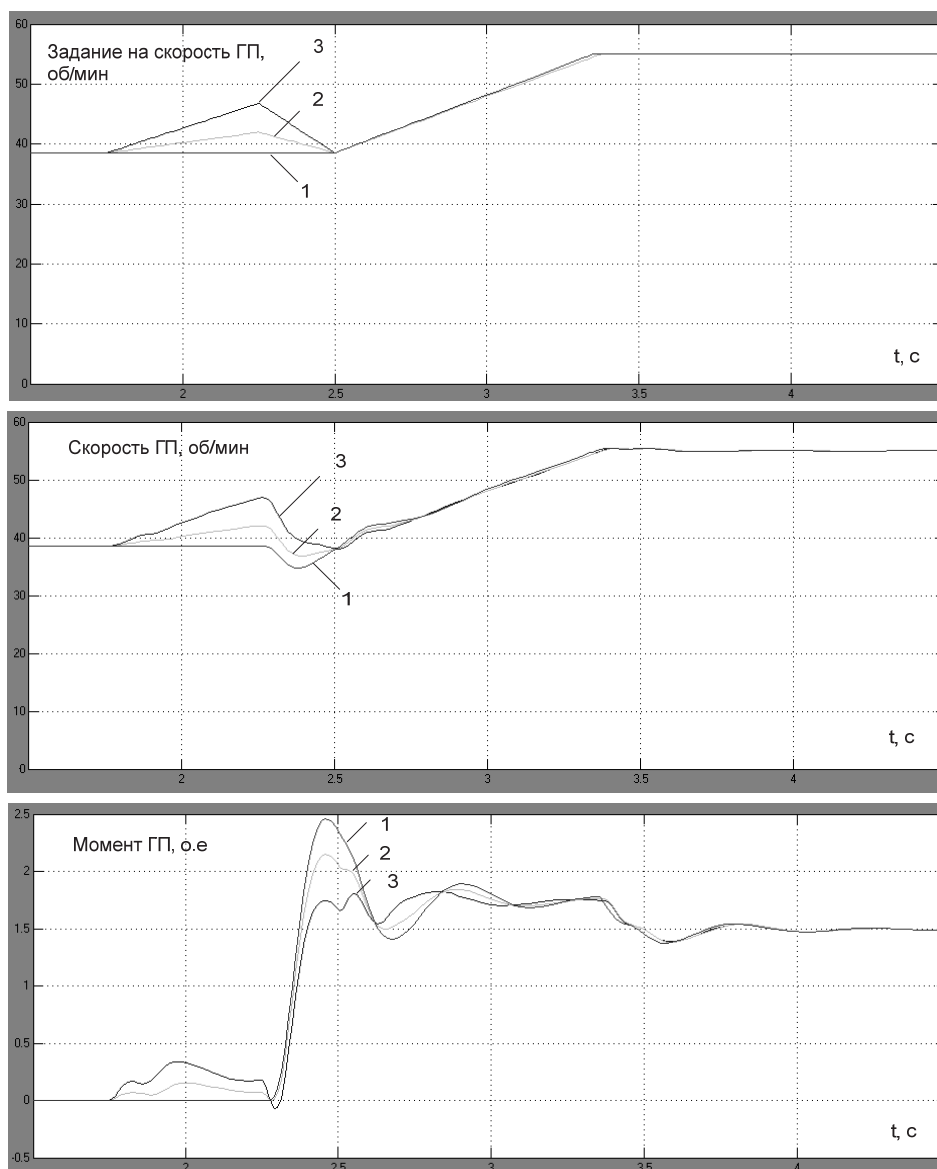


Рис. 6. Компенсация динамического момента при различных отрицательных ускорениях после захвата



На графике 1 в окне 1 ускорение до рабочей скорости начинается через 0,25 с после захвата, который, как и в предыдущем случае, происходит в момент времени 2,25 с. В предлагаемом варианте после захвата металла валками происходит замедление электропривода с заданным отрицательным ускорением. Положительный эффект заключается в том, что при торможении электропривода возникает отрицательный динамический момент, который частично компенсирует динамический момент, возникающий при захвате металла валками. В результате перерегулирование момента уменьшается на величину, зависящую от темпа замедления электропривода. Это подтверждают зависимости 2 и 3, рассчитанные при различных темпах ускорения и замедления, причем положительные и отрицательные ускорения для каждого графика не совпадают. Кривые с индексом 2 соответствуют отрицательному ускорению  $-1,5 \text{ с}^{-2}$ , с индексом 3 – ускорению  $-3,5 \text{ с}^{-2}$ .

**Обоснование оптимального темпа замедления после захвата.** Возникает задача обоснования оптимального отрицательного ускорения после захвата металла валками при минимальном перерегулировании момента. Результаты, полученные при моделировании захвата с различными темпами замедления, представлены в виде графиков на рис. 7. Приведены графики изменения просадки скорости (кривая 1) и перерегулирования момента (кривая 2) в зависимости от отрицательного ускорения. До величины углового ускорения  $-3 \text{ с}^{-2}$  происходит интенсивное уменьшение перерегулирования момента. Уменьшение просадки скорости происходит в диапазоне до  $-2,5 \text{ с}^{-2}$ . При дальнейшем увеличении отрицательного ускорения величина просадки незначительно возрастает, а темп уменьшения перерегулирования момента (наклон кривой 2) снижается. Это объясняется тем, что уменьшается первый пик перерегулирования момента, но увеличивает второй пик (кривая 3 в окне 3 на рис. 6), который становится больше, чем первый.

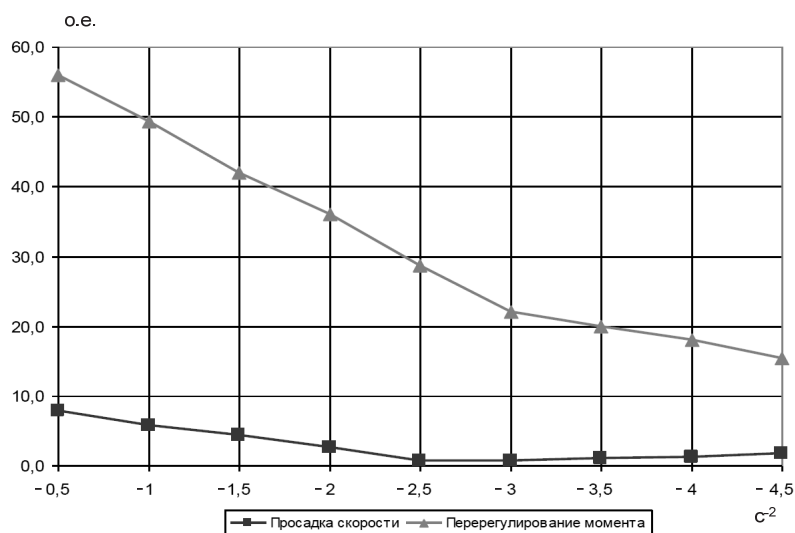


Рис. 7. Зависимости максимального динамического момента и просадки скорости от отрицательного углового ускорения

Как следует из представленных результатов, оптимальным для рассматриваемого электропривода является диапазон отрицательных ускорений от  $-2,5$  до  $-3,5 \text{ с}^{-2}$ . В этом случае просадка скорости минимальна, первый и второй пики момента равны по величине и практически не превышают установившегося значения момента. Для подтверждения сделанного вывода проведены экспериментальные исследования, позволившие учесть особенности реального процесса захвата металла.

**Результаты экспериментальных исследований.** Разработанные алгоритмы управления прошли опытно-промышленные испытания на стане 5000. Проведен комплекс экспериментальных исследований при прокатке листов различного сортамента. На рис. 8 представлены характерные осциллограммы усилия прокатки (окно 1), заданий на скорость, скоростей электроприводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков (окно 2) и моментов двигателей (окно 3). Они получены при реализации усовершенствованного алгоритма управления при одинаковых темпах ускорения и замедления электропривода. Настройка алгоритма выполнена так, что захват металла совпадает с моментом окончания подразгона ( $\sim 1346,15 \text{ с}$ ).

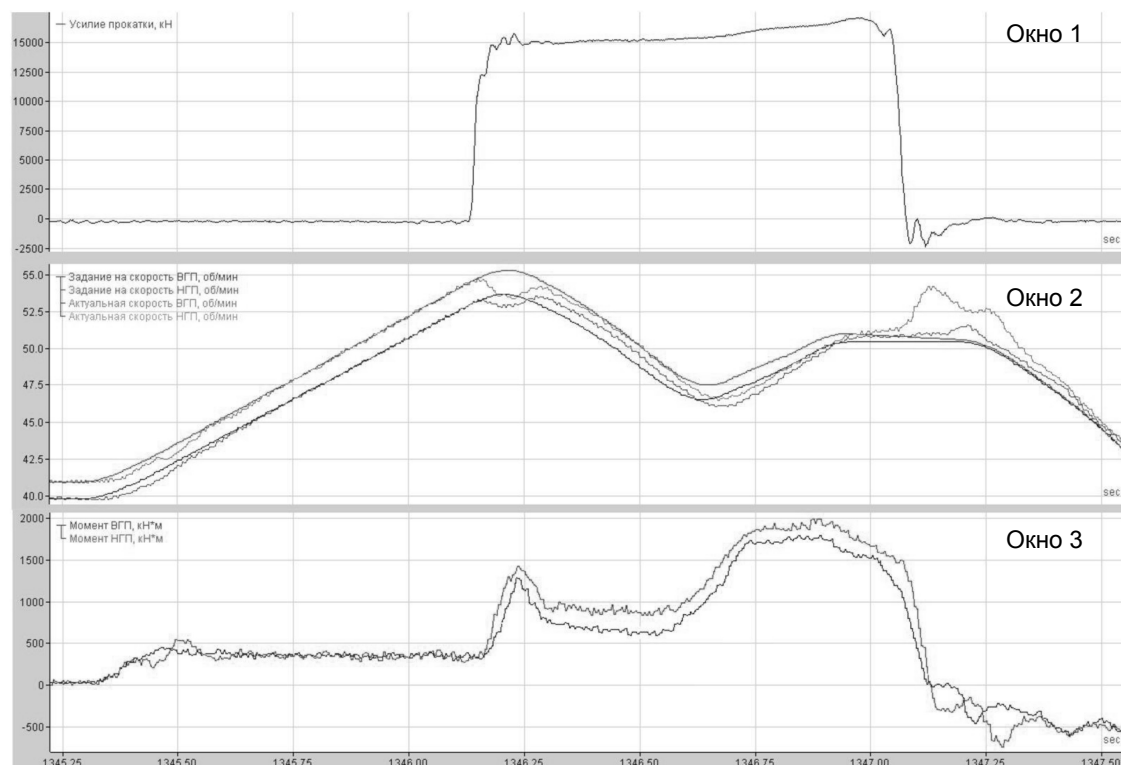


Рис. 8. Осциллограммы прокатки при формировании тахограммы по разработанному способу

Как следует из осциллограмм, перерегулирование моментов при захвате по абсолютной величине значительно меньше значений при последующем разгоне до рабочей скорости в интервале после  $\sim 1346,65$  с. Динамические просадки скорости полностью исключены. Это подтверждает удовлетворительный характер переходных процессов скорости и момента при их значительном улучшении по сравнению с аналогичными процессами в существующей системе.

### Обсуждение результатов

Достоверность сделанных выводов подтверждена результатами длительных экспериментальных исследований, выполненных на стане 5000. Вместе с тем при реализации предложенного способа следует учитывать ограничения, вносимые задатчиком интенсивности скорости ЗИ (см. рис. 3, б). При формировании задания на скорость осуществляется ограничение производной ускорения, что вызывает запаздывание выходного сигнала ЗИ. В результате на рис. 8 возникают «закругления» в верхней части осциллограмм фактуальной скорости. Кроме того, при существующем алгоритме ограничены возможности изменения отрицательного ускорения после захвата. В связи с указанными ограничениями в системе управления скоростными режимами реализован алгоритм, обеспечивающий фиксированный темп замедления после захвата  $-2,2 \text{ с}^{-2}$ , равный ускорению в режиме подразгона. Время ускорения определяется из условия полного закрытия зазора в шпindelных соединениях.

### Заключение

В результате математического моделирования и экспериментальных исследований доказано, что разработанный комбинированный способ ограничения динамических нагрузок за счет предварительного выбора люфтов в валопроводах валков и ограничения динамического момента путем компенсации ошибки регулирования скорости является перспективным для промышленного внедрения. Недостатком способа является отклонение скорости электропривода от заданной при ступенчатом снижении задания на скорость в момент захвата.

С целью устранения указанного недостатка предложен усовершенствованный способ ограничения динамического момента. Его отличительным признаком является снижение задания скорости после захвата с заданным замедлением. Технический эффект заключается в том, что при торможении электропривода возникает отрицательный динамический момент, который полностью или частично компенсирует ударный момент, возникающий при захвате.

В результате моделирования установлено, что оптимальным является снижение скорости электропривода с отрицательным ускорением от  $-2,5$  до  $-3,5$  с<sup>-2</sup>. Подтверждено, что динамические броски момента при захвате практически полностью устраняются. Экспериментальные исследования, выполненные на стане 5000 ПАО «ММК», подтвердили достижение ожидаемых результатов.

Разработанный способ управления рекомендуется для внедрения в электроприводах прокатных станов, работающих с ударным приложением нагрузки. Поскольку все дополнительные операции реализуются в алгоритмах АСУ второго уровня, род тока электропривода и принцип построения системы управления не являются ограничениями для применения способа.

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

### Литература

1. Bass, G.V. Minimum tension control in finishing train of hot strip mills / G.V. Bass // *Iron and steel Engineer*. – 1987. – No. 11. – P. 48–52.
2. Bhowal, P. Modeling and Simulation of Hydraulic Gap Control System in a Hot Strip Mill / P. Bhowal, S.K. Mukherjee // *ISIJ International*. – 1996. – Vol. 36, no. 5. – P. 553–562.
3. Fukushima, K. Looper optimal multivariable control for hot strip finishing mill / K. Fukushima // *Trans. Iron and Steel Inst. Japan*. – 1988. – No. 6. – P. 463–469.
4. Tanimoto, S. New tension measurement and control system in hot strip finishing mill / S. Tanimoto, Y. Hayashi, M. Saito // *Measurement and control instrumentation in the iron and steel industry – Proceedings of the 5th process technology conference*. – Detroit, 1985. – P. 147–154.
5. Finishing mill tension control system in the Mizushima hot strip mill / K. Hamada, S. Ueki, M. Shitomi et al. // *Kawasaki steel technical report*. – 1985. – No. 11. – P. 35–43.
6. System for Speed Mode Control of the Electric Drives of the Continuous Train of the Hot-Rolling Mill / V.R. Khramshin, A.S. Evdokimov, G.P. Kornilov et al. // *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2015)*. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147264
7. Algorithm of No-Pull Control in the Continuous Mill Train / V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev et al. // *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2015)*. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147263
8. 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
9. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill / V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov et al. // *Metallurgist*. – 2015. – Vol. 59. – No. 3–4. – P. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8
10. Automatic Tension Control in the Continuous Roughing Train of a Wide-Strip Hot-Rolling Mill / I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev et al. // *Metallurgist*. – 2017. – Vol. 61, no. 5–6. – P. 366–374. DOI: 10.1007/s11015-017-0502-0
11. Method of Reduction of an Edging and Horizontal Rolls Electromechanical Systems Interrelation in Universal Stand of a Rolling Mill / V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, A.G. Shubin // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1761–1767. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.710
12. Force limiting at roll axial shifting of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1780–1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713
13. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, A.A. Radionov et al. // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1753–1750. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709
14. Крисанов, А.Ф. Анализ причин аварий оборудования листопрокатных станов и меры по их предупреждению: обзор, информ. / А.Ф. Крисанов, В.Ф. Кузрман, Б.Н. Виноградов и др. – М.: Ин-т «Черметинформация», 1985. – С. 36.

15. Веренев, В.В. Состояние вибрационной диагностики и мониторинга оборудования прокатных станков / В.В. Веренев, В.И. Большаков // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2006. – Вып. 12. – С. 267–281.*

16. Евдокимов, С.А. Телеметрическая система измерения упругого момента в шпинделях рабочих валков горизонтальной клетки стана 5000 / С.А. Евдокимов, А.И. Халько, А.М. Дорофеев // *Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. – 2015. – Вып. 2. – С. 375–382.*

17. *Method limiting dynamic loads of electromechanical systems of plate mill stand / A.S. Karandaev, V.R. Gasiyarov, E.A. Maklakova et al. // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018. – P. 651–656. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317180*

18. *Khramshin, V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands / V.R. Khramshin // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Т. 84. no. 4. – P. 221–227. DOI: 10.3103/S1068371213040032*

19. *Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev et al. // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. – 2018. – Vol. 18, no. 1. – P. 101–111. DOI: 10.14529/power180109*

20. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолиствого прокатного стана / С.Н. Басков, В.П. Гасияров, Б.М. Логинов и др. // *Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 55–64.*

21. Математическое описание главного электропривода толстолиствого стана 5000 горячей прокатки / В.П. Гасияров, Е.А. Маклакова // *Russian Internet Journal of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 2, no. 3. – С. 62–66.*

22. *Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 760 с.*

**Гасияров Вадим Рашитович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, [gasiyarovvr@susu.ru](mailto:gasiyarovvr@susu.ru).

*Поступила в редакцию 21 мая 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/engin190201

## METHOD FOR DYNAMIC LOAD LIMITATION AT MECHATRONIC SYSTEMS OF THE PLATE MILL STAND

**V.R. Gasiyarov**, [gasiyarovvr@susu.ru](mailto:gasiyarovvr@susu.ru)

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The paper forms the rationale for relevance of developing control systems ensuring limitation of dynamic torques in electric drives of the reversing plate mill stand at shock loading. Control algorithms are presented, which provide for preliminary selection of gaps in spindle joints and compensation of the dynamic error of speed maintenance at metal pickup. The electric drive control method, which comprises advantages of all these solutions, is developed. The functional diagram of the control system, which illustrates the method, is presented. The math model of the electromechanical cylinder system is developed, which considers elastic coupling in transmissions. The results of modeling the transient processes of the electric drive speed and torque at pickup when implementing the current and new control methods, are presented. The enhanced control algorithm is proposed; according to it, speed decrease after the pickup goes with the pre-set negative acceleration. Results of modeling which proved technical efficiency of the algorithm, are given. According to the modeling results, the optimal pace of electric drive slowdown was rationalized. Oscillograph charts of speeds and torques of the electric drives of the plate mill 5000 stand, obtained when implementing the developed method, are presented. After long-term

studies, the improvement of dynamic parameters against the existing electric drive system was confirmed. The conclusion was made on the reasonability of implementing of the introduced solutions.

*Keywords:* plate mill, mill stand, electric drive, dynamic loads, limitation, method, dynamic model, math modeling, pilot study, recommendations.

### References

1. Bass G.V. Minimum Tension Control in Finishing Train of Hot Strip Mills. *Iron and Steel Engineer*, 1987, no.11, pp. 48–52.
2. Bhowal P., Mukherjee S.K. Modeling and Simulation of Hydraulic Gap Control System in a Hot Strip Mill. *ISIJ International*, 1996, vol.36, no. 5, pp. 553–562. DOI: 10.2355/isijinternational.36.553
3. Fukushima K. Looper Optimal Multivariable Control for Hot Strip Finishing Mill. *Trans. Iron and Steel Inst. Jap.*, 1988, no. 6, pp. 463–469. DOI: 10.2355/isijinternational1966.28.463
4. Tanimoto S., Hayashi Y., Saito M. New Tension Measurement and Control System in Hot Strip Finishing Mill. *Measurement and control instrumentation in the iron and steel industry – Proceedings of the 5th process technology conference*, Detroit. 1985, pp. 147–154.
5. Hamada K., Ueki S., Shitomi M., Doi K., Ishikawa K., Okuda T. Finishing Mill Tension Control System in the Mizushima Hot Strip Mill. *Kawasaki Steel Technical Report*, 1985, no. 11, pp. 35–43.
6. Khrumshin V.R., Evdokimov A.S., Kornilov G.P., Radionov A.A., Karandaev A.S. System for Speed Mode Control of the Electric Drives of the Continuous Train of the Hot-Rolling Mill. *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*. 2015, Paper 15287524. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147264
7. Khrumshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Andryushin I.Yu., Shubin A.G. Algorithm of No-Pull Control in the Continuous Mill Train. *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*. 2015, Paper: 15287546. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147263
8. 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, Paper: 14823128. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986841
9. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, no. 3-4, pp. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8
10. Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N., Radionov A.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Khrumshin V.R. Automatic Tension Control in the Continuous Roughing Train of a Wide-Strip Hot-Rolling Mill. *Metallurgist*, 2017, vol. 61, no. 5–6, pp. 366–374. DOI: 10.1007/s11015-017-0502-0
11. Khrumshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Shubin A.G. Method of Reduction of an Edging and Horizontal Rolls Electromechanical Systems Interrelation in Universal Stand of a Rolling Mill. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1761–1767. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.710
12. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Khrumshin V.R. Force Limiting at Roll Axial Shifting of Plate Mill. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1780–1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713
13. Karandaev A.S., Loginov B.M., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1753–1750. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709.
14. Krisanov A.F., Kuzerman V.F., Vinogradov B.N. *Analiz prichin avariyy oborudovaniya listoprokatnykh stanov i mery po ikh preduprezhdeniyu: obzor, inform* [Analysis of Reasons for Equipment Outage on Plate Mills. Review. Moscow, Chermetinformatiya Institute Publ., 1985. 36 p.
15. Verenev V.V., Bolshakov V.I. [The Status of Vibration Diagnostics and Plate Mill Equipment Monitoring. Fundamental and Practical Problems of Iron Industry]. *Collection of Studies. Institute of Ferrous Metallurgy. Dnepropetrovsk, Ukraine*, 2006, vol. 12, pp. 267–281. (in Russ.)
16. Evdokimov S.A., Khalko A.I., Dorofeev A.M. [Telemetric System for Measuring Elastic Torque in Spindles of Working Rolls of the Mill 5000 Horizontal Stand]. *Energy and Electrotechnical Systems. International Collection of Studies*, 2015, vol. 2, pp. 275–382. (in Russ.)

## Расчет и конструирование

---

17. Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A., Loginov B.M., Khramshina E.A. Method Limiting Dynamic Loads of Electromechanical Systems of Plate Mill Stand. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 651–656. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317180

18. Khramshin V.R. Ways to Compensate for Static Deviations in Speed in Electric Drives of Broad-Strip Hot Rolling-Mill Stands. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 4, pp. 221–227. DOI: 10.3103/S1068371213040032

19. Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Baskov S.N., Loginov B.M. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 101–111. DOI: 10.14529/power180109

20. Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khramshin V.R., Odintsov K.E. Development of the Math Model of Interrelated Electrotechnical Systems of the Broad-Strip Mill Stand. *Izvestiya vuzov. Electromekhanika*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 55–64. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-6-55-64

21. Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. [Mathematic description of the main electric drive of the broad-strip hot-rolling mill 5000]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 62–66. (in Russ.)

22. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of Electric Drives]. Moscow, Energoatomizdat, 2001, 760 p.

*Received 21 May 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гасияров, В.Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолистого прокатного стана / В.Р. Гасияров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 5–18. DOI: 10.14529/engin190201

### FOR CITATION

Gasiyarov V.R. Method for Dynamic Load Limitation at Mechatronic Systems of the Plate Mill Stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 5–18. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190201

---