

Шубин А.Г.<sup>1</sup>, Логинов Б.М.<sup>1</sup>, Гасияров В.Р.<sup>2,3</sup>, Маклакова Е.А.<sup>3</sup><sup>1</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

## ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

Приведена характеристика реверсивной клетки «кварто» толстолистового стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). В результате экспериментальных исследований, выполненных на стане, подтверждено значительное превышение динамических моментов электроприводов верхнего и нижнего валков при захвате металла над установившимися значениями. Определены основные причины неудовлетворительных переходных процессов, подтверждена целесообразность разработки способов управления электроприводами, обеспечивающих снижение нагрузок и ограничение колебаний момента при захвате. Предложен способ управления электроприводами, обеспечивающий снижение перегрузки момента за счет предварительного выбора зазора в шпindelных соединениях. Рассмотрен способ компенсации динамической ошибки регулирования скорости за счет дополнительного увеличения скорости перед захватом. В результате сравнительного анализа осциллограмм моментов и скоростей электроприводов подтверждено улучшение динамических показателей при реализации предложенных алгоритмов управления. Представлен способ управления электроприводами валков и гидравлическими нажимными устройствами, обеспечивающий улучшение условий захвата за счет предварительного увеличения межвалкового зазора. Приведены осциллограммы скоростей и моментов при различных вариантах задания на изменение положения нажимных устройств. Установлено, что добиться желаемого ограничения динамического момента удается не во всех случаях. Отмечена необходимость проведения исследований методами математического моделирования. Даны рекомендации по промышленному внедрению разработанных технических решений.

**Ключевые слова:** толстолистовой прокатный стан, реверсивная клетка, электропривод, динамические нагрузки, ограничение, способы, системы управления, разработка, экспериментальные исследования, внедрение, рекомендации.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования выполнены на примере реверсивной клетки «кварто» стана 5000 ММК, которая является самой мощной прокатной клеткой в Европе. Прокатка проводится в несколько проходов по продольно-поперечной схеме с разбивкой ширины [1]. Клетка оснащена двумя рабочими валками, передающими усилие и мощность электропривода (ЭП) непосредственно на металл. Привод каждого рабочего валка осуществляется собственным синхронным двигателем через универсальные шпиндели [2].

Структурная схема установленной системы задания и регулирования скоростей электроприводов валков показана на **рис. 1**. Траектория прохода формируется программой модели АСУ 2-го уровня по критериям производительности стана и получения нужного температурного режима. При формировании задания на скорость в автоматическом режиме из модели прокатки в контроллер уровня 1 поступает таблица из точек желаемой траектории движения. После интерполяции таблицы сигнал заданной линейной скорости проходит через задатчик интенсивности и преобразуется в задание угловой скорости каждого привода с учетом диаметров валков. Основной темп разгона-торможения формируется интерполятором при отработке заданной траектории. Задатчик интенсивности в схеме служит для аварийного ограничения темпа задания.

Характерным динамическим режимом электромеханических систем реверсивной клетки является удар-

ное приложение нагрузки, происходящее в момент захвата металла. Данный режим сопровождается значительным увеличением момента электродвигателей и упругого момента в валопроводах верхнего и нижнего валков. Это приводит к повреждениям и преждевременному износу электрического и механического оборудования, снижению устойчивости технологического процесса и другим негативным последствиям. Основными видами повреждений деталей в линиях главных ЭП толстолистовых станов, обусловленных динамическими нагрузками, являются поломки рабочих валков по шейкам, разрушение головок шпинделей по зеву, выход из строя подшипников и др. [3, 4].

В настоящее время коллективом Южно-Уральского государственного университета при участии авторов проводятся научные исследования по совершенствованию автоматизированных электроприводов и систем управления прокатных станов [5-9]. В рамках проводимых исследований ставится задача определения наиболее значимых факторов, негативно влияющих на динамические нагрузки в валопроводах и электромеханических системах универсальных клеток. При исследованиях применен комплексный подход, включающий математическое моделирование [10-12] и экспериментальные исследования на станах ПАО «ММК» [13-16]. Это позволило разработать способы и алгоритмы управления, которые могут быть эффективно реализованы в системе ограничения динамического момента [17-19]. Общая информация о разработках, выполненных для стана 5000, представлена в настоящей статье.

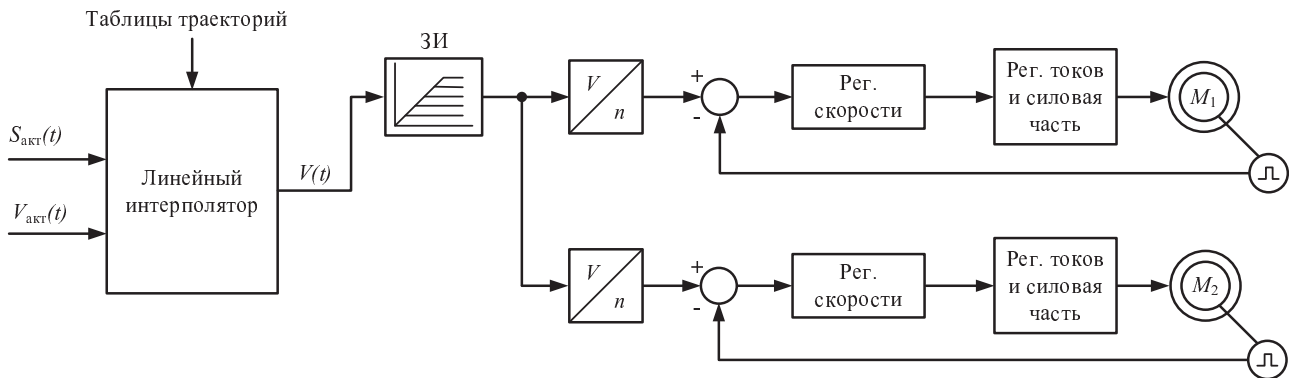


Рис. 1. Схема системы управления скоростью главных ЭП реверсивной клетки стана 5000

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

*Анализ динамических режимов главных ЭП при захвате металла валками горизонтальной клетки*

На рис. 2 представлены осциллограммы скоростей и моментов приводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков в исследуемом динамическом режиме при работе существующей системы регулирования скорости. Перед захватом металла двигатели вращаются с запрошенной скоростью, при этом их крутящий момент близок к нулю и может кратковременно изменять знак. Это приводит к раскрытию зазоров в механических передачах от двигателей к валкам, поэтому в момент захвата металла происходит выбор зазоров с ударом.

Анализ рис. 2 позволил сделать следующие выводы:

1. После захвата металла ЭП разгоняются до рабочей скорости с целью увеличения производительности.
2. Динамическое снижение (просадка) скорости НГП составляет около 18% (от 49 до 40 об/мин); аналогичная просадка скорости ВГП – 17%.
3. Перерегулирование момента составляет 41% (максимальное значение 240% при установившемся

170%). Здесь следует заметить, что значение 240% номинального является максимальным, при котором наступает режим отсечки. Прокатка при моментах, значительно превышающих номинальные (в данном случае 170%), для исследуемой клетки является допустимой.

4. В режиме холостого хода и непосредственно перед захватом возникает знакопеременный момент (происходят колебания около нуля). Это говорит о наличии люфтов в механической передаче. Данный вывод сделан при рассмотрении осциллограмм моментов в увеличенном масштабе.

5. В результате анализа аналогичных осциллограмм, полученных при прокатке листов различного профиля, подтверждено, что амплитуда ударного момента при захвате может превышать установившийся момент прокатки более чем в 2 раза. Также значительные динамические моменты возникают при выходе металла из валков. Это доказывает необходимость разработки способов снижения динамических моментов в валопроводах верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки.

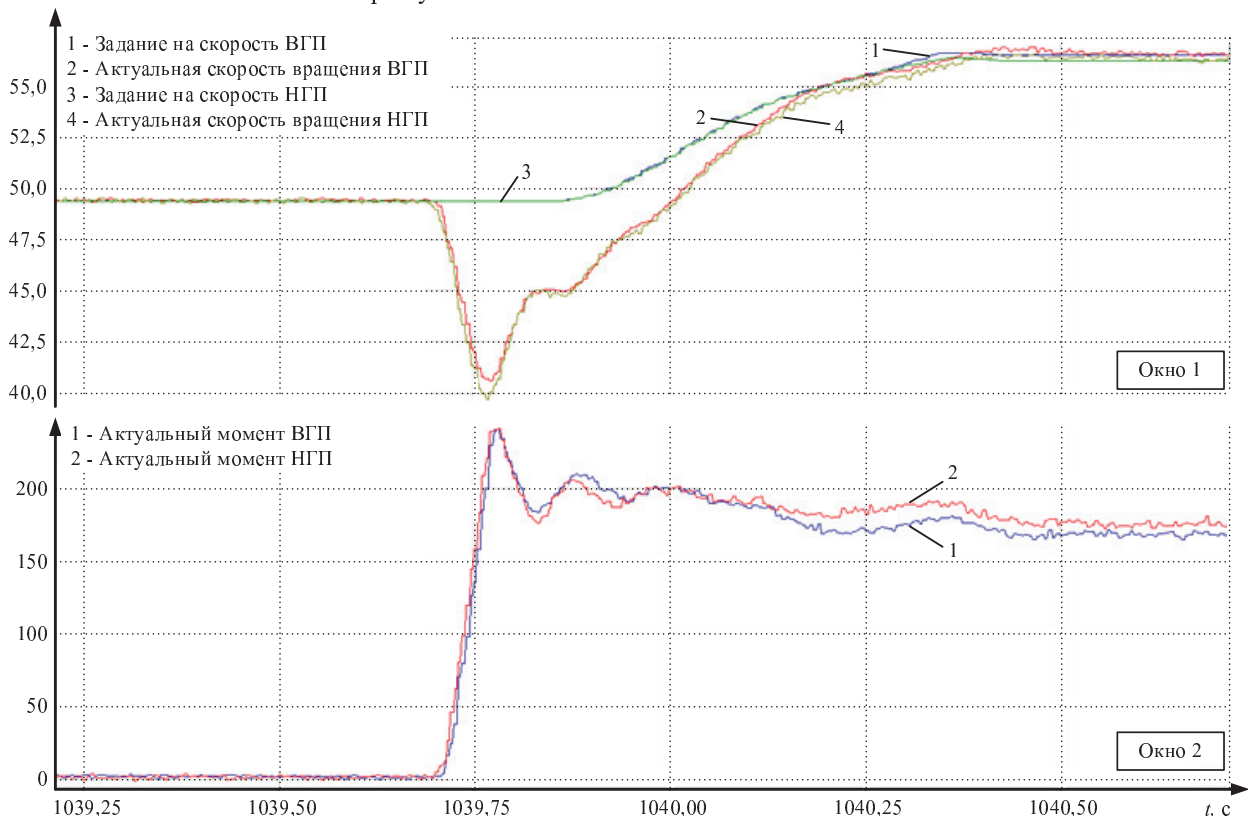


Рис. 2. Переходные процессы при захвате металла валками в существующей системе управления: окно 1 – скорости двигателей главных ЭП, об/мин; окно 2 – крутящие моменты двигателей, % номинальных

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Определение причин, вызывающих ударные нагрузки в валопроводах**

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований выделены следующие причины неудовлетворительных динамических процессов:

1. Выбор зазоров в шпindelных соединениях в момент захвата. При этом величины зазоров не могут контролироваться, но могут быть устранены средствами электропривода.

2. Неудовлетворительные условия захвата, связанные с тем, что зазор валков изначально устанавливается исходя из заданной толщины полосы после прохода. При этом условия захвата во внимание не принимаются.

3. Динамические процессы, вызванные настройкой пропорционально-интегрального регулятора скорости в двухконтурной астатической системе. Известно, что переходные процессы тока, скорости, а следовательно, момента электропривода при такой настройке имеют затухающий характер. Это приводит к возникновению упругих колебаний на валу, что вызывает негативные последствия.

4. Несогласованность скорости входа листа в клеть и линейной скорости вращения валков.

В связи с изложенным ставится задача разработки способов управления, которые обеспечат ограничение динамических моментов электромеханических систем горизонтальной клетки. В качестве основных направлений приняты:

1. Разработка способа управления, обеспечивающего предварительный выбор зазоров (люфтов) в шпindelных соединениях перед захватом металла.

2. Разработка способа управления, обеспечивающего опережающее воздействие на скорость главного ЭП до захвата металла, с целью исключения перерегулирования момента. Это достигается за счет компенсации динамической ошибки регулирования скорости.

3. Разработка способа управления системой

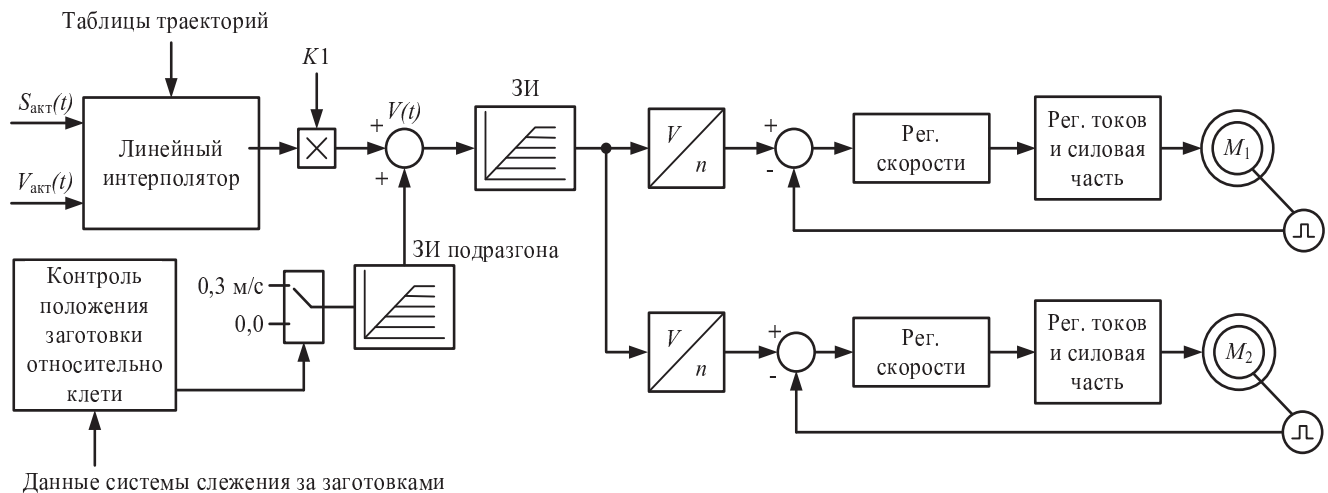
«электропривод горизонтальной клетки – гидравлический привод нажимных устройств», обеспечивающего увеличение межвалкового зазора перед прокаткой с возвращением валков в заданное положение после захвата.

**Способ предварительного выбора люфтов в валопроводах электроприводов клетки**

Упрощенная функциональная схема системы управления, реализующей предварительный выбор люфтов в механических передачах, показана на **рис. 3**. Способ осуществляется за счет захвата металла на участке плавного ускорения (подразгона) электропривода. Для определения момента начала подразгона используется информация из существующей системы слежения за металлом на рольгангах. Для формирования добавочной скорости применяется дополнительный задатчик интенсивности (ЗИ подразгона), выходной сигнал которого суммируется с сигналом с выхода интерполятора. Темп дополнительного ускорения установлен экспериментально и составляет  $0,22 \text{ м/с}^2$ . Схема реализована программным путем в управляющем контроллере клетки.

На **рис. 4** показаны осциллограммы процессов при захвате металла с использованием алгоритма данной системы. До захвата задание скорости линейно нарастает, что создает дополнительный положительный динамический момент. Поэтому знакопеременный момент отсутствует, актуальный момент прокатки до захвата положительный, за счет этого обеспечивается выбор люфтов. Просадка скорости НПП происходит от 38,5 до 33 об/мин, что составляет около 14%.

По сравнению с показателем в существующей системе (см. **рис. 2**) просадка снизилась в 1,3 раза. Перерегулирование момента для НПП составляет 26,4%: максимальное значение 220%, установившееся – 170% номинального. По сравнению с осциллограммами на **рис. 2** его величина снизилась в 1,5 раза. Аналогичное снижение динамического момента происходит для ВПП.



**Рис. 3.** Схема системы управления ЭП с предварительным ускорением валков

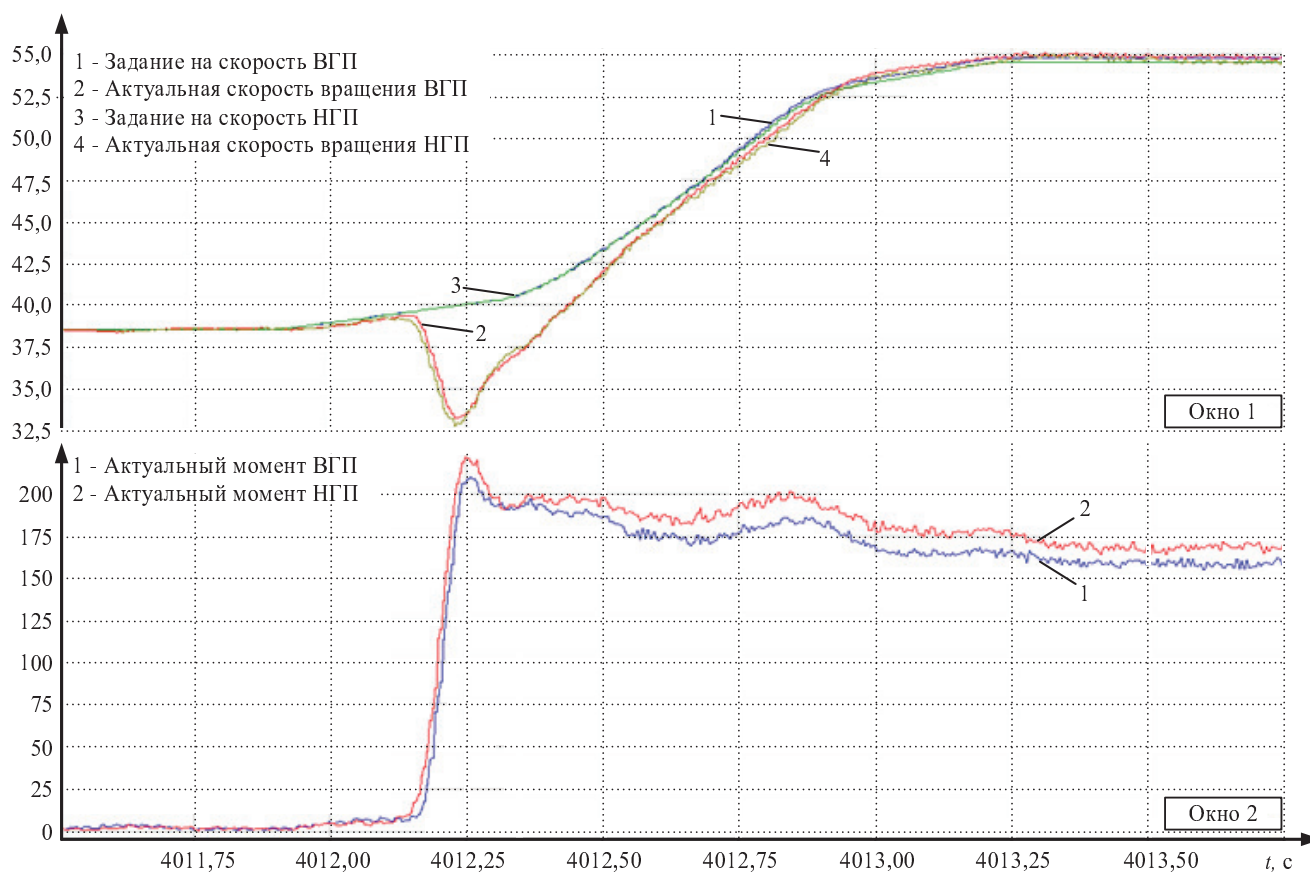


Рис. 4. Захват металла валками с предварительным выбором люфтов

#### Способ компенсации динамической просадки скорости за счет опережающего увеличения скорости

Отличительная особенность способа заключается в компенсации динамической ошибки регулирования скорости главного ЭП посредством упреждающего повышения скорости до захвата. На рис. 5, а показаны осциллограммы скоростей, моментов и усилий прокатки при захвате в существующей системе при прокатке листа «тяжелого» сортамента. Их анализ подтверждает, что в электромеханических системах возникают значительные колебания скорости и момента. Просадка скорости НПП составляет 27% (от 48 до 35 об/мин). Амплитуду динамического момента определить нельзя, т.к. момент превышает уровень насыщения 240%.

Согласно разработанному способу:

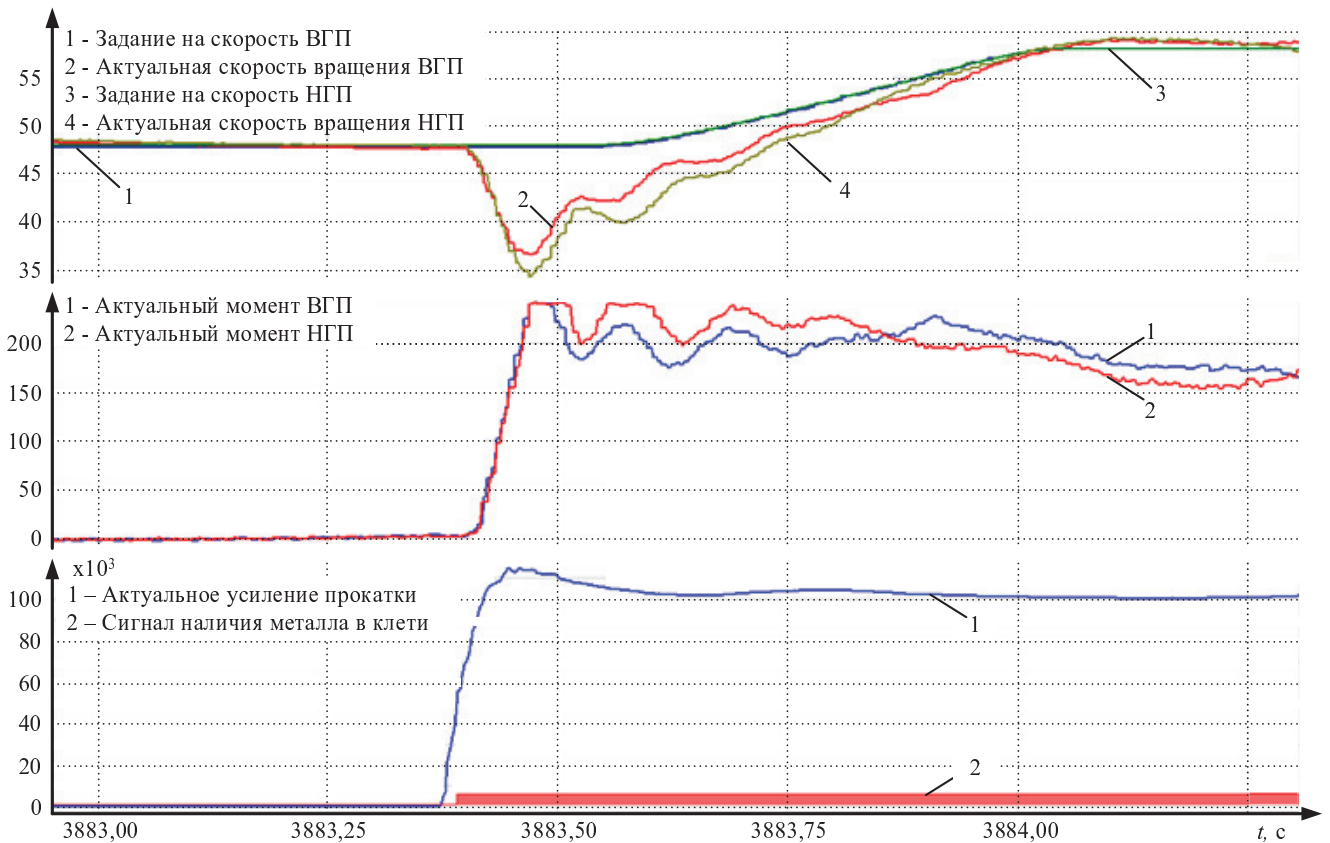
- с целью компенсации динамической просадки, скорость ЭП предварительно увеличивается за счет введения сигнала дополнительной коррекции;
- непосредственно после захвата сигнал коррекции снимается.

Схема системы управления, поясняющей реализацию способа, показана на рис. 6. Отличием является наличие блока расчета и управления компенсацией просадки скорости. Величина компенсации рассчитывается по ожидаемому моменту главного ЭП (рассчитывается моделью прокатки) и характеристикам системы регулирования скорости. Ожидаемый момент прокатки вычисляется в модели 2-го

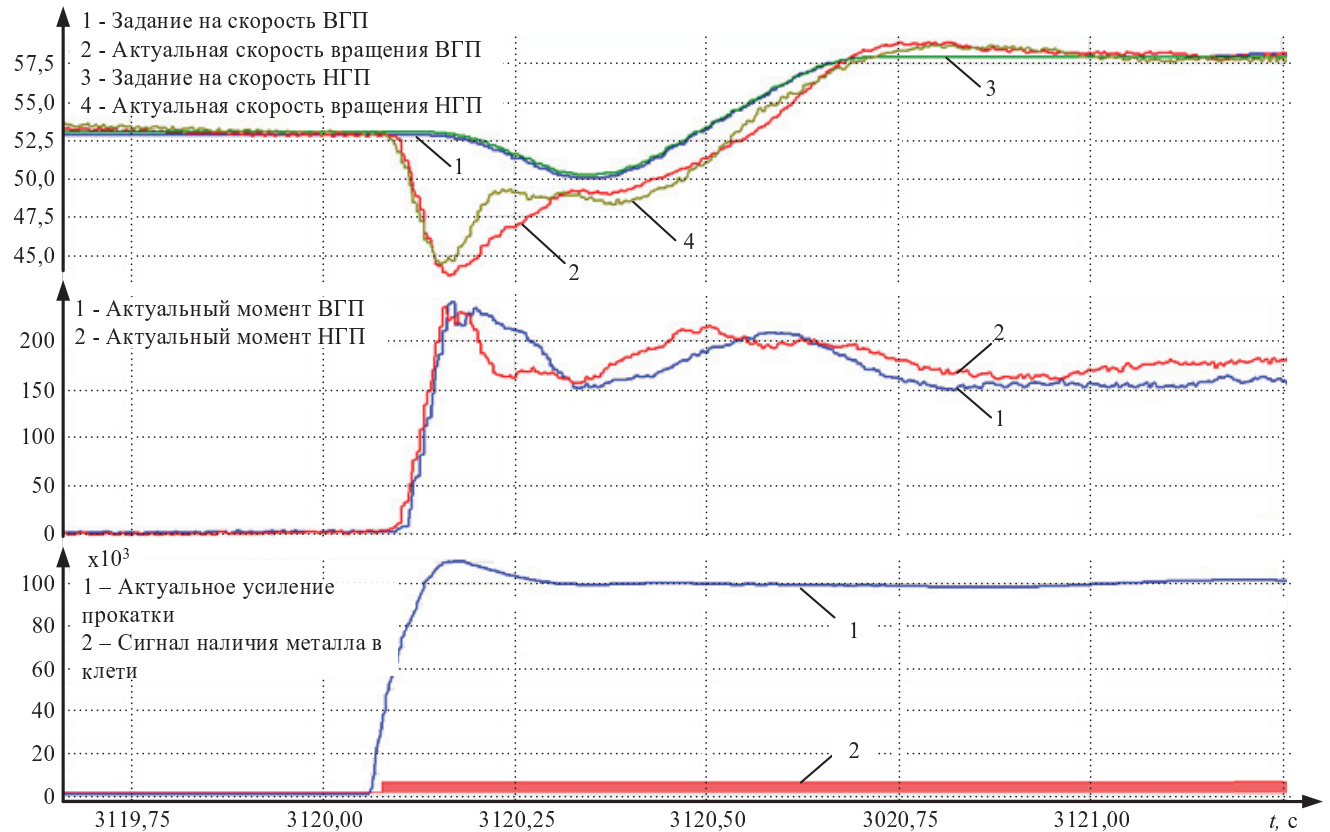
уровня. Для определения сигнала компенсации была предварительно получена экспериментальная зависимость динамической просадки скорости от момента нагрузки. Коэффициент динамической жесткости определялся по наклону этой характеристики. В этом плане разработанный способ является развитием принципа упреждающей коррекции скоростей электроприводов клеток [20] и примера его практической реализации для ЭП постоянного тока, рассмотренного в [21, 22].

На рис. 5, б приведены осциллограммы, полученные при работе рассматриваемой системы. До захвата металла к основному заданию скорости прибавляется расчетная величина (на осциллограмме увеличение скорости не показано). Она компенсирует динамическую просадку при захвате. При появлении усилия прокатки после входа металла в клеть сигнал компенсации динамической просадки вычитается из основного задания скорости, затем происходит разгон до рабочей скорости.

Из осциллограмм следует, что амплитуда колебаний по сравнению с рис. 5, а уменьшилась, а их период увеличился. Кроме того, снизились максимальные величины моментов. Просадка скорости происходит от 52,5 до 44,5 об/мин (на 15%), т.е. снизилась по сравнению с рис. 5, а в 1,8 раза. Амплитуда момента составляет около 41% (240% – максимальное значение, 170% – установившееся). Это подтверждает эффективность практической реализации разработанного способа.



*a*



*б*

Рис. 5. Переходные процессы при захвате: в существующей системе (а) и в системе с предварительной компенсацией динамической просадки скорости (б)

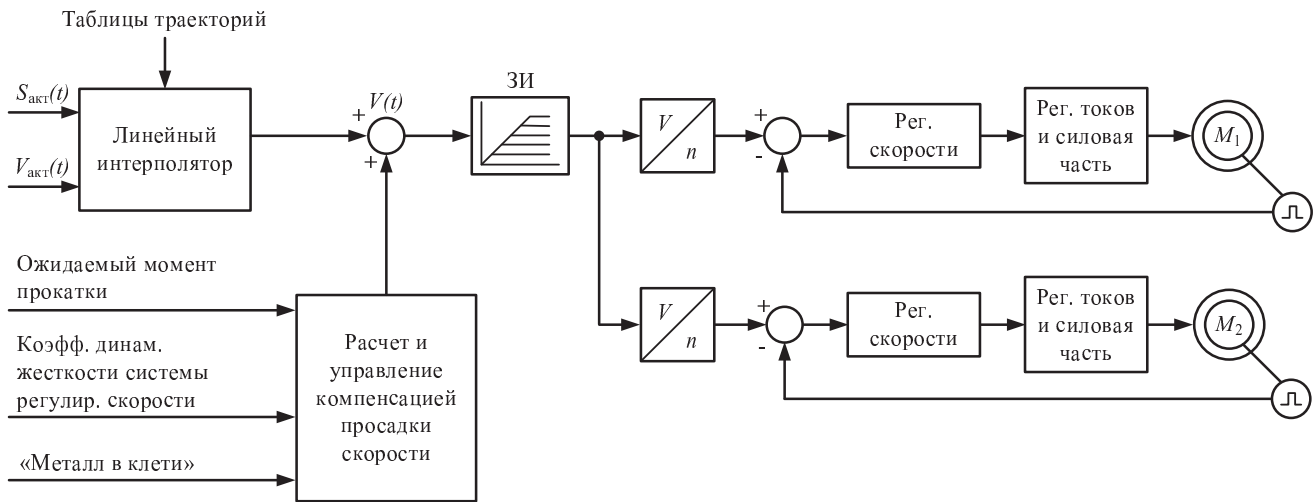


Рис. 6. Структурная схема, поясняющая способ компенсации динамической просадки скорости

**Улучшение условий захвата за счет предварительного увеличения межвалкового зазора**

Прежде чем перейти к рассмотрению разработанного способа, здесь приводятся краткие пояснения к формированию межвалкового зазора с помощью гидравлических и электромеханических нажимных устройств (соответственно ГНУ и ЭМНУ) реверсивной клетки. На рис. 7, а показаны осциллограммы, снятые для случая, когда зазор сразу настроен на требуемую толщину листа на выходе из клетки. Величина зазора при прокатке формируется путем двух независимых воздействий:

- за счет перемещения верхнего вала, осуществляемого путем предварительной установки ЭМНУ (воздействие сверху), например, на зазор 10 мм (на рис. 7 не показан);

- за счет перемещения нижнего рабочего вала гидравлическими нажимными устройствами (НУ) – воздействие снизу, например, на зазор 4,4 мм на рассматриваемом рисунке.

Таким образом, межвалковый зазор до захвата составляет 14,4 мм, но на рис. 7, а показана только его изменяемая часть, которая формируется за счет перемещения гидравлических НУ. Поэтому применяются термины «Актуальный зазор ГНУ» и «Заданный зазор ГНУ». Поскольку регулирующее воздействие на электромеханические НУ в процессе прокатки не осуществляется, составляющая межвалкового зазора от ЭМНУ принимается постоянной.

Суть разработанного способа поясняется с помощью осциллограмм, представленных на рис. 7, б. Зазор при захвате устанавливается больше, чем требуется для

получения целевой толщины, а затем при входе головной части листа в клеть уменьшается до нужной величины. Перед входом «головы» в очаг деформации рабочие валки вращаются с линейной скоростью, горизонтальная составляющая которой равна скорости перемещения листа. При этом очаг деформации в вертикальном направлении установлен на толщину прокатываемого металла со стороны входа. Через установленное время после входа головной части очаг деформации замыкается на заданное значение, соответствующее толщине после прохода. Одновременно с этим окружная скорость рабочих валков повышается пропорционально скорости перемещения гидравлического НУ.

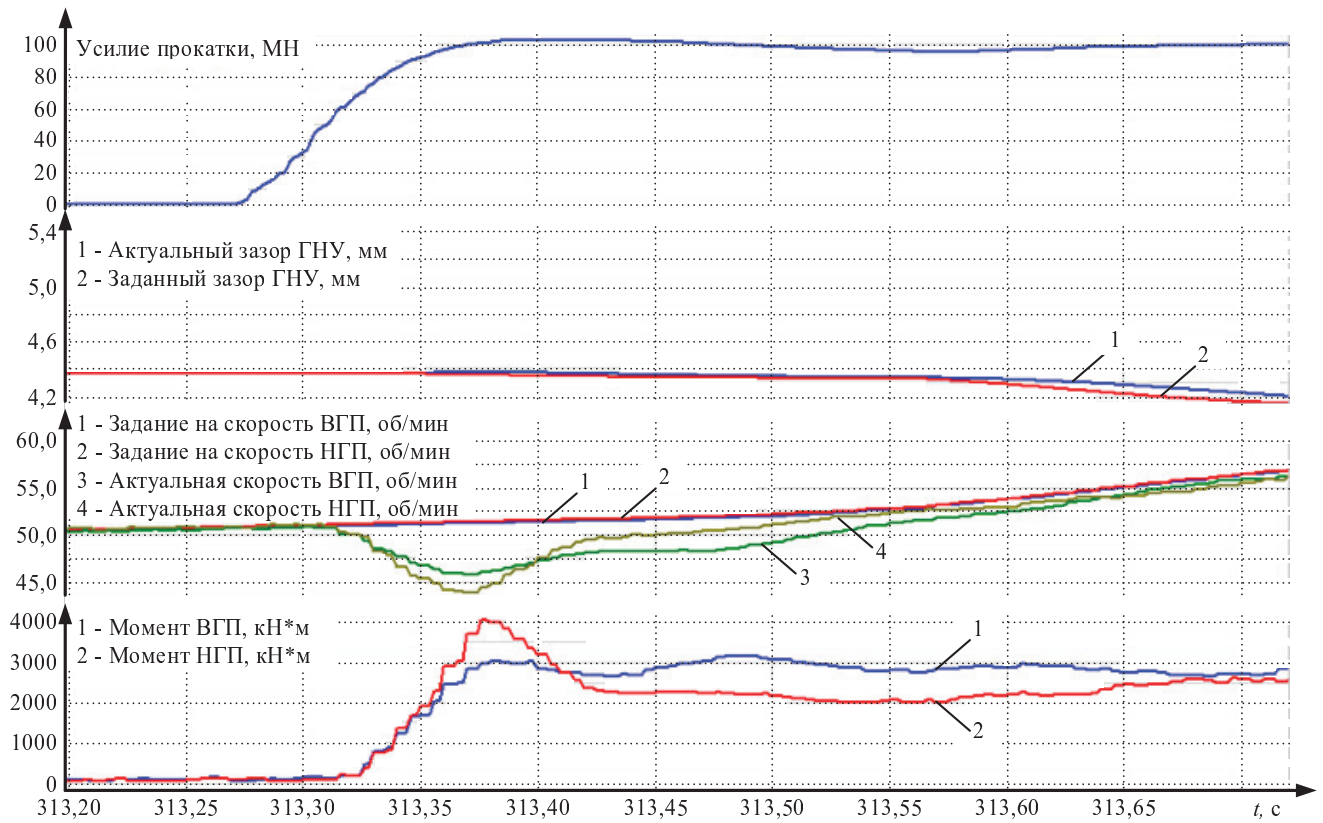
Данный способ является примером реализации принципа параметрического регулирования толщины головного участка полосы путем упреждающего увеличения зазора валков перед ее входом в клеть с последующим возвращением нажимных устройств в заданное положение [20, 23-25].

Для реализации рассмотренной последовательности действий разработана функциональная схема, показанная на рис. 8. На данной схеме логика управления запрещает работу регулятора толщины до момента, когда «голова» металла пройдет заданное расстояние в валках, и за счет этого отключает предварительную компенсацию растяжения клетки (т.е. увеличивает зазор на эту величину). Затем после пропуска «головы» происходят активация регулятора толщины и введение сигнала компенсации растяжения клетки.

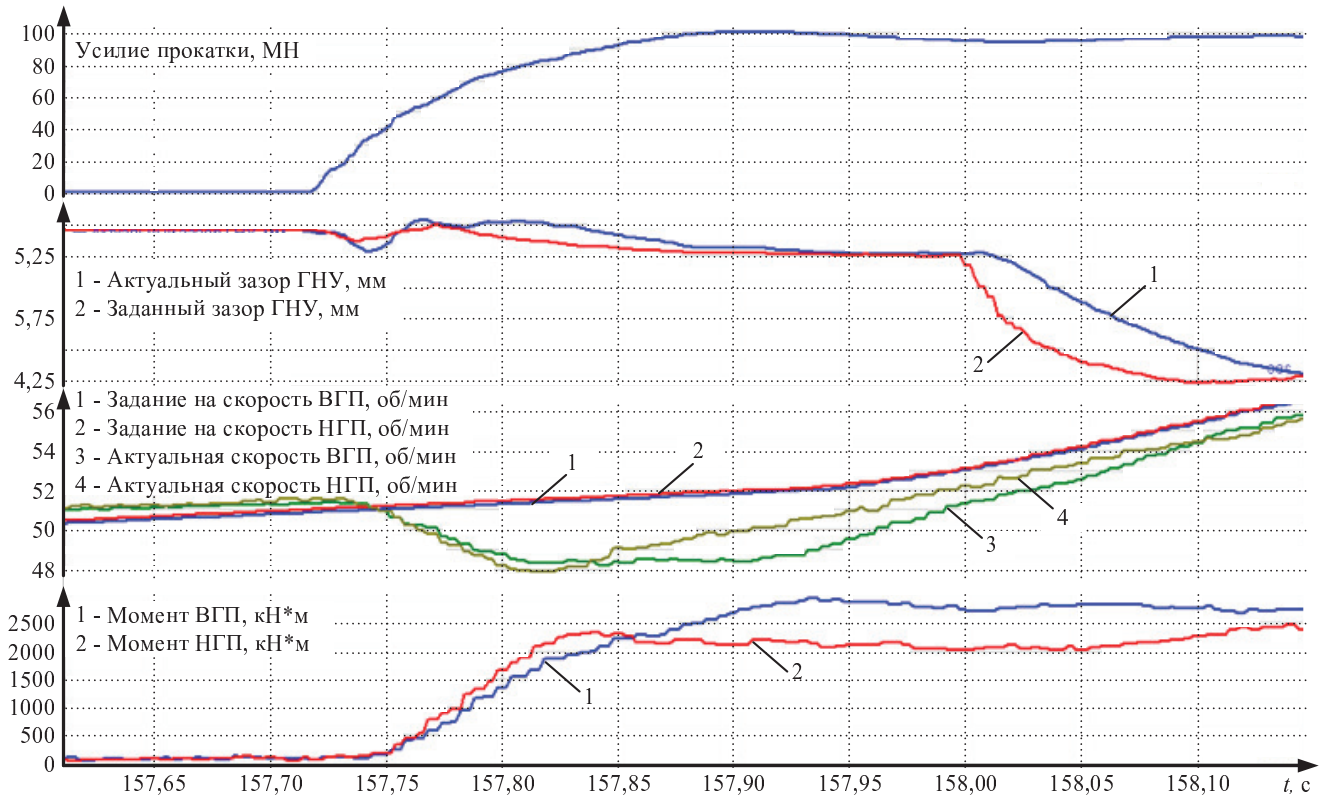
Результаты сравнения динамических показателей при захвате для рассматриваемых вариантов представлены в таблице.

Сопоставление динамических показателей при захвате металла

Номер рисунка	Толщина на выходе мм	Начальный зазор ГНУ мм	Изменение зазора мм	Просадка скорости			Перерегулирование момента		
				от	до	%	от	до	%
				об/мин	об/мин		кН·м	кН·м	
7, а	4,2	4,3	–	50,5	43	15	3000	4000	33
7, б	4,2	5,5	1,3	51	48	6	2350	2000	17,5
9	4,2	5,5	1,3	51	43	15,6	2500	4000	60



a



б

Рис. 7. Осциллограммы при захвате металла: с заранее установленным зазором (а); с изменением зазора согласно предложенному способу (б)

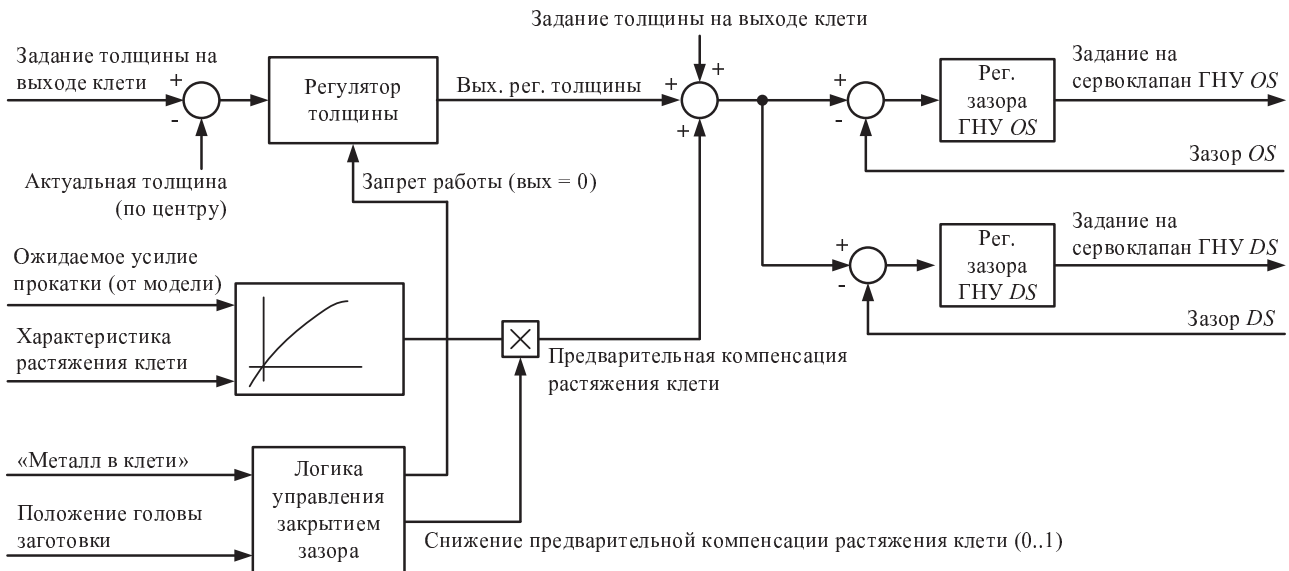


Рис. 8. Структурная схема, поясняющая способ компенсации динамической просадки скорости

Сопоставление параметров, представленных в первой и второй строках, позволяет сделать предварительный вывод, что поставленная выше цель достигнута: просадка скорости уменьшается от 15 до 6%, перерегулирование момента – от 33 до 17,5%. Однако такая ситуация наблюдается не во всех случаях, что подтверждают осциллограммы, приведенные на рис. 9. Они соответствуют случаю, когда зазор ГНУ закрывается в два этапа после захода металла в клеть. Динамические показатели для этого случая показаны в третьей строке таблицы.

Сопоставление осциллограмм на рис. 9 и рис. 7, а (и данных в первой и третьей строках таблицы) показывает, что эффекта в снижении просадки скорости нет. Более того, перерегулирование момента увеличивается от 33 до 60%, хотя при этом снижаются колебания скорости и момента.

Анализ результатов длительных экспериментальных исследований позволил сделать следующие выводы:

1. При увеличении зазора на 60-80% относительно абсолютного обжатия показатели переходных процессов момента и скорости отличаются незначительно. Эффект от применения способа практически отсутствует.

2. Предложенный способ увеличения зазора валков перед захватом сложен в реализации и недостаточно эффективен для ограничения динамических нагрузок.

3. Перемещение нижнего валка (за счет действия ГНУ) после захвата негативно влияет на формирование заданного профиля головного участка при профилированной прокатке [1, 26]. В связи со сложностью этот вопрос требует дополнительных исследований.

Для объяснения ограниченного эффекта, достигаемого в рассмотренном случае, необходимы исследования методами математического моделирования. Очевидно, что возникшая ситуация объясняется тем, что на условия захвата, наряду с первоначальным зазором, влияет большое количество факторов. К ним относятся соотношение скорости перемещения металла на рольганге и окружной скорости валков, форма головного участка проката, температура и др. Также недостатком рассмотренного способа является его относительная

сложность, т.к. необходимо согласование скоростей главного ЭП и привода НУ, а также точное определение положения головной части листа по мере продвижения к валкам.

В связи с указанными недостатками внедрение данного способа ограничения динамических нагрузок на стане 5000 не рекомендуется. На первом этапе в качестве базового предложен комбинированный способ, объединяющий преимущества систем, представленных на рис. 3 и 6.

Внедрение алгоритмов, реализующих предложенные способы, обеспечит:

- повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет ограничения ударных нагрузок при захвате металла валками;
- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных износом оборудования линий главных электроприводов;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление оборудования;
- снижение расходного коэффициента за счет сокращения брака, связанного с застреваниями при захвате, и количества концевой обрезки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований определены причины возникновения неудовлетворительных динамических нагрузок при захвате металла валками клетки стана 5000. Основными причинами являются:

- выбор неконтролируемых зазоров в шпindelных соединениях;
- определение первоначального зазора валков, исходя из заданной толщины полосы после прохода, при этом условия захвата во внимание не принимаются;
- наличие динамической ошибки регулирования скорости, вызванной настройкой пропорционально-интегрального регулятора скорости в двухконтурной астатической системе. Это приводит к тому, что переходные процессы момента электропривода имеют колебательный характер, что приводит к возникновению упругих колебаний момента на валу.



2. Разработаны способ и функциональная схема системы управления главными электроприводами, обеспечивающие выбор зазора в шпиндельных соединениях за счет захвата металла во время дополнительного ускорения валков.

3. Предложен способ управления электроприводами с компенсацией динамической просадки скорости, возникающей при захвате металла, за счет предварительного увеличения скорости электропривода на величину расчетной динамической ошибки регулирования скорости.

4. Представленные способы прошли промышленную апробацию на стане 5000. В результате дано подтверждение снижения перерегулирования и колебаний момента на валу двигателя.

5. Разработан способ управления электроприводами и гидравлическими НУ, согласно которому величина зазора валков до захвата устанавливается на уровне, близком к толщине головной части заготовки, а после захвата возвращается в требуемое положение, соответствующее заданной толщине листа после прохода. При этом осуществляется коррекция скоростей валков пропорционально скорости перемещения нажимного устройства.

6. С целью оценки эффективности данного способа необходимо проведение исследований методами математического моделирования. Для этого необходима разработка математической модели комплекса «электропривод клетки – гидравлический привод НУ», учитывающей упругие связи в механических соединениях и взаимосвязь приводов через металл.

7. В качестве базового варианта для промышленного внедрения предложен комбинированный способ ограничения динамических нагрузок за счет предварительного ускорения валков и компенсации динамической ошибки регулирования скорости. Он объединяет преимущества первых двух разработанных способов решения поставленной задачи.

*Исследования проводились в рамках гранта МД-979.2017.8.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ECon Rus). 2017. P. 1540-1544. DOI: 10.1109/ECon Rus.2017.7910865.
2. 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. P. 1753-1750. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709
3. Анализ причин аварий оборудования листопрокатных станов и меры по их предупреждению / А.Ф. Крисанов, В.Ф. Кузурман, Б.Н. Виноградов и др. // Обзор, информ. Ин-т «Черметинформация». М., 1985. С. 36.
4. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 69-77.

5. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
6. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
7. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана / В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.Г. Шубин, Б.М. Логинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 1. С. 47-55.
8. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
9. Шилиев П.В., Усатый Д.Ю., Радионов А.А. Автоматизация процесса прокатки толстого листа на стане 5000 // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 15-18.
10. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежуточного широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.Ю. Андрияшин, В.В. Головин, П.В. Шилиев // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 12-20.
11. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. № 3. С. 47-53.
12. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 12-21.
13. Карандаев А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 3-15.
14. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 98-103.
15. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, О.А. Залогин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. С. 12-17.
16. Алгоритмы цифровой системы автоматического регулирования натяжения и петли широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шилиев, И.Ю. Андрияшин, В.В. Головин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Электротехника. 2013. № 10. С. 3-11.
17. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клетей черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып. 16. Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2011. № 34 (251). С. 35-41.

18. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново, 2012. С. 652-657.
19. V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. Metallurgist. Vol. 59. №3-4, July 2015. P. 315-323. DOI:10.1007/s11015-015-0103-8.
20. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук / Храмшин Вадим Рифхатович. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 393 с.
21. Храмшин В.Р. Система автоматической коррекции скоростей электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». Вып. 18. Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2012. № 37 (296). С. 60-67.
22. Храмшин В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. 2013. №4. С. 48-55.
23. Автоматическая коррекция толщины головного участка полосы в гидро-САРТ широкополосного стана горячей прокатки / В.В. Галкин, С.А. Петряков, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 46-50.
24. Карандаев А.С., Храмшин В.Р., Петряков С.А. Следящая система автоматического регулирования толщины полосы стана горячей прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3. С. 25-29.
25. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods [Исследование способа коррекции толщины головного участка полосы методом математического моделирования] / V.R. Khramshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, R.R. Khramshin // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. Вып. 13. Челябинск: ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», 2013. № 1. С. 144-151.
26. 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.

Поступила в редакцию 25 декабря 2017 г.

---

## INFORMATION IN ENGLISH

---

### FEASIBILITY OF THE WAYS TO LIMIT DYNAMIC LOADS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF A ROLLING STAND

Andrey G. Shubin

Head of the central electrotechnical laboratory, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia.

Boris M. Loginov

Senior maintenance and test engineer, Central electrotechnical laboratory, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia. E-mail: lb18@yandex.ru.

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. in Engineering, Head of the Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: [gasiyarovvr@gmail.com](mailto:gasiyarovvr@gmail.com)

Ekaterina A. Maklakova

Postgraduate Student, the Department of Mechatronics and Automation, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Characteristics of a reverse four-high rolling stand of the plate mill 5000 of the PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» («ММК») are given in the article. As a result of the experiments carried out at the rolling mill, the research group confirmed a significant excess of dynamic loads of electric drives of both upper and bottom rolls during metal feeding over the set values. The research group determined the main causes of the unsatisfactory transient processes and confirmed the appropriateness of developing the ways of electric drive control, which will make it possible to reduce the loads and limit the fluctuations of torque during metal feeding. A method of electric drive control was offered to provide the decrease of excessive correction of the torque by means of preliminary setting of the gap in spindle junctions. The researchers considered the way of compensating the dynamic deviation of speed control by means of increasing the speed before the metal feeding. The comparative analysis of oscillograph records of torques and speeds confirmed

the improvement of dynamic characteristics after implementation of the suggested control algorithms. The suggested method of control for electric drives of rolls and hydraulic screwdown structures provides the improvement of feeding conditions due to preliminary increase of the roll gap. The article shows oscillographs of speeds and torques for different variants of target values to change the position of screwdown structures. It was found that the target limiting of the dynamic torque cannot always be achieved. It was noted that it is necessary to carry out further investigations using mathematical modeling methods. The article offers recommendations aimed at commercial introduction of the developed technical solutions.

**Keywords:** Plate rolling mill, reverse stand, electric drive, dynamic load, limitation, methods, control systems, development, experimental studies, introduction, recommendations.

REFERENCES

1. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRus). 2017, pp. 1540-1544. DOI: 10.1109/EConRus.2017.7910865.
2. 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
3. Krisanov A.F., Kuzerman V.F., Vinogradov B.N. et.al. *Analiz prichin avariyn oborudovaniya listoprokatnykh stanov i mery po ikh preduprezhdeniyu* [Analysis of causes of equipment failures of rolling mill and measures preventing them]. Review, information. Institute "Chermetinformatsiya". Moscow, 1985. 36 p. (In Russian)
4. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Reduction of dynamic loads of mechanical and electrical equipment of roughing train of a hot rolling mill. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Machine building: network electronic scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 69-77. (In Russian)
5. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017, pp. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
6. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
7. Khramshin V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Shubin A.G., Loginov B.M. Mathematical modeling of interrelated electromechanical systems of continuous train of a rolling mill. *Vestnik Yuzhnouralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Power engineering]. 2016, vol. 16, no. 1, pp. 47-55. (In Russian)
8. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017, pp. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
9. Shilyaev P.V., Usaty D.Yu., Radionov A.A. Automation of the plate rolling process at the rolling mill 5000. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics]. 2011, no. 4, pp. 15-18. (In Russian)
10. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin A.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V. Mathematical modeling of interrelated electromechanical systems of the roll gap of a wide strip hot rolling mill. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics]. 2009, no. 1, pp. 12-20.
11. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. Mathematical modeling of a thyristor drive with the switching structure. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electromechanics]. 2010, no. 3, pp. 47-53.
12. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. Mathematical modeling of interrelated electromechanical systems of the continuous train of a wide strip rolling mill. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Machine building: network electronic scientific journal]. 2013, no. 1, pp. 12-21. (In Russian)
13. Karandaev A.S. Improvement of automatic electric drives of rolling equipment. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Machine building: network electronic scientific journal]. 2014, no. 1, pp. 3-15. (In Russian)
14. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Adjustment of speeds of stand electric drives of continuous train of a rolling mill. *Vestnik IGEU* [Bulletin of IGEU], 2013, iss. 1, pp. 98-103. (In Russian)
15. Galkin V.V., Karandaev A.S., Golovin V.V., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Zalogin O.A. Calculation algorithm of speed and load modes of stand electric drives of a rolling mill in the process of plate rolling. *Izvestiya TulGU* [Proceedings of TulGU]. Engineering. Issue 3: in 5 parts. Tula: Publishing center of TulGU, 2010, part 2, pp. 12-17. (In Russian)
16. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Algorithms of the digital system of automatic tension and loop control of a wide strip hot rolling mill. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2013, no. 10, pp. 3-11. (In Russian)
17. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Gostev A.N. Improvement of the speed adjustment algorithm of roughing train stand electric drives of a hot rolling mill. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of YuUrGU. Series "Power engineering"]. Iss. 16. Chelyabinsk: FGBOU VPO "YuUrGU", 2011, no. 34 (251), pp. 35-41. (In Russian)
18. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Speed adjustment of interrelated electric drives of roughing train stands of a rolling mill. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tehnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu: FGOU VPO "Ivanovskiy gosudarstvennyi energeticheskiy universitet"* [Proceedings of VII International (XVIII All-Russian) scientific and technical conference on automatic electric drive: FGOU VPO «Ivanovo state power university»]. Ivanovo, 2012, pp. 652-657. (In Russian)
19. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. *Metallurgist*, vol. 59, no. 3-4, July 2015, pp. 315-323. DOI:10.1007/s11015-015-0103-8.
20. Khramshin V.R. Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos [Development of electrotechnical systems of the continuous train of a hot rolling mill during expansion of strip range. Ph.D. Diss.]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 393 p. (In Russian)
21. Khramshin V.R. System of an automated correction of stand electric drive speed for a wide strip hot rolling mill. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of YuUrGU. Series "Powerengineering"]. 2012, iss. 18, no. 37(296), pp. 60-67. (In Russian)
22. Khramshin V.R. Methods of adjusting the static deflection of electric drive speed at stands of a wide strip hot rolling mill. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2013, no. 4, pp. 48-55. (In Russian)
23. Galkin V.V., Petryakov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Automatic adjustment of strip head thickness in hydro-SART of a wide strip hot rolling mill. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011, no. 4, pp. 46-50. (In Russian)
24. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Petryakov S.A. Monitoring system of automatic control of strip thickness at a hot rolling mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo*

- Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 3, pp. 25-29. (In Russian)
25. Hramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Hramshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika* [Bulletin of YuUrGU. Series “Power engineering”]. Iss. 13. Chelyabinsk: FGBOU VPO “YuUrGU”, 2013, no. 1, pp. 144-151. (In Russian)
26. Baskov S.N., Karandaev A.S., Osipov O.I. Power parameters of drives and the system of shaped slab rolling at 2800 mill. *Privodnaya tekhnika* [Electrically driven equipment]. 1999, no. 1-2, pp. 21-24. (In Russian)
- 
- Шубин А.Г., Логинов Б.М., Гасияров В.Р., Маклакова Е.А. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 14-25. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-14-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25)
- Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Feasibility of the Ways to Limit Dynamic Loads of Electromechanical Systems of a Rolling Stand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 14-25. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-14-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25)