

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ ЗА СЧЕТ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ

Целью исследования является ограничение динамических нагрузок электромеханических систем валков клетей прокатных станов, работающих с ударным приложением нагрузки. Исследования выполнены на примере электропривода реверсивной клетки толстолистового стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Отмечена актуальность решения данной проблемы, обусловленная расширением сортамента за счет производства проката из труднодеформируемых марок стали. Раскрыта причина недопустимых динамических нагрузок при захвате металла валками вследствие наличия угловых зазоров в механических передачах. Рассмотрен механизм возникновения ударов в шпиндельных соединениях при замыкании углового зазора. Показано, что основным известным способом их ограничения является захват металла в режиме ускорения электропривода. Выполнен анализ осциллограмм моментов двигателей и моментов валу шпинделей реверсивной клетки стана 5000 при захвате металла валками. Сделан вывод, что, несмотря на существенное ограничение нагрузок, известный способ не обеспечивает необходимого снижения динамического момента. В качестве основной причины названо перерегулирование момента, обусловленное настройкой двухконтурной системы автоматического регулирования (САР) скорости электропривода. С целью ограничения данной составляющей предложен способ опережающего увеличения скорости на величину динамической ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки. Предложены эмпирические зависимости для вычисления ошибки регулирования скорости при ударе приложении нагрузки. Представлены осциллограммы координат электропривода при захвате металла валками при реализации разработанного алгоритма управления на стане 5000. Показано снижение ударной нагрузки в 1,45 раза, что подтверждает техническую эффективность разработанного способа. Для дальнейшего снижения динамических нагрузок рекомендовано формирование тахограмм электропривода, предусматривающих торможение двигателя с заданным темпом после захвата.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, реверсивная клеть, главная линия, шпиндельное соединение, угловой зазор, нагрузка, ударное приложение, момент, перерегулирование, ограничение, электропривод, скорость, способ, система, разработка, экспериментальные исследования, рекомендации.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетей актуальна для всех прокатных станов, работающих с ударным приложением нагрузки, в том числе для толстолистового стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Реверсивная клеть этого стана является самой мощной в Европе, ее фотография представлена на **рис. 1**. Основной продукцией толстолистовых станов является заготовка для труб большого диаметра, необходимых для строительства газопроводов.

В последние годы проблема ограничения нагрузок приобрела особую актуальность в связи расширением сортамента за счет производства проката из труднодеформируемых марок стали [1].



Рис. 1. Фотография реверсивной клетки стана 5000

В этих условиях увеличиваются нагрузки электромеханических систем в установившемся и динамических режимах. Так, на стане 5000 установившиеся моменты двигателей верхнего и нижнего валков достигают 150–200% номинального значения. Динамические броски момента, возникающие при входе заготовки в клеть, превышают номинальный момент в 2–2,5 раза и выходят на уровень ограничения [2].

Одной из основных причин недопустимых динамических нагрузок при захвате металла валками является наличие угловых зазоров в механических передачах. Основными «заворообразующими» узлами главной линии реверсивной клетки толстолистового стана являются шпиндельные соединения, в большей степени со стороны рабочего валка. Их близость к клетю, наклонное положение, высокая температура, попадание окалины и воды вызывают повышенный износ валковых муфт и бронзовых вкладышей.

В реверсивной клетю стана 5000 установлены шпиндели слипперного типа (slipper type), конструкция которых показана на **рис. 2, а**. Непосредственно сочленение валка со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции, которая крепится к рабочему валу. Аналогичная головка смонтирована со стороны двигателя электропривода. Вал шпинделя имеет шлицевую конструкцию для компенсации осевого смещения при сдвиге валков системой CVC^{plus} [3]. Опорный подшипник шпинделя расположен в районе середины вала. Каждый шпиндель уравнивается индивидуально с помощью гидроцилиндра, рычагов и штоков в вертикальном и горизонтальном направлениях [4, 5].

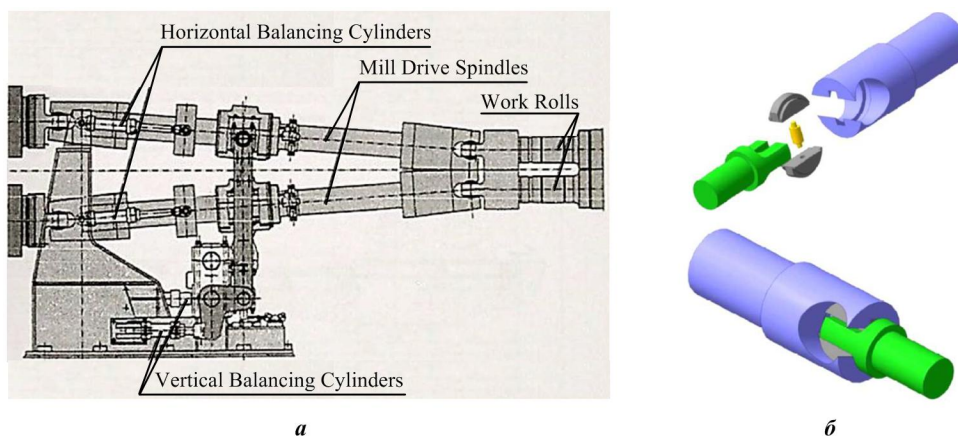


Рис. 2. Конструкция главной линии клетки стана 5000 (а), изображение деталей шпиндельного соединения и пояснение к возникновению ударов (б)

Механизм возникновения ударов при закрытии (замыкании) зазора поясняет рис. 2, б [6]. В процессе вращения происходит периодическое соударение головок шпинделя с хвостовиком вала. В результате возникают колебательные динамические процессы в передачах. Динамические удары в момент захвата заготовки приводят к преждевременному износу и поломкам механического оборудования. Одной из наиболее опасных аварий является поломка шпиндельных соединений, поскольку она приводит к длительным простоям стана и значительным затратам на устранение последствий. Это подтверждает актуальность решения проблемы снижения динамических нагрузок электро-механических систем клетки за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводами. Представленная публикация посвящена рассмотрению данного вопроса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Авторским коллективом от ЮУрГУ и МГТУ в течение нескольких лет выполняются исследования по совершенствованию алгоритмов управления электроприводами, обеспечивающих снижение нагрузок в динамических режимах. Основные результаты опубликованы в статьях и докладах, в том числе в [7–10].

С целью замыкания углового зазора рекомендуется осуществлять захват металла в режиме ускорения валков. Для этого должен быть обеспечен предварительный разгон (предразгон) электропривода. Переходные процессы при захвате металла в этом режиме исследованы в работах [11, 12]. Доказано, что в главных линиях, выполненных по безредукторной схеме, при правильном выборе времени предразгона обеспечивается гарантированное замыкание углового зазора. В публикациях [13, 14] подтверждена эффективность применения данного способа на широкополосных станах горячей прокатки.

На рис. 3 представлены осциллограммы момента $M_{дв}$ и скорости n двигателя электропривода, а также момента M_B , измеренного на валу шпинделя верхнего вала реверсивной клетки стана 5000. Осциллограммы на рис. 3, а получены в режиме захвата металла при полностью открытых угловых зазорах. Это обеспечивается путем замедления электропривода в интервале времени t_1-t_2 . Зависимости на рис. 3, б получены при

предварительно закрытых зазорах за счет ускорения электропривода в аналогичном интервале времени. Замыкание углового зазора происходит в момент времени t_3 , это подтверждают небольшие увеличения (всплески) на осциллограммах моментов двигателя и шпинделя.

Из осциллограмм следует, что динамические отклонения моментов $M_{дв}$ и M_B идентичны, их амплитуды отличаются незначительно. Поэтому ниже анализируется только электромагнитный момент двигателя, а полученные результаты могут быть отнесены к динамическим показателям момента на валу шпинделя.

Динамические отклонения момента и скорости для сравниваемых случаев приведены в столбцах таблицы со ссылкой на рис. 3. Здесь же показаны параметры процесса захвата, осциллограммы которого приведены ниже на рис. 7. Амплитуду ударного момента характеризует кратность k_m , которая определяется как отношение максимального значения M_{max} к установившемуся $M_{ст}$. Для оценки динамического снижения скорости приведена ошибка регулирования (просадка Δ , %), которая определяется как процентное отношение минимальной скорости n_{min} к ее значению перед захватом n_3 .

Анализ осциллограмм и данных таблицы позволяет сделать следующие выводы:

- амплитуда ударного момента при захвате с разомкнутым зазором (рис. 3, а) в 1,9 раза превышает установившийся момент прокатки (максимальное значение $M_{max}=3250$ кН·м, установившееся $M_{ст}=1750$ кН·м);
- динамическое отклонение скорости электропривода благодаря замыканию зазора уменьшается в 1,5 раза от 13,4 % на рис. 3, а до 9,2 % на рис. 3, б;
- аналогично, кратность динамического момента $M_{дв}$ снижается в 1,2 раза (от 1,9 на рис. 3, а до 1,6 на рис. 3, б).

Динамические отклонения моментов и скоростей при захвате

Параметр	Величина на осциллограммах								
	рис. 3, а			рис. 3, б			рис. 7		
Момент двигателя	$M_{ст}$	M_{max}	k_m	$M_{ст}$	M_{max}	k_m	$M_{ст}$	M_{max}	k_m
	кН·м	ед.	ед.	кН·м	ед.	ед.	кН·м	ед.	ед.
	1750	3250	1,9	1750	2850	1,6	1400	1550	1,1
Скорость	n_3	n_{min}	Δ	n_3	n_{min}	Δ	n_3	n_{min}	Δ
	об/с	%	%	об/с	%	%	об/мин	%	%
	0,82	0,71	13,4	0,76	0,69	9,2	43	41	4,6

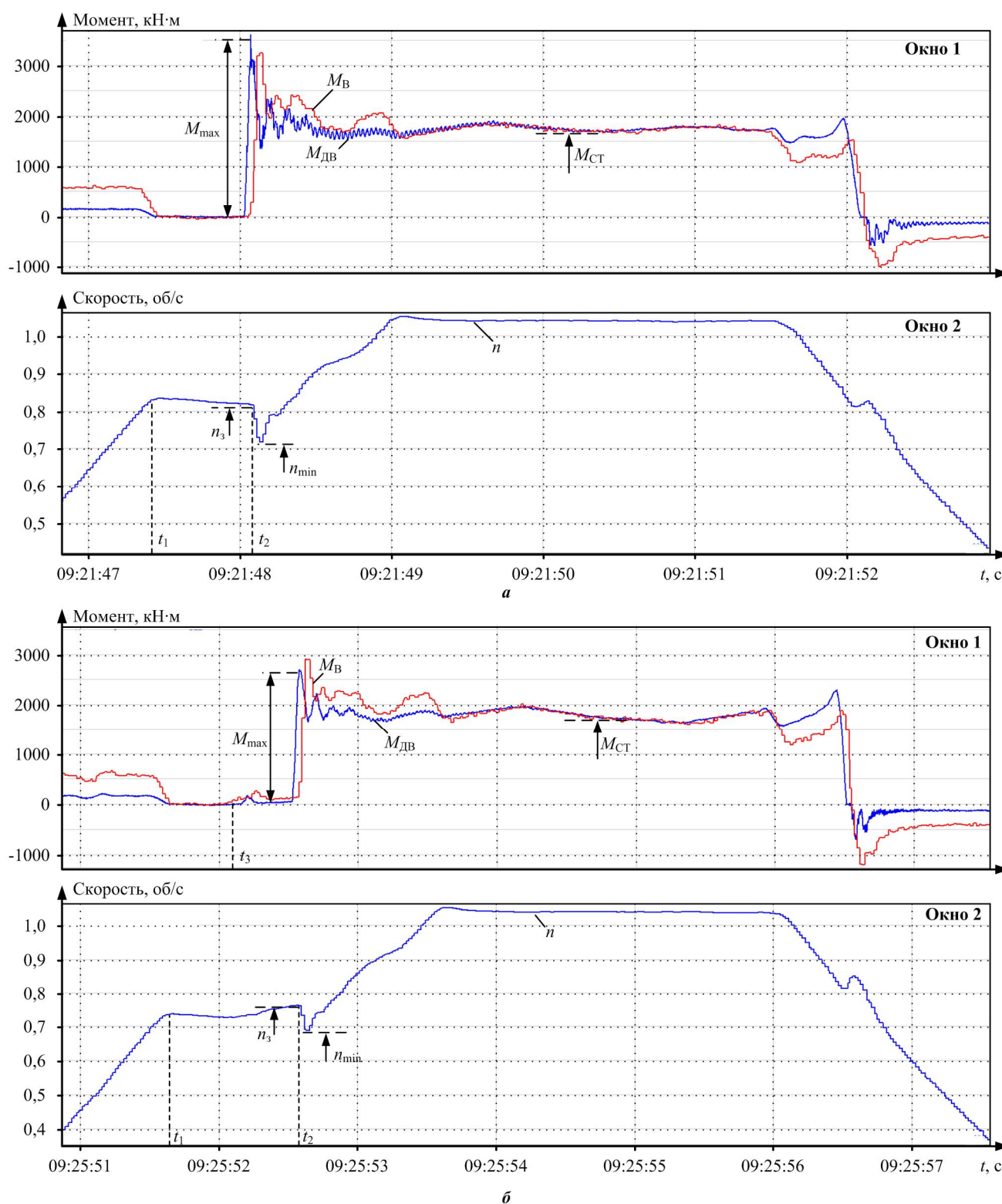


Рис. 3. Осциллограммы при захвате металла валками: окно 1 – моменты двигателя $M_{дв}$ и на валу шпинделя $M_{в}$; окно 2 – скорость двигателя n

В целом, по результатам экспериментальных исследований сделаны два основных вывода:

1. Известный способ предварительного выбора зазора в механических передачах обеспечивает значительное ограничение динамического момента двигателя и, соответственно, момента на передающем валу в режиме захвата.

2. При реализации известного способа перерегулирование момента и просадка скорости устраняются не

полностью. Это значит, что одного только предварительного разгона для полной компенсации динамического момента недостаточно.

Динамические показатели скорости и момента при ударном приложении нагрузки определяются быстродействием двухконтурной системы автоматического регулирования (САР) скорости. Известно, что при настройке этой системы на симметричный оптимум перерегулирование момента двигателя при ударном

приложении нагрузки составляет 43% [15]. Это вызывает аналогичные динамические увеличения момента на передающем валу шпинделя. В связи с этим ставится задача снижения составляющей динамического момента, связанной с настройкой САР скорости электропривода.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Схема системы задания и регулирования скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков клетки стана 5000 представлена на **рис. 4** [11]. Электроприводы выполнены на основе синхронных двигателей М1, М2 с частотным регулированием скорости. Траектория прохода формируется моделью АСУ ТП по критериям производительности стана и получения заданного температурного режима прокатки. Задание на скорость $V_{\text{акт}}(t)$ в автоматическом режиме поступает из контроллера первого уровня, который формирует таблицу из точек желаемой траектории движения $S_{\text{акт}}(t)$. Основной темп разгона-торможения формируется интерполятором. С его выхода сигнал линейной скорости $v(t)$ подается на вход задатчика интенсивности (ЗИ), который служит для аварийного ограничения темпа задания. Выходной сигнал ЗИ преобразуется с учетом диаметров валков в задания угловых скоростей и поступает на входы контуров регулирования скорости.

В системе реализован принцип предварительного разгона электроприводов перед захватом. Он обеспечивается за счет включения в существующую схему дополнительных блоков, выделенных на **рис. 4** контуром. Для определения момента начала ускорения используется информация из системы слежения за металлом на рольгангах. Она поступает с выхода блока «Контроль положения заготовки относительно клетки». Для формирования приращения скорости используется дополнительный задатчик интенсивности ЗИ предразгона, выходной сигнал которого суммируется с выходным сигналом интерполятора. Максимальная линейная скорость принята равной 0,3 м/с, темп дополнительного уско-

рения установлен экспериментально и составляет 0,22 м/с² [12]. Указанные функции реализованы в виде алгоритма в управляющем контроллере.

ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

С целью решения поставленной задачи выполнен анализ частотных свойств двухмассовой электромеханической системы валка реверсивной клетки стана 5000. Дана оценка влияния упругой связи на показатели регулирования момента двигателя при воздействии по каналам управления и возмущения. Для этого разработана модель, учитывающая упругую связь в валопроводе, зазор в шпиндельных соединениях и затухание процессов под действием диссипативных сил. Система автоматического регулирования скорости настроена на симметричный оптимум. Более подробно разработанная модель рассмотрена в публикациях [16, 17].

На **рис. 5** приведены графики переходных процессов момента двигателя, полученные с помощью модели. Они рассчитаны для ударного приложения номинальной нагрузки при различных постоянных времени интегральной части регулятора. Перерегулирование момента составляет от 44 до 63%, это подтверждает необходимость разработки решений по его ограничению.

В разрабатываемых способе и системе управления необходимо обеспечить выполнение следующих требований:

- предварительный разгон электропривода (чтобы сохранить его преимущества);
- компенсацию динамической просадки скорости при захвате с целью ограничения влияния настройки САР скорости на динамический момент (основной отличительный признак);
- возможность применения алгоритма управления как для однократно-интегрирующей, так и двукратно-интегрирующей системы регулирования скорости.

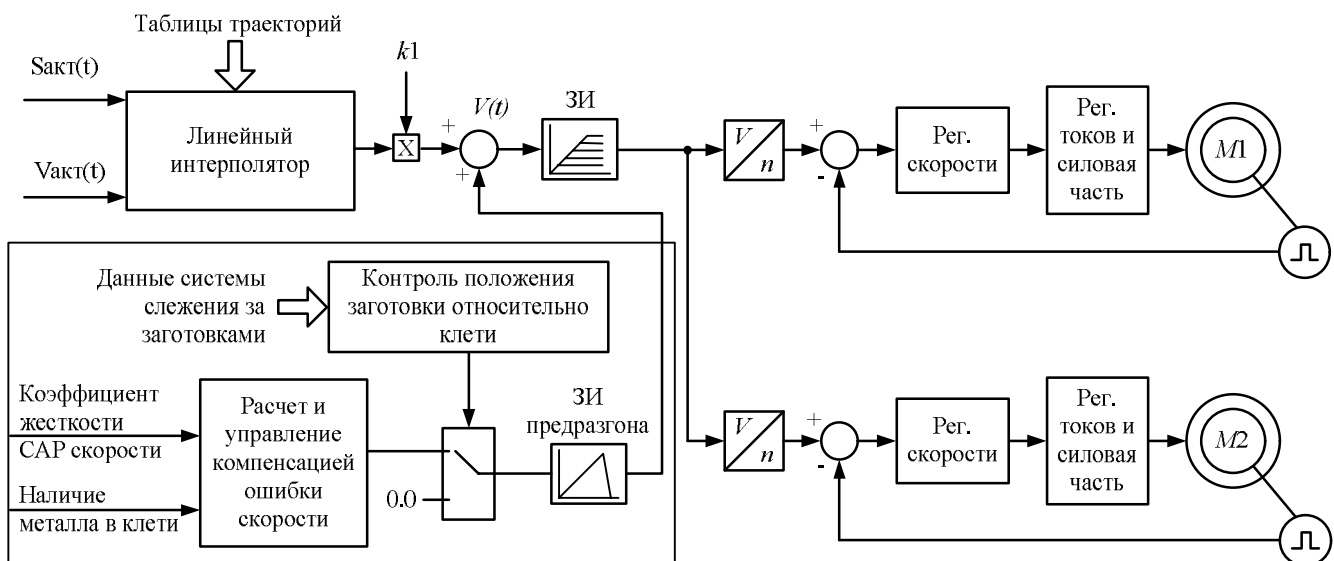


Рис. 4. Функциональная схема системы формирования тахограмм электроприводов клетки

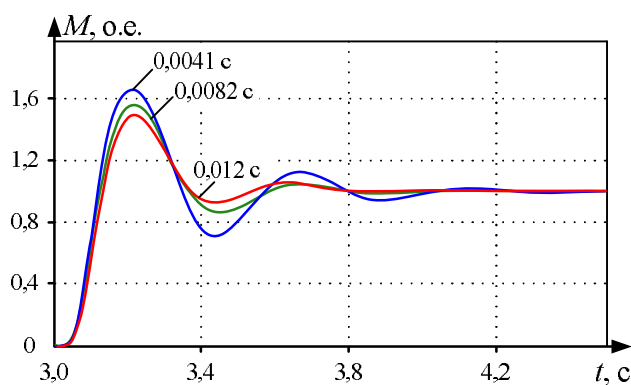


Рис. 5. Переходные процессы момента при различных постоянных времени регулятора скорости

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОШИБКИ СКОРОСТИ ЗА СЧЕТ ЕЕ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Разработан способ управления электроприводом прокатного стана, являющийся развитием разработок [18, 19]. Суть способа заключается в ограничении динамического момента электропривода посредством упреждающего увеличения задания скорости на величину динамической ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки.

На рис. 6 представлены переходные процессы скорости и тока якоря в однократно-интегрирующей (кривые 1, 3) и двукратно-интегрирующей (кривые 2, 4) САР скорости электропривода в режиме ударного приложения нагрузки [20].

В однократно-интегрирующей системе имеет место статическая ошибка регулирования скорости $\Delta\omega_c$. Ее величина приближенно определяется по формуле

$$\Delta\omega_c = \left(\frac{2T_{mc}}{J_{пр}} \right) \Delta M_c, \quad (1)$$

где $J_{пр}$ – момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя; ΔM_c – прикладываемый момент статической нагрузки; T_{mc} – электромеханическая постоянная времени.

В двукратно-интегрирующей системе статическая ошибка регулирования скорости отсутствует. Максимальную динамическую ошибку скорости в такой системе можно оценить по эмпирической формуле:

$$\Delta\omega_d = \left(\frac{1,9T_{mc}}{J_{пр}} \right) \Delta M_c. \quad (2)$$

Таким образом, для компенсации динамического снижения скорости согласно разработанному способу скорость к моменту приложения нагрузки должна быть увеличена на составляющие, рассчитанные по выражениям (1) либо (2) в зависимости от настройки САР скорости электропривода.

Этот вывод справедлив как для синхронных электроприводов с частотным регулированием скорости, так и для тиристорных электроприводов постоянного тока, которые установлены на действующих прокатных станах.

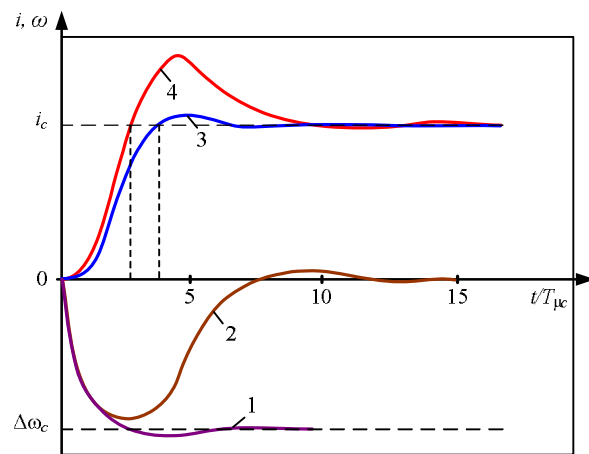


Рис. 6. Идеализированные переходные процессы электропривода при ударном приложении нагрузки

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 7 приведены осциллограммы заданий скоростей n_0 , фактических (актуальных) скоростей $n_{ВГП}$, $n_{НГП}$ и моментов двигателей $M_{ВГП}$, $M_{НГП}$ главных приводов верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) клетки стана 5000. Они получены при испытаниях алгоритма, реализующего предложенный способ.

С этой целью до захвата металла валками к основному заданию скорости прибавляется величина динамического приращения скорости электропривода, рассчитанная по выражению (2). Она компенсирует динамическую просадку скорости при захвате. Это обеспечивается за счет предварительного ускорения электропривода в интервале t_1-t_2 .

При появлении усилия прокатки в момент t_2 сигнал компенсации просадки из основного задания скорости вычитается. Происходит снижение задания (и, соответственно, скорости) в интервале t_2-t_3 с заданным замедлением. Затем регулирование скорости осуществляется согласно технологии (происходит разгон до рабочей скорости и дальнейшее торможение).

Динамические отклонения скорости и момента представлены выше в столбцах таблицы с обозначением «рис. 7». Результаты их сравнения с показателями, соответствующими режиму предразгона без компенсации динамической ошибки скорости (см. рис. 3, б), позволили сделать следующие выводы:

1. Кратность ударного момента в предложенной системе составляет 1,1, в то время как в системе с предразгоном – 1,6. Таким образом, максимальный динамический момент снижен в 1,45 раза.

2. Динамическое отклонение скорости электропривода снижается в 2 раза, от 9,2 до 4,5 %.

3. На представленных осциллограммах предразгон осуществляется на 4,6% от $n_3 = 43$ об/мин до $n_{min} = 41$ об/мин. Динамическое снижение скорости при захвате $\Delta n_d = n_3 - n_{min}$ происходит практически на ту же величину, что наглядно демонстрируют осциллограммы. Это подтверждает справедливость расчета приращения скорости по зависимости (2).

Представленные результаты подтверждают техническую эффективность разработанного способа ограничения динамического момента за счет компенсации ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки.

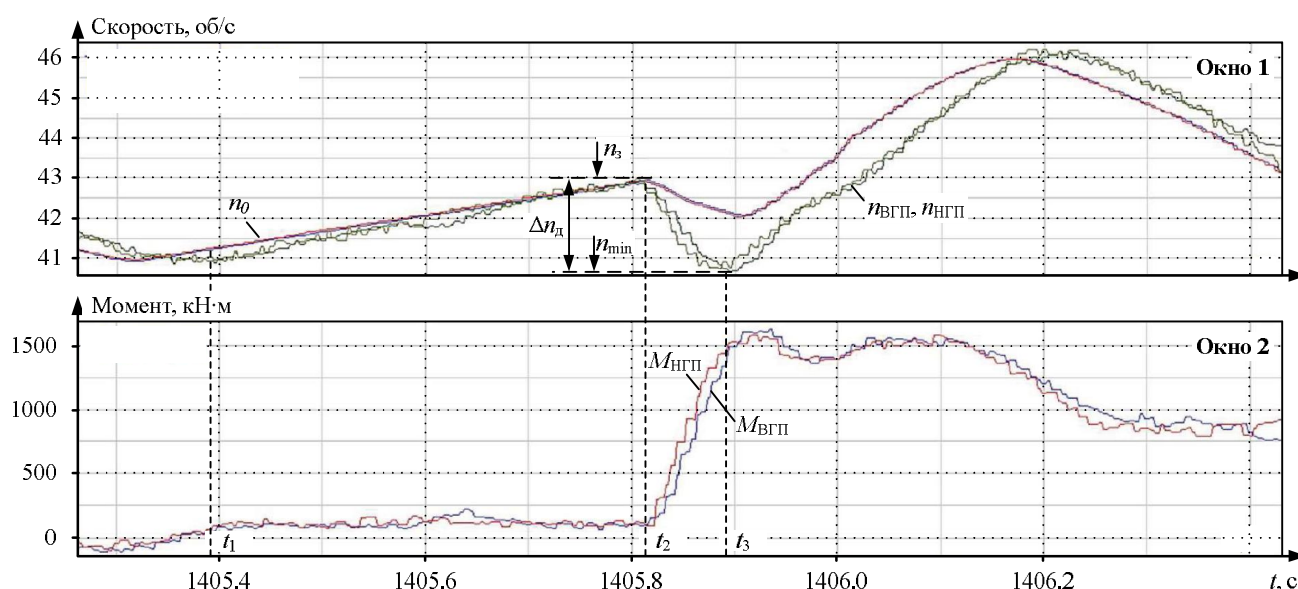


Рис. 7. Осциллограммы скоростей и моментов при захвате металла в разработанной системе: окно 1 – скорости двигателей ВГП и НГП; окно 2 – моменты двигателей

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанный способ позволяет добиться снижения момента двигателя и, соответственно, упругого момента в передающем механизме за счет предварительного ускорения электропривода перед захватом и последующего снижения скорости после захвата.

Преимуществом данного способа является то, что не нужно формировать отдельно сигнал на ускорение для выбора угловых зазоров. Сигнал задания на предразгон формируется таким образом, чтобы приращение скорости в момент захвата соответствовало величине, необходимой для компенсации предварительно рассчитанной динамической просадки скорости.

Вместе с тем экспериментальные исследования показали, что данный способ не является абсолютно эффективным. При его реализации обеспечивается компенсация приращения момента, вызванного настройкой электропривода. Вместе с тем динамический момент при захвате в значительной степени зависит от упругих свойств валопроводов клетки.

Добиться компенсации влияния упругой составляющей момента можно за счет формирования тахограмм электропривода, предусматривающих торможение двигателя после захвата с заданным отрицательным ускорением (замедлением). Этот вывод принят за основу при разработке способа управления электроприводом, который рассматривается в публикациях [12, 21]. Сочетание преимуществ этих разработок и рассмотренного способа компенсации просадки скорости позволит получить максимальное снижение динамических нагрузок при захвате металла валками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Method of Limiting the Dynamic Loads on Hot Plate Mill's Mechatronics System. IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). 2019. P. 43-47. DOI: 10.1109/ICMIMT.2019.8712076.
2. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров,

Е.А. Маклакова // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38). С. 14-25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25.

3. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Khramshin V.R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1780-1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713 (англ).
4. 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.
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. Чертков Г.В. Оборудование прокатных и прессовых цехов. Электронный атлас конструкций и деталей изучаемого оборудования. Учебное пособие / Г.В. Чертков. Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2012. 100 с.
7. 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. P. 315-323. DOI:10.1007/s11015-015-0103-8.
8. Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Shubin A.G. Method of Reduction of an Edging and Horizontal Rolls Electromechanical Interrelation in Universal Stand of a Rolling Mill. Procedia Engineering, 2017, Vol. 206. P. 1761-1767. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.710.
9. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Method of Load Calculation of Electrical Drives of Rolling mills During Heavy Plate Manufacturing. 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012014. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012014.
10. 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 (ME-ACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
11. 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), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 651-656. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317180.
12. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Khrashin V.R., Maklakov A.S. Use of Automated Electric Drives for Limiting Dynamic Loads in Shaft Lines of Roll Mill Stands. The Journal of Engineering. The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). 2018. 4 p. DOI: 10.1049/joe.2018.8135.
 13. Диденко Е.Е. Способы снижения динамических нагрузок трансмиссий рабочих валков при входе полосы в клети чистовой группы стана горячей прокатки // Автоматизированные технологии и производства. 2017. №1. С. 25-27.
 14. Экспериментальные исследования и промышленное опробование способов снижения динамических нагрузок в редукторных линиях приводов черновых клетей НТЛС 1680 / П.В. Крот, А.Ю. Путники, О.М. Клевцов, А.А. Ермоленко // Труды V Конгресса прокатчиков, Череповец, 21-23 октября 2003 г. М.: ОАО «Черметинформация», 2004. С. 523-529.
 15. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1977. 392 с.
 16. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khrashin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System Hydraulic Screwdown Mechanism – Electric Drive of Rolling Mill Stand 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
 17. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клети толстолистового прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Известия вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 6. С. 55-64.
 18. Karandaev A.S., Khrashin V.R., Andryushin I.Yu., Petryakov S.A., Khrashin R.R. Method for correction of gauge interference of the head-strip section in a system for automated controlling of the thickness of a broad-strip hot-rolling mill (2013) Russian Electrical Engineering, 84 (8), pp. 441-445.
 19. Краус Б.А. Регулирование скорости электропривода чистовой клети стана горячей прокатки при заходе металла в валки // Известия вузов. Электромеханика. 1980. №10. С. 1079-1081.
 20. Казанцев, В.П. Системы управления исполнительными механизмами. Пермь: РИО ПГТУ, 2010. https://studopedia.ru/13_38492_ispolnitelnimi-mehanizmami.html
 21. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khrashin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, №1. С. 101-111. DOI: 10.14529/power180109

Поступила в редакцию 23 июля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPENSATION OF DYNAMIC LOADS OF THE ROLLING STAND ELECTRIC DRIVE BY MEANS OF ANTICIPATORY SPEED INCREASE

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. (Engineering), Head of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

The aim of the research work is to limit dynamic loads of electro-mechanical systems of rolling mill stand rolls operating with impact application of load. The investigations were carried out using data from the electric drive of a reverse stand of the plate mill 5000 of the PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (PJSC "MMK"). It is noted the problem is really urgent due to the increase of the product range and introduction of new rolled products from difficult-to-form steel grades. The research group found that the cause of the over-tolerance dynamic loads during metal pick up by the rolls was the angular gaps in the power transmission. The paper considers the mechanism of impact origination in spindle junctions at the moment of closing of the angular gap. It was shown that at present the main way to limit them is to pick up metal in the mode of electric drive acceleration. The research group carried out the analysis of oscillograph records of motor torques and drive shaft torques of the reversing stand of the mill 5000 during metal pickup by the rolls. It was concluded that in spite of the significant limitation of loads, this method can't provide the necessary reduction in the dynamic torque. It was stated that the main reason of this was overregulation of the torque caused by the setting of the double-loop automatic control system of the electric drive speed. In order to limit this component, a new method was proposed, which surpasses acceleration by the value of the dynamic deviation of the speed control at the impact application of load. Empirical equations were proposed to calculate deviations in the single- and double-integrating automatic control systems of speed. The paper shows oscillograph records of the electric drive coordinates during metal pickup when the developed algorithm was implemented at the rolling mill 5000. The value of the impact load decreased by 1.45

times confirming the technical efficiency of the developed method. To further reduce the dynamic loads, it was recommended to form speed diagrams of the electric drive providing motor breaking with the preset rate after the metal pickup.

Keywords: plate rolling mill, reversing stand, the main line, spindle joint, angular play, load, impact application, torque, overregulation, limitation, electric drive, speed, method, system, development, experimental investigations, recommendations.

REFERENCES

1. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrashin V.R. Method of Limiting the Dynamic Loads on Hot Plate Mill's Mechatronics System. IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). 2019. P. 43-47. DOI: 10.1109/ICMIMT.2019.8712076.
2. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Justification of methods of dynamic load limitation at electro-mechanical systems of the rolling mill stand // *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No. 1(38). P. 14-25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Khrashin V.R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 1780-1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
4. 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

5. Gasiyarov 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. Chertkov G.V. *Oborudovanie prokatnukh i pressovykh tsekhov. Elektronnyi atlas konstruktiv i detaley izuchaemogo oborudovaniya* [Equipment of rolling and molding shops. Electronic atlas of design and parts of the examined equipment]. Study guide / G.V. Chertkov. Samara: Publishing center of Samar State Airspace University, 2012. 100 p. (In Russian)
7. 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. P. 315-323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8.
8. Khramshin 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. P. 1761-1767. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.710
9. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Method of Load Calculation of Electrical Drives of Rolling mills During Heavy Plate Manufacturing. 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/361/1/012014.
10. 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.
11. 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), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 651-656. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317180.
12. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Maklakov A.S. Use of Automated Electric Drives for Limiting Dynamic Loads in Shaft Lines of Roll Mill Stands. The Journal of Engineering. The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). 2018. 4 p. DOI: 10.1049/joe.2018.8135.
13. Didenko E.E. Ways to decrease dynamic loads of work roll transmissions during feeding the strip into stands of the finishing train of a hot rolling mill / E.E. Didenko // *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production facilities]. 2017. No. 1. P. 25-27. (In Russian)
14. Krot P.V., Putnoki A.Yu., Klevtsov O.M., Ermovenko A.A. Experimental investigations and pilot research of the ways to decrease dynamic loads in gear lines of drives of 1680 NTLS roughing stands // *Trudy V Kongressa prokatchikov, Cherepovets, 21-23 oktyabrya 2003 g.* [In the collection of scientific papers: «Proceedings of V Congress of Rollermen, Cherepovets, October 21-23, 2003»]. Moscow: OJSC «Ferrous metal information», 2004. P. 523-529. (In Russian)
15. Bychkov V.P. *Elektroprivod i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Electric drive and automation of metallurgical production]: Study guide for universities. 2 revised and enlarged edition Moscow: High school, 1977. 392 p. (In Russian)
16. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System «Hydraulic Screwdown Mechanism – Electric Drive of Rolling Mill Stand» 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
17. Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khramshin V.R., Odintsov K.E. Development of a mathematical model of the interrelated electro-technical systems of a stand of a plate rolling mill // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electrical Engineering]. 2017. Vol. 60. No. 6. P. 55-64. (In Russian)
18. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Petryakov S.A., Khramshin R.R. Method for correction of gauge interference of the head-strip section in a system for automated controlling of the thickness of a broad-strip hot-rolling mill (2013) *Russian Electrical Engineering*, 84 (8), pp. 441-445.
19. Kraus B.A. Control of electric drive speed of a finishing train stand of a hot rolling mill during metal pickup by the rolls // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electrical Engineering]. 1980. no. 10. pp. 1079-1081.
20. Kazantsev V.P. *Sistemy upravleniya ispolnitelnymi mekhanizmami* [Control systems of actuating units] / V.P. Kazantsev – Perm, RIO PGU – 2010. https://studopedia.ru/13_38492_ispolnitelnimi-mekhanizmami.html (In Russian)
21. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of SUSU. Series "Power engineering"]. 2018. Vol. 18, no. 1. pp. 101–111. DOI: 10.14529/power180109

Гасияров В.Р. Способ компенсации динамических нагрузок электропривода прокатной клетки за счет опережающего увеличения скорости // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 39-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-39-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-39-46)

Gasiyarov V.R. Compensation of Dynamic Loads of the Rolling Stand Electric Drive by Means of Anticipatory Speed Increase. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 39-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-39-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-39-46)