

УДК 621.771.23

Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана

А.С. Карандаев¹, В.Р. Храмшин¹, А.А. Радионов¹, И.Ю. Андрушин², В.В. Галкин², А.Н. Гостев²
¹ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация
²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: askaran@mail.ru, hvr_mgn@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующая система автоматического регулирования нулевого натяжения проката в непрерывной подгруппе черновых клетей стана 2000 ОАО «ММК» не соответствует современным требованиям и малоэффективна в условиях расширения сортамента прокатываемых полос. В связи с этим вопрос повышения эффективности системы автоматического регулирования в настоящее время является актуальным.

Материалы и методы: Используются методы математического моделирования взаимосвязанных электромеханических систем трехклетевой черновой группы, экспериментальные исследования проведены на действующем стане.

Результаты: Предложены алгоритм, функциональная схема усовершенствованной системы, благодаря которой обеспечивается регулирование скоростей непрерывной подгруппы клетей с требуемой точностью. Представлены результаты экспериментальных исследований.

Выводы: Достигнуто повышение устойчивости технологического процесса и снижение динамических нагрузок за счет согласования скоростей взаимосвязанных клетей в установившемся и динамических режимах.

Ключевые слова: стан горячей прокатки, непрерывная подгруппа клетей, согласование скоростей, внедрение результатов, экспериментальные исследования.

Correlation of Speed Modes of Cages Electric Drives of Rolling Mills Continuous Group

A.S. Karandayev¹, V.R. Khrumshin¹, A.A. Radionov¹, I.Yu. Andryushin², V.V. Galkin², A.N. Gostev²
¹Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
²JSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: askaran@mail.ru, hvr_mgn@mail.ru

Abstract

Background: The existing automatic control system of regulatory type of zero tensioning of hire in a continuous subgroup of roughing stands of a 2000 Open Join - Stock Company «ММК» mill does not meet modern demands and is ineffective in the conditions of gauge spreading rolling strips. Thus, the issue to increase the efficiency of automatic control system is very urgent.

Materials and methods: The methods of mathematical modeling of the interconnected electromechanical systems three stands roughing group are used, experimental researches on an acting mill are led.

Results: The algorithm, the functional diagram of advanced system due to which the regulation of speeds of a cages continuous subgroup with demanded accuracy are offered. The results of the experimental researches are presented.

Conclusions: The stability improvement of the technological process and decrease the dynamic loads at the expense of the coordination of speeds of the interconnected cages in installed and dynamic modes are attained.

Key words: hot rolling mill, continuous subgroup of cages, correlation of speeds, implementation, experimental studies.

Непрерывная прокатка представляет собой сложный процесс взаимодействия очагов деформации через прокат. Клетки и автоматизированные электроприводы представляют собой сепаратные системы, между которыми существуют естественные перекрестные связи, основной из которых является силовая связь клетей через обрабатываемый металл. Физическая сущность силовой связи – натяжение либо подпор проката в межклетевом промежутке. В непрерывных группах прокатных клетей могут существовать и другие взаимосвязи электроприводов, например через питающую сеть. Однако они являются менее существенными по сравнению с сило-

выми связями через металл и в большинстве случаев их влиянием пренебрегают.

На рис. 1 показан фрагмент технологической линии стана 2000 ОАО «ММК»: черновая группа клетей, состоящая из трех вертикальных (двигатели $D_{1в}-D_{3в}$) и трех горизонтальных клетей (№№ 4–6, двигатели $D_{1г}-D_{3г}$), объединенных в непрерывную подгруппу, взаимосвязанных в процессе прокатки через полосу.

В настоящее время в составе системы автоматического управления непрерывной подгруппой функционирует система автоматического регулирования нулевого натяжения (САРНН), представляющая собой управляю-

щую программу, загруженную в контроллер DR125, который задает скоростные режимы работы главных приводов горизонтальных и вертикальных клетей. На рис. 2 приведена упрощенная функциональная схема САРНН. Система поддерживает заданное натяжение проката между 4-й и 5-й клетями изменением скорости 4-й клетки, натяжение между клетями 5 и 6 регулируется изменением скорости 6-й клетки. На скорости 5-й клетки в процессе работы САРНН влияние не оказывает. Поддержание заданной величины натяжения в межклетевых промежутках осуществляется безлуперным способом (косвенное регулирование).

Натяжение в межклетевом промежутке между 4 и 5 клетями рассчитывается по формуле

$$U_{к4}, U_{к64-5} = \frac{P_4}{R_{в4}} (L_{4-0} - L_4), \quad (1)$$

где P_4 – давление металла в 4-й клетке; $R_{в4}$ – радиус рабочих валков; L_{4-0} – плечо свободной прокатки (значение плеча прокатки до момента входа металла в 5-ю клетку); L_4 – текущее значение плеча прокатки (при нахождении металла одновременно в 4-й и 5-й клетях).

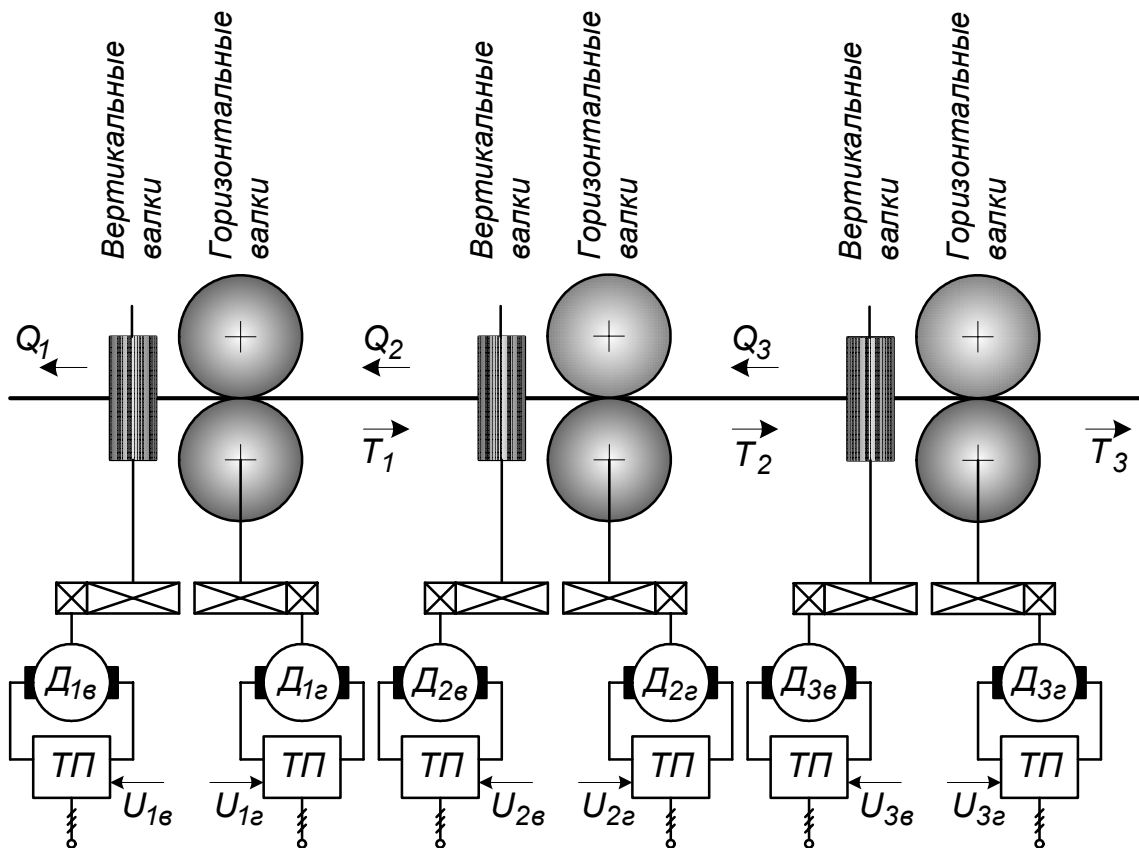


Рис. 1. Схема трехклетевой непрерывной подгруппы черновой группы клетей

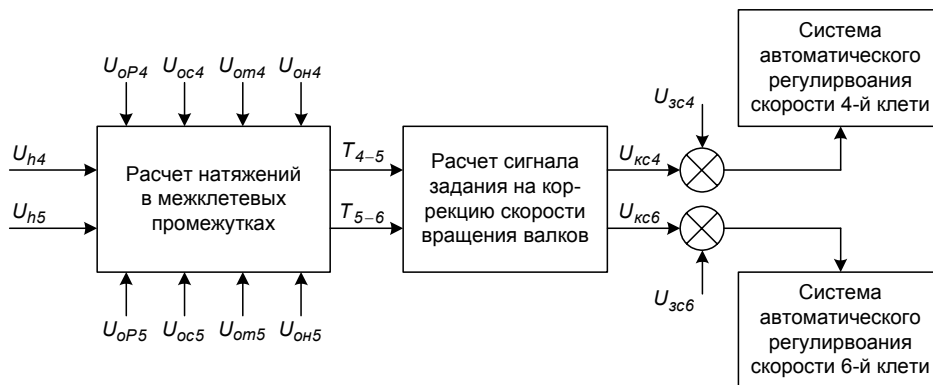


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического регулирования нулевого натяжения: $U_{oc4}, U_{oc5}, U_{om4}, U_{om5}, U_{on4}, U_{on5}, U_{op4}, U_{op5}$ – сигналы, пропорциональные скоростям вращения двигателей, токам якорей и напряжениям на двигателях, давлению металла на валки 4-й и 5-й клетей соответственно; $U_{н4}, U_{н5}$ – сигналы, пропорциональные величинам зазоров горизонтальных валков; T_{4-5}, T_{5-6} – сигналы, пропорциональные натяжению в межклетевых промежутках между 4, 5 и 5, 6 клетями; $U_{к4}, U_{к6}$ – сигналы задания на коррекцию скоростей вращения валков 4-й и 6-й клетей; $U_{зс4}, U_{зс6}$ – сигналы задания на скорости вращения валков 4-й и 6-й клетей

Косвенный расчет мгновенного плеча прокатки осуществляется по параметрам электропривода 4-й клетки:

$$L_4 = \left[\frac{(U_{я4-1} - I_{я4-1} R_{я4-1}) I_{я4-1} + (U_{я4-2} - I_{я4-2} R_{я4-2}) I_{я4-2}}{\omega_{дв4}} - J_4 \frac{d\omega_{дв4}}{dt} \right] \frac{1}{P_4}, \quad (2)$$

где $U_{я4-1}$, $I_{я4-1}$, $R_{я4-1}$, $U_{я4-2}$, $I_{я4-2}$, $R_{я4-2}$ – напряжения, токи и сопротивления 1-го и 2-го якорей двухякорного двигателя 4-й клетки; J_4 – суммарный момент инерции электропривода валков, приведенный к валу электродвигателя; $\omega_{дв4}$ – угловая скорость вращения двигателя 4-й клетки.

Аналогично рассчитываются натяжение T_{5-6} и плечо L_5 прокатки в промежутке между 5-й и 6-й клетями.

Вычисленные мгновенные значения межклетевых натяжений T_{4-5} и T_{5-6} поступают в блок регулирования, где сравниваются с заданными значениями межклетевых натяжений. В зависимости от рассогласований между расчетными и заданными значениями корректируются скорости 4-й и 6-й клетей. Пределы величин коррекции составляют:

- для 4-й клетки – от $-0,2$ до $+0,2$ м/с;
- для 5-й клетки – от $-0,25$ до $+0,25$ м/с.

Задания натяжений вводятся в контроллер DMC АСУ 2-го уровня и для большей части сортамента:

- между 4 и 5 клетями – $T_{4-5} = 5$ т;
- между 5 и 6 клетями – $T_{5-6} = 10$ т.

В ходе проводимой научно-исследовательской работы выполнены экспериментальные исследования условий захвата полосы и изменений натяжения в процессе прокатки. В результате показано, что существующая система поддержания нулевого натяжения не соответствует современным требованиям и малоэффективна в условиях расширения сортамента прокатываемых полос [1].

Фрагмент характерной осциллограммы представлен на рис. 3. Прокатка ведется с натяжениями, в несколько раз превышающими требуемые минимальные значения. Диапазон отклонений натяжения в промежутке между 4-й и 5-й клетями составляет от -20 до $+25$ кН (заданное натяжения составляет 5 кН). Отклонение натяжения в промежутке между 5-й и 6-й клетями превышает 50 кН при заданном значении 10 кН, что не может быть признано приемлемым. Изменение натяжения во втором промежутке после захвата полосы валками 6-й клетки (момент времени, примерно, 24 с) оказывает существенное влияние на натяжение в предыдущем промежутке, т.е. возмущающее воздействие передается «через клеть», что свидетельствует о несовершенстве существующих алгоритмов управления.

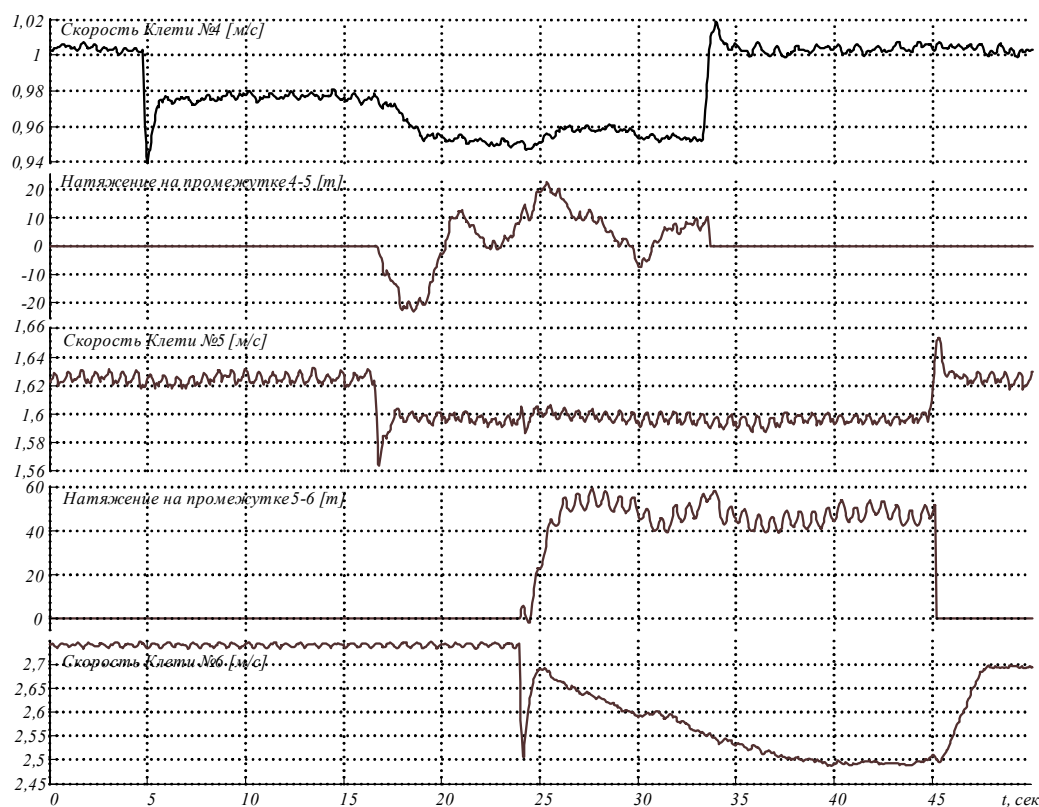


Рис. 3. Осциллограммы изменения технологических параметров прокатки в черновой группе при существующей САРНН

Выявлены причины неудовлетворительного регулирования натяжения, основными из которых являются:

- несогласованность скоростей смежных клеток при захвате полосы последующей клетью;
- невозможность учета и коррекции статических просадок скорости в системе с пропорциональным регулятором скорости;
- наличие неконтролируемых продольных усилий в раскате между смежными клетями;
- низкое быстродействие системы коррекции скоростного режима;
- недостаточная точность системы косвенного вычисления натяжения по параметрам электропривода;
- низкая точность алгоритмов задания скоростного режима от АСУ верхнего уровня.

Экспериментально установлено, что на качество регулирования натяжения и условия захвата полосы наибольшее влияние оказывает точность расчета плеча прокатки, для чего в системе используется сигнал давления на валки от месдоз, поэтому влияние точности измерения давления в существующей САРНН является определяющим.

Разработана математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем трехклетевой черновой группы, реализованная в программной среде Simulink. В качестве исходных параметров при моделировании приняты параметры электроприводов черновой группы клеток и технологические параметры прокатки. Выполнены исследования динамических режимов, возникающих в процессе прокатки. В результате сделаны следующие выводы:

1. Вертикальные клетки практически не оказывают влияния на согласование скоростей, поэтому при разработке усовершенствованного варианта САРНН их можно не учитывать. Анализ их влияния целесообразен только

для исследования динамических ударов, возникающих вследствие несогласованности скоростей.

2. Изменения натяжения оказывают незначительное влияние на геометрические размеры полосы в черновой группе; отклонения толщины и ширины находятся в пределах 2,5–3 %. Толщина в ходе дальнейшей прокатки регулируется в чистовой группе, а разношерность устраняется эджерами.

В результате проведенных исследований даны рекомендации по совершенствованию действующей САРНН. На первоначальном этапе предложено:

- ввести алгоритм коррекции скорости «по ходу прокатки», т.е. после захвата полосы предыдущей клетью по ее реальной скорости устанавливать скорость последующей клетки;
- перейти от регулирования с использованием давления к алгоритму с использованием сигналов по статическому току. Данный алгоритм позволит исключить производную скорости, присутствующую в зависимости (2), и сигналы с месдоз.

На рис. 4 представлена функциональная схема системы управления натяжением полосы, реализующая данные предложения (за основу приняты разработки, рассмотренные в [2, 3]). Натяжение косвенно оценивается по изменению токовой нагрузки электропривода предыдущей клетки при захвате металла последующей клетью. Регулирование натяжения осуществляется путем изменения скорости последующей клетки. Первоначально с помощью блока задания скорости БЗС, функции которого возложены на технологический контроллер, на входы систем автоматического регулирования скорости вращения валков, в соответствии с программой прокатки подаются настроечные управляющие сигналы.

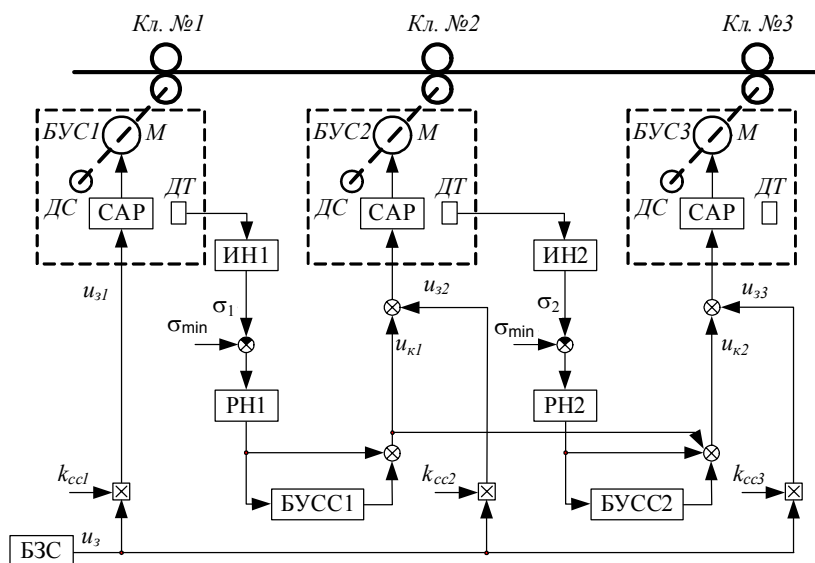


Рис. 4. Функциональная схема системы автоматического управления натяжением полосы без датчиков усилия прокатки

Однако, как показано выше, в большинстве случаев выбор начальных скоростей не является оптимальным, что влечет за собой динамические удары в момент входа металла в последующую клетку. Необходимость точной оценки рассогласования соотношения скоростей и дополнительной коррекции скоростного режима требует введения в систему функциональных блоков управления соотношением скоростей (БУСС). Каждый из этих блоков производит фильтрацию корректирующего сигнала, поступающего с регулятора натяжения, в целях выделения постоянной составляющей, которая характеризует степень рассогласования соотношения скоростей двух смежных клеток при их работе в режиме холостого хода.

Алгоритм вычисления удельного натяжения σ_i для i -го межклетевого промежутка имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_i &= M_{при}^* - M_i + \frac{R_i}{R_{i-1}} \Delta M_{i-1}, \\ M_{при}^* &= M_i - \Delta M_{i-1} \frac{R_i}{R_{i-1}}, \\ \sigma_i &= \frac{\Delta M_i}{Q_i R_i}, \end{aligned} \right\}$$

где i – номер клетки; ΔM_i – изменение момента электропривода, вызванного усилием натяжения; Q_i – сечение проката в i -м межклетевом промежутке.

Испытания алгоритма, предложенного в данной системе, проведены на стане 2000. Благодаря его реализации обеспечивается регулирование скоростей 4-й, 6-й клеток с по-

грешностью, не превышающей 5 % (рис. 5). Как следует из сопоставления осциллограмм, представленных на рис. 3 и 5, диапазон отклонений натяжения в первом межклетевом промежутке уменьшился в 2 раза (± 20 кН на рис. 3 и $(-7) - (+10)$ кН на рис. 5). Для второго межклетевого промежутка зафиксировано снижение усредненных отклонений натяжения более чем в 2 раза: от 50 кН до 25 кН.

Как отмечается в [2], данная система управления может получить широкое применение в черновых и промежуточных группах клеток с небольшой длиной раскатов и относительно небольшим изменением геометрических параметров очага деформации, вызванным нестабильностью температурного режима прокатки. Возможность управления оператором величиной задания натяжения σ_{min} позволяет добиться минимального уширения концевых участков прокатываемой полосы в соответствии с методикой, изложенной в [4]. В рассмотренном варианте управление натяжением полосы осуществляется корректирующим воздействием на систему регулирования скорости двигателя. Однако в целях увеличения быстродействия регулирование натяжения может осуществляться воздействием непосредственно на формирование момента двигателя [5].

При планируемой реконструкции АСУТП стана рекомендовано внедрить разработанный более сложный алгоритм с разделением прокатки на 4 интервала [1].

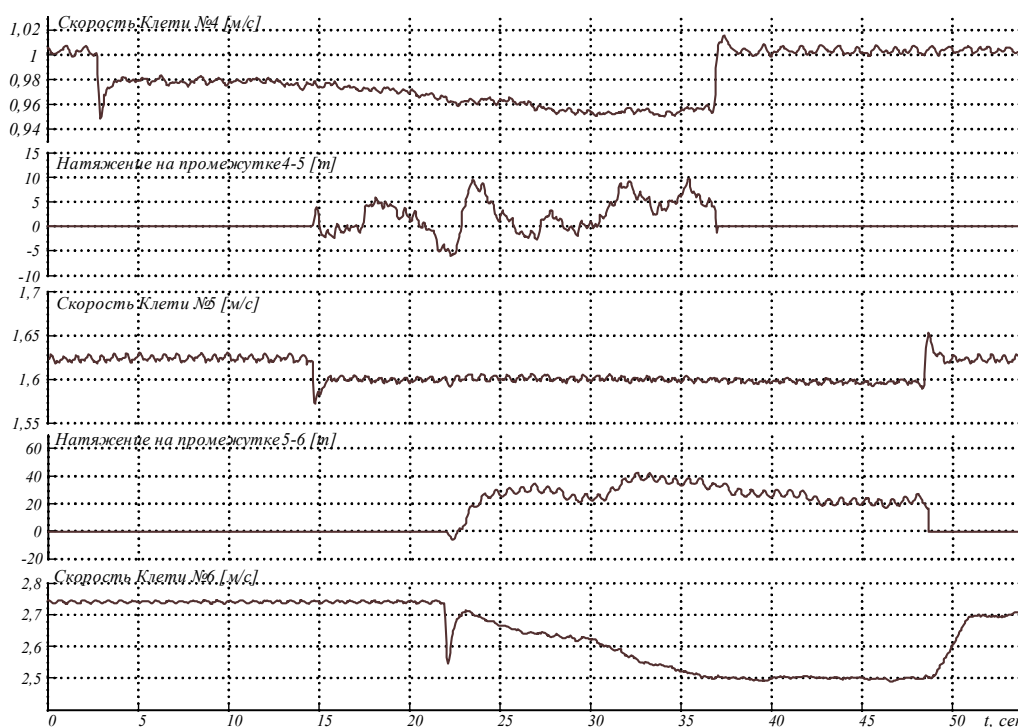


Рис. 5. Осциллограммы, аналогичные рис. 3, при управлении по алгоритму в предложенной системе

Основные технические эффекты:

- улучшение условий захвата полосы валками, снижение аварий, связанных с застреванием полосы;
- повышение точности регулирования межклетевых натяжений в непрерывной подгруппе черновой группы;
- повышение устойчивости технологического процесса за счет реализации усовершенствованных алгоритмов управления скоростным режимом клетей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК 16.740.11.0072).

Список литературы

1. **Совершенствование** алгоритма согласования скоростей электроприводов клетей черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, В.В. Галкин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск, 2011. – Вып. 16. – № 34 (251). – С. 35–41.
2. **Сушников А.А.** Разработка и исследование компьютеризованных взаимосвязанных электроприводов непрерывных сортовых прокатных станов: дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГЭТУ, 2005. – 183 с.
3. **Pat. WO9727012**, IPCB 21 B 37/52, B 21 B 37/16. System and method for rolling slabs / Bouchillon Milton Skott, Wohld Dietrich; applicants Siemens AG, Bouchillon Milton Skott, Wohld Dietrich. WO1997EP00098; publication date 19970731.
4. **Салганик В.М., Тулупов Д.Н.** Исследование и совершенствование процесса непрерывной сортовой прокатки

Карандаев Александр Сергеевич,
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
главный научный сотрудник НИС, доктор технических наук, профессор,
телефон (3519) 29-17-19,
e-mail: askaran@mail.ru

Храмин Вадим Рифхатович,
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры электротехники и электротехнических систем,
телефон (3519) 22-17-19,
e-mail: hvr_mgn@mail.ru

Радионов Андрей Александрович,
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,
телефон (3519) 29-17-19,
e-mail: radionovaa@ Rambler.ru

Андрюшин Игорь Юрьевич,
«Магнитогорский металлургический комбинат»,
главный инженер Управления главного энергетика, кандидат технических наук,
телефон (3519) 24-38-25,
e-mail: andryushin.iy@mmk.ru

Галкин Валерий Владимирович,
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»,
начальник научно-технического центра,
телефон (3519) 24-72-93,
e-mail: galkin.vv@mmk.ru

Гостев Анатолий Николаевич,
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»,
электрик ЛПЦ-10,
телефон (3519) 24-72-90,
e-mail: gostev.an@mmk.ru

с натяжением // Производство проката. – 2004.– № 7. – С. 26–31.

5. **Pat. 1738400 А1 РФ**, МПК7 В 21 В 37/00. Способ регулирования межклетевого натяжения и устройство для его осуществления / А.А. Зубок, Н.М. Чиркова. Опубл. 07.06.92. Бюл. № 21. – С. 86.

References

1. Karandaev, A.S., Khramshin, V.R., Galkin, V.V. Sovershenstvovanie algoritma soglasovaniya skorostey elektroprivodov kletey chernovoy gruppy stana goryachey prokatki [Improvement of the Algorithm Correlation of Electric Drives Speeds of Cages of Roughing Mill Group of Hot Rolling Mill]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*, 2011, vol. 16, no. 34 (251), pp. 35–41.
2. Sushnikov, A.A. *Razrabotka i issledovanie komp'yuterizirovannykh vzaimosvyazannykh elektroprivodov nepreryvnykh sortovykh prokatnykh stanov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and Research of Computer Interconnected Electric Drives of Continuous Section Mill, Candidate of Engineering]. Saint-Petersburg, 2005. 183 p.
3. **Pat. WO9727012**, IPCB 21 B 37/52, B 21 B 37/16. System and method for rolling slabs / Bouchillon Milton Skott, Wohld Dietrich; applicants Siemens AG, Bouchillon Milton Skott, Wohld Dietrich. WO1997EP00098; publication date 19970731.
4. Salganik, V.M., Tulupov, D.N. *Issledovanie i sovershenstvovanie protsessa nepreryvnoy sortovoy prokatki s natyazheniem* [Research and Improvement of Continuous Section Mill Process with Tension]. *Proizvodstvo prokata*, 2004, no. 7, pp. 26–31.
5. Zubok, A.A., Chirkova, N.M. *Sposob regulirovaniya mezhkletevogo natyazheniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Regulation Method of Interstand Tension and Its Device]. Patent RF, no. 1738400, 1992.