

The results of experimental and theoretical research of the electric drive of pulling rollers of continuous casting machine are presented. The author's methods of calculation of longitudinal forces and the pulling moments are given for the interroller space of the secondary cooling zone. The control algorithm of the pulling rollers electric drive of continuous casting machine is developed.

Keywords: Control system, electric drive of pulling rollers, force in the ingot, secondary cooling zone, continuous casting machine.

REFERENCES

1. Niskovskih V.M., Karlinskiy S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo litya slyabovyh zagotovok* [Slab continuous casting machines]. Moscow: Metallurgy, 1991. 272 p.
2. Margolin Sh.M. *Elektroprivod mashin nepreryvnogo litya zagotovok* [Electric drive of continuous casting machines]. Moscow: Metallurgy, 1987. 297 p.
3. Alshic V.M., Zelencov V.I., Bazhin B.G., Tikotskiy A.E. Elektroprivod peremennogo toka rolikovogo apparata mashiny nepreryvnogo litya zagotovok s individualnym pitaniem dvigatelei [AC electric drive of continuous casting machine rollers with individual power motors]. Proceedings of V International (XVI all-Russian) conference on automatic electric drive AEP-2007. Saint-Petersburg, 2007, pp. 344 – 347.

4. Lukyanov S.I., Vasilyev A.E., Lukyanov D.S. *Avtomatizirovannyi elektroprivod tyanusche-pravilnogo ustroystva MNLZ* [Automated electric drive of drawing-levelling device of continuous casting machine]: Monograph. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2004. 179 p.

5. Lukyanov S.I., Fomin N.V., Hlystov A.I. Raschet prodolnyh usilii v slitke MNLZ [Calculation of the longitudinal force in ingot of continuous casting machines]. *Mathematical support and software of systems in industrial and social spheres: the international collection of scientific works*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, vol.II, pp. 137-142.

6. Lukyanov S.I., Fomin N.V., Hlystov A.I., Lukyanov E.S. Sistema upravleniya elektroprivodom tyanuschih rolikov mashiny nepreryvnogo litya zagotovok [Control system of electric drive of continuous casting machine pulling rollers]. *Vestnik of Ivanovo State Power University*. 2012, no. 6, pp. 104-109.

7. Lukyanov S.I., Vasilyev A.E., Shvidchenko D.V. et al. *Avtomatizirovannyi elektroprivod tyanusche-pravilnogo ustroystva mashin nepreryvnogo litya* [Automated electric drive of drawing-levelling device of continuous casting machines]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University] 2006, no. 2 (14), pp.30-34.

УДК 621.311+621.34.001

Карандаев А.С., Храмшин В.Р.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПРИ РАСШИРЕНИИ СОРТАМЕНТА ПОЛОС

Показано, что современной тенденцией совершенствования технологии широкополосных станов горячей прокатки является расширение сортамента при производстве продукции малыми партиями. Расширение сортамента происходит как за счет производства толстых полос из труднодеформируемых марок стали, так и за счет производства особо тонкой полосы, являющейся конечной продукцией металлургического предприятия. Отмечены технологические особенности прокатки полос расширенного сортамента на широкополосных станах 2000 и 2500 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Рассмотрены разработки, обеспечивающие энергосбережение за счет снижения потребления реактивной мощности тиристорными электроприводами клетей без применения компенсирующих устройств. Представлен комплекс разработанных и внедренных технических решений по совершенствованию систем автоматического регулирования технологических параметров: натяжения, толщины полосы и скоростных режимов прокатки. Показано, что разработанные системы обеспечивают ресурсосбережение за счет снижения материалоемкости и улучшение качества полосы за счет повышения точности регулирования натяжения и толщины в установившихся и динамических режимах.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, сортамент, автоматизированный электропривод, энергосбережение, технологические параметры, системы автоматического регулирования, совершенствование, экспериментальные исследования, внедрение.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ (ШСГП)

В прошедшие десятилетия существенно изменились потребности рынка в продукции прокатного производства. При этом явно выражены две противоречивые тенденции: с одной стороны, растет спрос на тонкую горячекатаную полосу (толщиной 0,7-1,2 мм), являющуюся конечной рыночной продукцией, с другой – в качестве основной перспективы ШСГП названа прокатка толстой полосы из труднодеформируемых и специальных сталей [1, 2]. Наряду с изменением конъюнктуры рынка качественно изменились требования потребителей. Исследования, проведенные международным институтом чугуна и стали (IISI), выявили

главное требование к металлургическому производству, которое должно быть удовлетворено в XXI веке – это поставка стали высокого качества при низкой стоимости, малыми партиями и в короткое время [3, 4].

На **рис. 1** представлены диаграммы, характеризующие сортамент сталей, прокатываемых на европейских заводах, представленные фирмой «Schloemann-Demag» («SMS-Demag», Германия) [5]. Необходимо отметить значительную долю мягких нелегированных сталей, используемых для холодной формовки и прокатки. Доля полос толщиной 0,7-1,2 мм составляет 57% всех холоднокатаных полос из мягких нелегированных сталей, доля полос шириной 900-1300 мм – 72%. Подобное распределение характерно также для США и для других развитых стран.

Представленные данные наглядно демонстрируют факт, что современный высокопроизводительный стан горячей прокатки полосы не используется на полную мощность при прокатке большинства марок сталей. Кроме того, на всех широкополосных станах горячей прокатки имеются технологические ограничения сортамента продукции, в частности, в направлении уменьшения конечных толщин. На обычном высокопроизводительном стане хорошее качество обеспечивается при толщине полосы не ниже 1,5 мм. При попытке получить полосу толщиной менее указанной возникают технические и технологические трудности в связи с тем, что скорость и температура прокатки выходят за пределы допустимых диапазонов [6]. К тому же уменьшение конечной толщины полос приводит к снижению производительности стана.

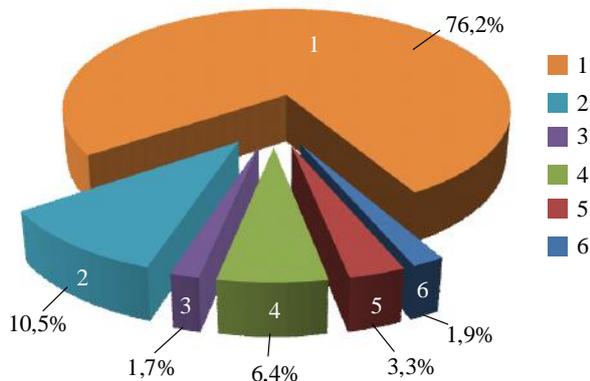


Рис. 1. Соотношение производства различных марок стали по двадцати западноевропейским странам:
 1 - мягкие нелегированные стали для холодной штамповки и прокатки; 2 - свариваемые конструкционные стали;
 3 - высокопрочные углеродистые стали; 4 - микрولةгированные конструкционные и трубные свариваемые стали с мелкозернистой структурой; 5 - нержавеющие стали; 6 - кремнистые электротехнические стали

Считается, что в будущем использование обычных высокопроизводительных станом будет целесообразно для прокатки труднодеформируемых и специальных сталей, в основном используемых в качестве заготовки для производства труб большого диаметра. При совершенствовании этих станом (в процессе создания новых и модернизации действующих) основное внимание следует уделять повышению производственной гибкости и внедрению высокоточных автоматизированных систем управления.

Одновременно растет рыночный спрос на тонкую горячекатаную полосу. Так, по данным фирмы «Voest-Alpine Industrieanlagenbau» – (VAI, Австрия), доля полосы толщиной 1,2-2,0 мм в 2005 г. составила 25% за счет снижения спроса на полосу толщиной 2-25 мм (с 82% в 1995 г. до 74% в 2005 г.). Таким образом, общемировой тенденцией является переход на производство тонкой горячекатаной полосы, являющейся конечной рыночной продукцией металлургических предприятий [7, 8].

Перечисленные выше тенденции, связанные с изменением сортамента традиционных ШСГП, в полной мере касаются ОАО «ММК». Предварительные расчеты, выполненные специалистами-технологами, показали принципиальную возможность прокатки трубной

заготовки. Разработаны технологии производства полос толщиной 18 мм и выше из труднодеформируемых марок стали из слябовой заготовки толщиной до 300 мм на широкополосном стане 2000. Прокатка, выполненная на стане, выявила ряд технологических проблем, связанных с особенностями производства трубной заготовки. Они вызваны низкими скоростями прокатки, высокими, неравномерными обжатиями по клетям. Это приводит к недопустимому снижению скоростей валков в момент захвата, ухудшению качества поверхности полосы, а в ряде случаев – к аварийной остановке стана.

В то же время реконструкция стана 2500 направлена на расширение сортамента и увеличение производства полос толщиной 0,8-1,5 мм. Производство тонкой полосы требует высокой точности регулирования натяжений, обеспечиваемой за счет согласования и совместного регулирования скоростей электроприводов всех клеток чистой группы. При этом принципиально новыми требованиями являются обеспечение точности регулирования скорости в динамических режимах и быстродействующая коррекция скоростей при возмущающих воздействиях, возникающих в процессе прокатки и при вмешательстве оператора. Это предопределило необходимость совершенствования алгоритмов и систем управления режимами электроприводов и автоматического регулирования технологических параметров: натяжения, толщины полосы и скорости прокатки [9, 10].

В рамках научно-исследовательских работ, финансируемых за счет средств Министерства образования и науки РФ (ГК 02.740.11.0755 и ГК 16.740.11.0072), и договорных работ с ОАО «ММК», выполнен комплекс научно обоснованных, концептуально связанных разработок по совершенствованию электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосных станом горячей прокатки, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение при расширении сортамента полос [11]. Ниже рассматриваются основные внедренные разработки.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТИРИСТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПРОКАТНЫХ СТАНОМ

Наиболее энергоемкими электромеханическими системами металлургических предприятий являются электроприводы (ЭП) постоянного тока прокатных станом. Энергетические показатели таких электроприводов далеки от оптимальных. Большая часть потерь электрической энергии связана с потреблением реактивной мощности, вызванным фазовым регулированием напряжения [12, 13].

Главные электроприводы клеток, как правило, выполняются с двухзонным регулированием скорости. К ним предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия и надежности при отработке ударного приложения нагрузки, возникающего при захвате металла валками, а также в режиме разгона под нагрузкой при прокатке с ускорением. Данные требования выполняются, если динамический запас системы регулирования, и в первую очередь запас выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя (ТП), будут обеспечены в названных динамических режимах. До-

2. Разработку и реализацию нового принципа построения высокодинамичных систем взаимосвязанного регулирования толщины и натяжения, обеспечивающих технические возможности производства горячекатаной полосы толщиной $0,8-1,5$ мм, являющейся конечной продукцией металлургического предприятия.
3. Совершенствование системы автоматического регулирования толщины (САРТ), с целью снижения разнотолщинности по длине полосы.

Принципы управления скоростными режимами в АСУТП широкополосного стана горячей прокатки [25]

В ходе комплексной модернизации электроприводов и создания современной АСУТП стана 2500 ОАО «ММК» предложены и реализованы новые принципы управления скоростными режимами ЭП чистой группы.

Каскадная коррекция скорости клеток [26]. Для ограничения высоты петли полосы в межклетевом промежутке разработаны система и алгоритм каскадной коррекции скоростей предыдущих клеток чистой группы. Суть заключается в том, что корректирующие воздействия складываются и передаются в направлении «против хода прокатки». При этом величина воздействия на скорость предыдущей клетки рассчитывается по изменению зазора валков. Регулятор размера петли воздействует на задание скорости, устраняет разницу между заданной и фактической длинами полосы в межклетевом промежутке, что позволяет сохранить высоту петли неизменной. В качестве опорной клетки используется последняя катающая клетка, корректирующие воздействия на нее отсутствуют. Это вызвано требованиями к постоянству скорости полосы на выходе из чистой группы. Единственным фактором, влияющим на скоростной режим, является ускорение после заправки полосы. Однако его величина постоянна, поэтому может быть учтена и скомпенсирована в системе регулирования охлаждения.

Компенсация статических отклонений скорости клетки [27-30]. В электроприводах чистой группы применены пропорциональные регуляторы скорости. Их настройка проведена таким образом, чтобы обеспечить максимально возможное быстродействие контура скорости при полном отсутствии перерегулирования. Однако применение П-регуляторов не позволяет учесть и внести в программу контроллера величину статического отклонения (просадки) скорости, зависящего от приложенной нагрузки и определяемого жесткостью механической характеристики. В результате этого управление от математической модели становится неэффективным. С целью устранения этого недостатка разработан узел компенсации статической просадки в программе управления скоростными режимами, включающий разомкнутый и замкнутый контуры компенсации, а также блок логики управления режимами. В результате длительных экспериментов показано, что таким образом обеспечивается наиболее эффективное регулирование с наименьшим влиянием на устойчивость в динамических режимах.

Совершенствование электромеханической системы автоматического регулирования натяжения полосы. К системам регулирования натяжения и петли

полосы современных широкополосных станов горячей прокатки предъявляются жесткие требования, направленные на обеспечение непрерывного контроля и поддержание точности регулирования натяжения как в установившихся, так и в динамических режимах. При прокатке тонких полос в непрерывной группе стана возникает значительное взаимное влияние натяжения и толщины полосы. Существующие системы, выполненные по принципу косвенного регулирования натяжения, не обеспечивают возросших требований по разнотолщинности при переходе на производство горячекатаной полосы толщиной $0,8-1,5$ мм. Упрощенные алгоритмы задания и регулирования натяжения, реализованные в аналоговых системах, приводят к появлению значительных погрешностей, которые при повышении требований к точности регулирования геометрических размеров не являются допустимыми. Это требует совершенствования алгоритмов вычисления и регулирования параметров, влияющих на натяжение, которые можно реализовать в системах, выполненных на основе промышленных контроллеров.

Вместе с тем только за счет повышения точности вычисления и регулирования технологических параметров не обеспечивается выполнение возросших требований к динамическим показателям. Возникла задача повышения быстродействия регулирования за счет максимального использования ресурса канала регулирования толщины, выполненного на базе гидравлических нажимных устройств. Наиболее целесообразным является построение системы взаимосвязанного регулирования натяжения и толщины, подобно тому, как это делается на станах холодной прокатки. Однако принципиальным отличием ШСГП является наличие петледержателей в межклетевых промежутках чистой группы.

Основными результатами являются:

1. Алгоритм вычисления задания момента электропривода петледержателя и аналитические зависимости для вычисления составляющих момента, обеспечивающие наиболее высокую точность задания и регулирования натяжения, по сравнению с известными аналогичными системами [31].

2. Способ и система косвенного взаимосвязанного регулирования натяжения и толщины полосы, отличительным признаком которых является дополнительное корректирующее воздействие на гидравлическое нажимное устройство предыдущей клетки межклетевого промежутка, подаваемое одновременно с корректирующим воздействием на скорость двигателя этой клетки [32].

3. Теоретические и экспериментальные исследования, которые показали, что применение быстродействующего контура с воздействием на гидравлическое нажимное устройство позволяет увеличить быстродействие системы регулирования натяжения и петли полосы во всех динамических режимах и тем самым обеспечить требуемые отклонения толщины полосы в пределах $\pm 5\%$ [33].

Полученные технические результаты наглядно представлены в виде диаграмм на **рис. 3** (на примере стана 2500 ОАО «ММК») [34].

Основные технические эффекты, обеспечиваемые при совершенствовании системы:

- снижение материалоемкости (ресурсосбережение) за счет повышения точности регулирования толщины на концах рулона;
- улучшение условий захвата полосы валками за счет реализации алгоритмов управления, обеспечивающих взаимное согласование работы системы регулирования натяжения и петли полосы и гидро-САРТ в динамических режимах;
- повышение размерной точности полосы за счет быстрого взаимосвязанного регулирования натяжения и толщины.

Совершенствование САРТ стана 2000. В результате экспериментальных исследований показано, что САРТ Davy McKee, установленная на стане 2000, обеспечивает разнотолщинность полосы по длине в пределах $\pm 0,1$ мм и уровень глссажных меток $\pm 0,05$ мм, что значительно превышает допуски. Для устранения этого недостатка разработаны функциональные схемы замкнутых систем статической и динамической коррекции разнотолщинности полосы, реализованные в виде алгоритмов в контроллерах АСУТП. Предложены усовершенствованные алгоритмы компенсации возмущающих воздействий, возникающих при прокатке в чистой группе.

Схема, поясняющая общий принцип построения САРТ, разработанной и технически исполненной на стане 2000, представлена на **рис. 4, а** [35, 36]. Задание на положение нажимных устройств (НУ) можно условно разделить на сигналы статической коррекции, отвечающей за получение проката требуемой толщины, и динамической коррекции, отвечающей за стабилизацию толщины на полосе. Сигналы статической коррекции остаются неизменными для всей партии полос, сигналы динамической коррекции рассчитываются на каждой полосе отдельно и сбрасываются при ее выходе из клетки.

Задание на положение гидравлического НУ определяется суммой задания статического рабочего (среднего) положения, динамической коррекции САРТ и грубой коррекции от выходного толщиномера ХОСПТ:

$$X_{ГНУ} = X_{раб} + X_{САРТ} + X_{ОСПТ}.$$

Функциональная схема системы динамической коррекции представлена на **рис. 4, б**. Входной сигнал Δh регулятора положения формируется как сумма

$$\Delta h = h_{зад} + h_{тлщ} + h_{след} + h_{внеш} - h_{тек}.$$

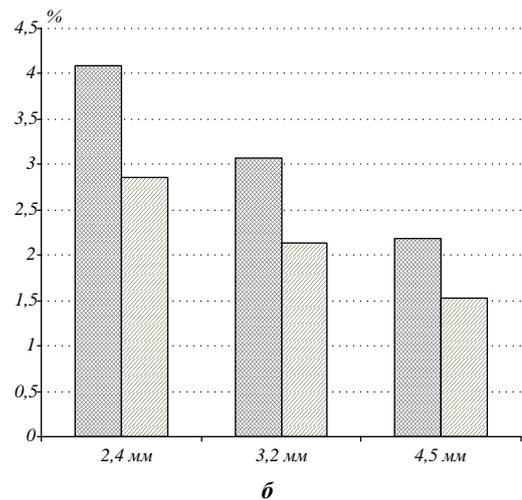
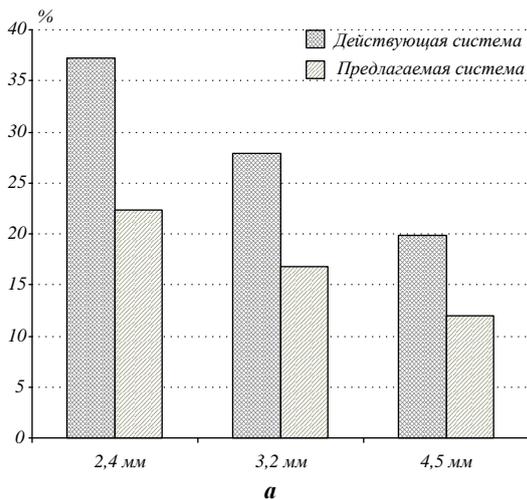


Рис. 3. Сравнение динамических отклонений натяжения (а) и толщины (б) в действующей и разработанной системах регулирования натяжения

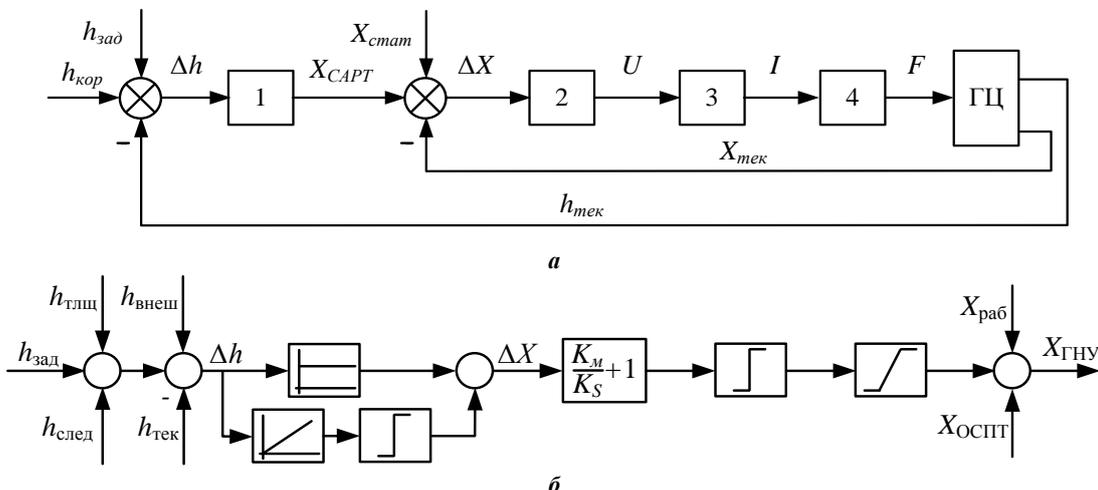


Рис. 4. Сигналы задания САРТ (а) сигналы и структура системы динамической коррекции толщины (б)

Расчет заданной толщины $h_{зад}$ осуществляется при включении режима стабилизации толщины при условии, что металл запроваден в следующую клетку, т.е. имеет место установившийся режим прокатки. Согласно разработанному алгоритму в течение заданного времени (≈ 400 мс) производится усреднение показаний датчиков положения и усилия прокатки, рассчитывается толщина на выходе из клетки и запоминается в качестве задания. Затем к заданию прибавляются сигналы коррекции:

– $h_{толщ}$ – тонкая коррекция от выходного толщиномера, она представляет собой интегрированную величину отклонения толщины от заданной на выходе из чистой группы;

– $h_{след}$ – коррекция от следующей клетки. Назначение: перераспределение регулирования на предыдущие клетки при приближении динамической коррекции НУ данной клетки к ограничению;

– $h_{внеш}$ – внешняя коррекция. Могут быть введены: компенсация толщины масляной пленки в подшипниках валков, компенсация теплового расширения валков, компенсация износа валков, упреждающая коррекция, и др.

Более подробное описание системы представлено в [35].

Разработана усовершенствованная САРТ, обеспечивающая перераспределение обжатий по клеткам чистой группы, исключая насыщение регулятора положения НУ последней клетки при больших корректирующих сигналах, поступающих от толщиномера [37]. Это позволяет ограничить интегральную коррекцию на последних клетках и тем самым не допустить замыкания контура регулирования толщины.

В целях реализации принципа упреждающей коррекции технологических параметров разработан алгоритм *параметрического регулирования толщины головного участка полосы путем упреждающего увеличения зазора валков перед входом полосы в клетку с последующим возвращением нажимных устройств в исходное положение для прокатки основного участка* [38, 39].

Для настройки параметров изменения зазора проведены эксперименты, в ходе которых исследована прокатка полос с различными параметрами коррекции по клеткам [40]. Также были выполнены исследования влияния изменения межвалкового зазора на отклонения толщины полосы методами математического моделирования [41, 42]. В результате обоснованы усредненные параметры коррекции толщины при прокатке головного участка для полос различного сортамента.

Также предлагается ввести в работу САРТ алгоритмы самообучения: оценивать величину коррекции и уровень разнотолщинности на головном участке на предыдущих полосах и в зависимости от их разности вычислять величину зазора, до которого следует разводить валки перед входом следующей полосы.

В настоящее время исследования проводятся при поддержке Министерства образования и науки РФ (в рамках государственного задания №2014-80).

Выводы

1. На основе развития концепции энергосберегающих электроприводов с перераспределением запаса

выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя разработаны способы и системы двухзонного регулирования скорости с переключающимися структурами, обеспечивающие снижение потерь электрической энергии, вызванных потреблением реактивной мощности. Разработана система двухзонного регулирования с автоматическим регулированием ЭДС двигателя в функции напряжения сети, обеспечивающая безопасное инвертирование при прокатке полос «тяжелого» сортамента.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан комплекс новых научных положений и практически значимых решений, направленных на теоретическое обоснование и создание автоматизированных электроприводов и электротехнических систем взаимосвязанного регулирования технологических параметров, обеспечивающих техническую возможность производства полос расширенного сортамента на действующих широкополосных станах горячей прокатки.

3. Теоретически и экспериментально доказано, что внедрение разработанных электроприводов, систем и алгоритмов обеспечивает необходимую размерную точность при производстве особо тонкой полосы и повышает устойчивость технологического процесса при прокатке толстых полос из труднодеформируемых марок стали. В результате обеспечиваются технические предпосылки для производства горячекатаных полос расширенного сортамента на отечественных металлургических предприятиях. Независимо от сортамента, внедрение разработанных технических решений обеспечивает энергосбережение за счет снижения потерь электрической энергии и ресурсосбережение за счет сокращения брака и потерь с концевой обрезью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Egawa N., Ishizuka H., Hirita T. Hot Rolling Technology for Producing High Quality Stainless steel at № 3 Hot Strip Mill in Chiba Works // MPT International. 1998. №23(30). P. 82-87 (англ.).
2. Bald W., Knepe Q., Rosenthal D., Sudau P. Innovative technologies for strip production // Steel Times Int. 2000. №5 (24). P. 16-19 (англ.).
3. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
4. Карандаев А.С. Автоматизированный электропривод непрерывно-реверсивного литейнопрокатного агрегата: дис. ... д-ра техн. наук / Карандаев Александр Сергеевич. Москва: МЭИ, 2000. 382 с.
5. Knepe G., Rozentel D. Hot strip rolling technology: Tasks for the new century // MPT International. 1998. № 3 (22). P. 56-58, 60, 62, 64, 66, 67 (англ.).
6. Определение энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров; Магнитогорск. гос. тех. ун-т им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2000. 8 с. Деп. в ВИНТИ 20.04.2000, № 1085-В00.
7. Новые технологии и оборудование для получения сверхтонкой горячекатаной полосы / М. Батис, М. Роту и др. // Сталь. 2004. № 3. С. 30-33.
8. Освоение технологии производства тонких полос и гнутых профилей / В.А. Сацкий, А.Ю. Путьки, В.Т. Тилик и др. // Сталь. 2003. № 10. С. 34-42.
9. Ограничение минимальных скоростей электроприво-

- дов стана 2000 при прокатке трубной заготовки / А.А. Радионов, И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 3. С. 20-22.
10. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмынин // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 31-35.
11. Храмынин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук / Храмынин Вадим Рифхатович. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. 393 с.
12. Федоров А.А., Корнилов Г.П., Карандаев А.С. Улучшение энергетических показателей электропривода в системе двухзонного регулирования частоты вращения // Изв. вузов. Энергетика. 1983. № 9. С. 29-33.
13. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмынин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 4. С. 35-39.
14. Концепция построения электроприводов прокатных станов с двухзонным регулированием скорости и улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.В. Головин, А.В. Осипов // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск). Ч.2. Магнитогорск, 2004. С. 260-264.
15. Карандаев А.С. Энергосбережение – приоритетное направление научных исследований энергетического факультета Магнитогорского государственного технического университета // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 5-10.
16. Карандаев А.С., Радионов А.А., Головин В.В. Система двухзонного зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 40-46.
17. Храмынин В.Р., Храмынин Р.Р., Лукин А.А. Способ регулирования уставки ЭДС двигателя прокатного стана в функции напряжения сети // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т.2. №70. С. 105-108.
18. Патент на полезную модель 121669 РФ, МПК7 Н 02 Р 7/06. Устройство двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока / В.Р. Храмынин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмынин, И.Ю. Андрушин // БИМП. 2012. №30. С. 112.
19. Храмынин В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ИГЭУ. 2012. №6. С. 100-104.
20. Храмынин В.Р. Повышение безопасности режима инвертирования тиристорного электропривода при прокатке полос расширенного сортамента // Электротехника. 2013. №2. С. 52-56.
21. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. №3. С. 47-53.
22. Экспериментальные исследования тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими характеристиками / А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин, А.А. Лукин, Г.В. Шурыгина, В.В. Головин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». 2010. №14. С. 67-72.
23. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмынин В.Р. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 4. С. 40-45.
24. Храмынин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы прокатных станов: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 180 с.
25. Технологические схемы управления электроприводами чистой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, П.В. Шилиев // Труды VII конгресса прокатчиков. Т.1. М., 2007. С. 71-75.
26. Каскадное управление скоростными режимами широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шилиев, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин // Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. СПб., 2007. С. 417-421.
27. Патент на изобретение 2477187 РФ, МПК7 В 21 В 37/52. Способ автоматического управления процессом прокатки в непрерывной группе клетей / И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, В.В. Головин, П.В. Шилиев, А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин, Р.Р. Храмынин // БИМП. 2013. №7.
28. Храмынин В.Р. Система автоматической коррекции скоростей электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». 2012. № 37 (296). С. 60-67.
29. Храмынин В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. 2013. №4. С. 49-55.
30. Андрушин И.Ю., Шилиев П.В., Головин В.В. Экспериментальные исследования системы автоматической коррекции натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». Вып. 11. 2009. № 15. С. 51-59.
31. Алгоритмы цифровой системы автоматического регулирования натяжения и петли широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шилиев, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин // Электротехника. 2013. №10. С. 3-11
32. Патент на изобретение 2446026 РФ, МПК7 В 21 В 37/48. Способ автоматического регулирования натяжения полосы в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин, П.В. Шилиев, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, П.Л. Пономарев // БИМП. 2012. №9. С. 117.
33. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки / Карандаев А.С., Храмынин В.Р., Андрушин И.Ю., Шилиев П.В., Головин В.В. // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 12-20.
34. Храмынин В.Р. Совершенствование электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки при расширении сортамента полос // Материалы VII Междунар. (XVII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012): сб. тр. Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ», 2012. С. 561-565.
35. Технические решения в системе автоматического регулирования толщины стана 2000 горячей прокатки / В.Р. Храмынин, И.Ю. Андрушин, П.В. Шилиев, С.А. Петряков, А.Н. Гостев // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 41-45.
36. Совершенствование системы автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмынин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмынин, И.Ю. Андрушин, С.А. Петряков // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу, Иваново: ФГОУ ВПО

«Ивановский государственный энергетический университет». 2012. С. 556-561.

37. Патент на полезную модель 117839 РФ, МПК7 В 21 В 37/00. Устройство автоматического регулирования толщины полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, С.А. Петряков, Р.Р. Храмшин // БИМП. 2012. №19. С. 36.

38. Патент на полезную модель 117329 РФ, МПК7 В 21 В 37/48. Устройство для коррекции толщины головного участка полосы в чистой клетке широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, С.А. Петряков, В.В. Галкин, Р.Р. Храмшин // БИМП. 2012. №18. С. 38.

39. 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.

40. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Исследование системы автоматической коррекции толщины полосы на широкополосном стане горячей прокатки // Изв. вузов. Электромеханика. 2013. №4. С. 39-46.

41. 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.

42. Hramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Hramshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». Вып. 13. 2013. № 1. С. 144-153.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF DRIVES AND AUTOMATIC CONTROL PROCESS PARAMETERS OF WIDE STRIP HOT ROLLING MILL IN THE PROCESS OF PRODUCT RANGE EXPANSION

Karandaev A.S., Khramshin V.R.

It is shown that the current trend of improving the technology of wide strip hot rolling mills is product mix expansion in the manufacture of small batches of products. Product mix expansion occurs due to the production of thick bands of hard steels, particularly thin strip, which is the final product of metallurgical enterprises. Technological features of product range extension at wide strip rolling mills 2000 and 2500 of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (OJSC "MMK") are listed. The authors dwell on developments providing energy savings by reducing the consumption of reactive power thyristor electric drives stands without compensating devices. The article presents a complex of designed and implemented technical solutions to improve the systems of automatic control of the following process parameters: tension, strip thickness and rolling speed modes. It is shown that the developed system provides resource savings by reducing material consumption and improves the quality of the strip by increasing the precision of tension and thickness control in steady-state and dynamic conditions.

Keywords: wide strip hot rolling mill, gauge, automated electric drive, energy saving, process parameters, automatic control system, improvement, experimental research, introduction.

REFERENCES

1. Egawa N., Ishizuka H., Hirita T. Hot Rolling Technology for Producing High Quality Stainless steel at № 3 Hot Strip Mill in Chiba Works. MPT International. 1998, no. 23 (30), pp. 82-87.

2. Bald W., Knepe Q., Rosenthal D., Sudau P. Innovative technologies for strip production. Steel Times Int. 2000, no. 5(24), pp. 16-19.

3. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. Tonkosljabovye litejno-prokatnye agregaty dlja proizvodstva stalnyh polos [Thin slab casting and rolling machines for steel strip production]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2003, 506 p.

4. Karandaev A.S. Avtomatizirovannyj jelektroprivod nepreryvno-reversivnogo litejno-prokatnogo agregata: Dis. ... dokt. tehn. nauk [Automated electric drive of continuous casting and reverse rolling unit: Dis. ... Doctor. Tehn. Science]. Moscow: MPEI, 2000, 382 p.

5. Knepe G., Rozentel D. Hot strip rolling technology: Tasks for the new century. MPT International. 1998, no. 3 (22), pp. 56-58, 60, 62, 64, 66, 67.

6. Radionov A.A., Usat' D.Ju., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. Opredelenie jenergosilovyh parametrov processov obrabotki metallov davleniem kosvennym metodom [Determination of pow-

er parameters of metal forming processes using the indirect method]; Nosov Magnitogorsk state technical university. Magnitogorsk, 2000. 8 p. Deposited in VINITI 20.04.2000, no. 1085-B00.

7. Batis M., Bobig P., Rotu M. *Novye tehnologii i oborudovanie dlja poluchenija sverhtonkoj gorjachekatanoj polosy* [New technologies and equipment for ultrafine hot strip]. *Stal* [Steel]. 2004, no. 3, pp. 30-33.

8. Sackij V.A., Putnoki A.Ju., Tiliq V.T. Osvoenie tehnologii proizvodstva tonkih polos i gnutyh profilej [Development of production technology of thin strips and roll-formed sections]. *Stal* [Steel]. 2003, no.10, pp. 34-42.

9. Radionov A.A., Andrjushin I.Ju., Galkin V.V., Gostev A.N. Ogranichenie minimalnyh skorostej elektroprivodov stana 2000 pri prokatke trubnoj zagotovki [Minimum speed limit of 2000 mill electric drives during tube shell rolling]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 3, pp. 20-22.

10. Andrjushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. Avtomaticheskaja korekcija skorostej elektroprivodov kletej stana 2000 pri prokatke trubnoj zagotovki [Automatic Correction of 2000 Mill Stands Speed When Rolling Tube Stock]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2011, no. 4, pp. 31-35.

11. Khramshin V.R. *Razrabotka elektrotehničeskix sistem nepreryvnoj gruppy stana gorjachej prokatki pri rasshirenii sortamenta polos: Dis. ... dokt. tehn. nauk* [Development of Electrical Systems of Continuous Hot Rolling Mill in Product Range Expansion: Dis. ... Doctor. Tehn. Science]. Magnitogorsk, MSTU. 2013. 393 p.

12. Fedorov A.A., Kornilov G.P., Karandaev A.S. Uluchshenie energetičeskix pokazatelej elektroprivoda v sisteme dvuhzonno regulirovanija chastoty vrashhenija [Improving the energy performance of the drive system in a two-zone speed control]. *Izvestija vysshix uchebnyh zavedenij SSSR. Energetika*. [Proceedings of the higher educational institutions of the USSR. Energy.] 1983, no. 9, pp. 29-33.

13. Golovin V.V., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Energoberegajushhie tiristornye elektroprivody s avtomaticheskim izmenenijem koordinaty, reguliruemoj po tsepi vzbuzhdenija [Energy-saving thyristor electric drives with automatic change of coordinates controlled by the excitation circuit]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2006, no. 4, pp. 35-39.

14. Karandaev A.S., Radionov A.A., Golovin V.V., Osipov A.V. Konceptija postroenija elektropriwodov prokatnyh stanov s dvuhzonnym regulirovanijem skorosti i uluchshennymi energeticheskimi pokazateljami [Development Concept of Electric Rolling Mills with a Two-zone Adjustable Speed and Improved Energy Performance]. *Trudy IV Mezhdunarodnoj (XV Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the IV International (XV All-Russian) Conference on automated electric drive]. Part 2. Magnitogorsk, MSTU, 2004, pp. 260-264.
15. Karandaev A.S. Energoberezhenie – prioritnoe napravlenie nauchnyh issledovanij energeticheskogo fakulteta Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Energy saving is a priority research at Energy Department of Magnitogorsk State Technical University]. *Izvestija vuzov. Elektromehaniika* [Sci. electromechanics]. 2004, no. 2, pp. 5-10.
16. Karandaev A.S., Radionov A.A., Golovin V.V. Sistema dvuhzonnogo zavisimogo regulirovanija skorosti v funkcii vyprjamlennoj JeDS tiristorogo preobrazovatelja [Two-zone system of dependent speed control function of rectified EMF thyristor converter]. *Izvestija vuzov. Elektromehaniika* [Sci. electromechanics]. 2004, no. 2, pp. 40-46.
17. Khrumshin V.R., Khrumshin R.R., Lukin A.A. Sposob regulirovanija ustavki JeDS dvigatelja prokatnogo stana v funkcii naprjazhenija seti [Method of EMF setpoint control of rolling mill motor depending on main's voltage]. *Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija*. [Urgent problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk, MSTU, 2012, part 2, no. 70, pp. 105-108.
18. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Andrjushin I.Ju. *Ustrojstvo dvuhzonnogo regulirovanija skorosti dvigatelja postojannogo toka* [Two-band device to control the speed of DC motor]. Patent 121669 RU, Opening. Inventions, 2012, no. 30.
19. Khrumshin V.R. Razrabotka i vnedrenie avtomatizirovannyh elektropriwodov i sistem regulirovanija tehničeskikh parametrov širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Development and introduction of automated electric drives and control systems of technological parameters of wide strip hot rolling mill]. *Vestnik IGJeU* [Bulletin of ISPU]. 2012, no. 6, pp. 100-104.
20. Khrumshin V.R. Povyshenie bezopasnosti rezhima invertirovanija tiristorogo elektropriroda pri prokatke polos rasshirenogo sortamenta [Safety Improvement of Inverting the Thyristor Drive during Rolling of Extended Product Range]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2013, no. 2, pp. 52-56.
21. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. Matematicheskoe modelirovanie tiristorogo elektropriroda s perekljuchajushhejsja strukturaj [Mathematical Modeling of the Thyristor Electric Drive with Switchable Structure]. *Izvestija vuzov. Elektromehaniika* [Sci. electromechanics]. 2010, no. 3, pp. 47-53.
22. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Lukin A.A., Shurigin G.V., Golovin V.V. Eksperimentalnye issledovanija tiristornyh elektropriwodov s dvuhzonnym regulirovanijem skorosti s uluchshennymi energeticheskimi karakteristikami [Experimental research of thyristor drives with two-region speed control with improved energy characteristics]. *Vestnik JuUrGU* [Journal SUSU]. 2010, no. 14, pp. 67-72.
23. Golovin V.V., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Otsenka effektivnosti primenenija tiristorogo elektropriroda s avtomaticheskimi izmenenijem koordinaty, reguliruemoj po tsepi vobuzhdenija [Effectiveness evaluation of thyristor with automatic coordinate change controlled by excitation circuit]. *Izvestija vuzov. Elektromehaniika* [Sci. electromechanics]. 2006, no. 4, pp. 40-45.
24. Khrumshin V.R. *Energoberegajushhie tiristornye elektroprirody prokatnyh stanov: monografija* [Energy-saving thyristor electric drives of rolling mills: Monograph]. Magnitogorsk, MSTU, 2013, 180 p.
25. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andrjushin I.Yu. et al. Tehnologicheskie shemy upravlenija elektroprivodami chistovoj grupy širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Manufacturing scheme of finishing train electric drive control of wide strip hot rolling mill]. *Trudy VII kongressa prokatchikov*. [Papers of the VII millmen congress]. Moscow, 2007, vol. 1, pp. 71-75.
26. Shiljaev P.V., Andrjushin I.Ju., Golovin V.V., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Kaskadnoe upravlenie skorostnymi rezhimami širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Cascade control of speed modes of wide strip hot rolling mill]. *Trudy V Mezhdunarodnoj (XVI Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the V International (XVI All-Russian) Conference on automated electric drive]. St. Petersburg, 2007, pp. 417-421.
27. Andrjushin I.Ju., Galkin V.V., Golovin V.V., Shiljaev P.V., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Khrumshin R.R. Sposob avtomaticheskogo upravlenija processom prokatki v nepreryvnoj gruppe kletej [Automatic control method of rolling in the continuous train]. Patent 2477187 RU, Opening. Inventions, 2013, no. 7.
28. Khrumshin V.R. Sistema avtomaticheskoy korekcii skorostej elektropriwodov kletej širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [System of automatic speed adjustment of stand electric drives of wide strip hot rolling mill]. *Vestnik JuUrGU* [Journal of SUSU]. 2012, vol. 18, no. 37 (296), pp. 60-67.
29. Khrumshin V.R. Sposoby kompensatsii staticheskikh otklonenij skorosti elektropriwodov kletej širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Ways of static speed deviation compensation of electric drive of wide strip hot rolling mill]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2013, no. 4, pp. 49-55.
30. Andrjushin I.Ju., Shiljaev P.V., Golovin V.V. Eksperimentalnye issledovanija sistemy avtomaticheskoy korekcii natjazhenija v mezhkletevom promezhutke širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Experimental study of automatic correction of tension in interstand interval of wide strip hot rolling mill]. *Vestnik JuUrGU* [Journal SUSU]. 2009, vol. 11, no. 15, pp. 51-59.
31. Shiljaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Algoritmy tsifrovoy sistemy avtomaticheskogo regulirovanija natjazhenija i petli širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Algorithms of Digital Automatic System for Tension and Loop Control in Wide Strip Hot Rolling Mill]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2013, no. 10, pp. 3-11.
32. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Shiljaev P.V., Andrjushin I.Ju., Golovin V.V., Ponomarev P.L. Sposob avtomaticheskogo regulirovanija natjazhenija polosy v mezhkletevom promezhutke širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Method of automatic adjustment of tension in interstand gap of wide strip hot rolling mill]. Patent 2446026 RU, Opening. Inventions, 2012, no. 9.
33. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andrjushin I.Yu., Shiljaev P.V., Golovin V.V. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvjazannyh elektromechanicheskikh sistem mezhkletevogo promezhutka širokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Mathematical modeling of related electro-mechanical systems of interstand gap of wide strip hot rolling mill]. *Izvestija vuzov. Elektromehaniika* [Sci. Electromechanics]. 2009, no. 1, pp. 12-20.
34. Khrumshin V.R. Sovershenstvovanie elektropriwodov i sistem regulirovanija tehničeskikh parametrov širokopolosnogo stana gorjachej prokatki pri rasshirenii sortamenta polos [Improvement of electric drives and control systems of technological parameters of wide strip hot rolling mill in product range expansion]. *Trudy VI Mezhdunarodnoj (XVII Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VI International (XVII All-Russian) Conference on automated electric drive]. Ivanovo: ISPU, 2012, pp. 561-565.
35. Khrumshin V.R., Andrjushin I.Yu., Shiljaev P.V.,

Petrjakov S.A., Gostev A.N. Tehnicheskie reshenija v sisteme avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny stana 2000 gorjachej prokatki [New Engineering Designs in the Automatic Control System of Hot Rolling Mill 2000 Thickness]. *Izvestija vuzov. Elektromehnika* [Sci. electromechanics], 2011, no. 4, pp. 41-45.

36. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Khramshin R.R., Andrjushin I.Ju., Petrjakov S.A. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Improving of automatic thickness control of wide strip hot rolling mill]. *Trudy VI Mezhdunarodnoj (XVII Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VI International (XVII All-Russian) Conference on automated electric drive]. Ivanovo: ISPU, 2012, pp. 556-561.

37. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Petrjakov S.A., Khramshin R.R. Ustrojstvo avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny polosy nepreryvnogo shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Automatic regulation of strip thickness of continuous wide strip hot rolling mill]. Patent 117839 RU, Opening. Inventions, 2012, no. 19.

38. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Petrjakov S.A., Galkin V.V., Khramshin R.R. Ustrojstvo dlja korrekcii tolshhiny golovnogo uchastka polosy v chistovoj kleti shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Device for thickness adjustment of strip head in finishing stand of wide strip hot rolling mill]. Patent 117329 RU, Opening. Inventions, 2012, no. 18.

39. Galkin V.V., Petrjakov S.A., Karandaev A.S.,

Khramshin V.R. Avtomaticheskaja korrekcija tolshhiny golovnogo uchastka polosy v gidravlicheskoj sisteme avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Automatic Correction of Strip Head Section Thickness in Hydraulic System of Automatic Control of Wide-Strip Hot Rolling Mill]. *Izvestija vuzov. Elektromehnika* [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 46-50.

40. Karandaev A.S., Khramshin V.R. Issledovanie sistemy avtomaticheskoi korrekcii tolshhiny polosy na shirokopolosnom stane gorjachej prokatki [Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods]. *Izvestija vuzov. Elektromehnika* [Sci. electromechanics], 2013, no. 4, pp. 39-46.

41. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Petrjakov S.A. Sledjashhaja sistema avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny polosy stana gorjachej prokatki [Servo-Mechanism of Automatic Control Strip Gage of Hot Rolling Mill]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 3, pp. 25-29.

42. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin R.R. Issledovanie sistemy avtomaticheskoi korrekcii tolshhiny polosy na shirokopolosnom stane gorjachej prokatki [Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods]. *Vestnik of JuUrGU* [Journal of SUSU]. 2013, no. 1 (13), pp. 144-153.

УДК 621.316.728

Васильев Б.Ю., Козярук А.Е.

РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ: ПРЯМОГО И ФАЗЗИ-ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены системы управления асинхронными электроприводами на основе алгоритмов прямого управления моментом и фаззи-логичеких алгоритмов. Приведены структуры систем различных алгоритмов. Проанализированы результаты их использования.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, прямое управление моментом, фаззи-логическое управление.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения высокоэффективного регулирования электромеханических координат электроприводов (ЭП) на основе асинхронных двигателей (АД) необходимо осуществлять независимое управление электромагнитным моментом и магнитным потоком машин. В современных электроприводах для этого могут использоваться следующие виды систем автоматического управления (САУ): векторное управление с ориентацией по потокоцеплению статора (field oriented control – FOC) [1-7]; прямое управление моментом (Direct Torque Control – DTC) [8-14].

Системы FOC и DTC в сочетании с высокоэффективными алгоритмами пространственно-векторной модуляции (space vector modulation – SVM) обеспечивают высокое качество и точность управления координатами АД [15-19]. Однако в последнее время получают распространение интеллектуальные алгоритмы управления ЭП: нечеткие алгоритмы (fuzzy logic); генетические алгоритмы (genetic algorithms). САУ ЭП на основе интеллектуальных алгоритмов имеют структуру, аналогичную системам прямого управления моментом. Поэтому они получили название: Fuzzy Direct Torque Control – FDTC и Genetic Direct Torque Control

– GDTC.

Преимущество интеллектуальных алгоритмов заключается в минимизации пульсаций крутящего момента и обеспечении более высокого уровня электро-механической совместимости.

СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ

Главные особенности алгоритма DTC заключаются в том, что в САУ используются релейные регуляторы, а выбор управляющего воздействия осуществляется по таблице переключений.

Основные преимущества DTC заключаются в простоте, надежности управления, а также инвариантности к внешним и параметрическим возмущениям за счет отсутствия в системе преобразователей координат, регуляторов составляющих тока статора и специальных аппаратных и программных средств для обеспечения модуляционного управления преобразователем частоты.

Структурная схема ЭП с системой DTC представлена на **рис. 1**. В САУ установлены следующие регуляторы: двухуровневый регулятор потокоцепления статора (ДРП); трехуровневый регулятор момента (ТРМ). Результирующий вектор выходного напряжения автономного инвертора и комбинация коммути-