

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЧЕРНОВЫХ КЛЕТЕЙ СОРТОВОГО СТАНА 450 СПЦ ОАО «ММК»

В.В. Шохин¹, В.Р. Храмшин², Р.Ю. Новецки¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

С использованием модели электромеханической системы черновых клетей сортового стана исследуется силовое взаимодействие электроприводов через прокатываемую полосу при изменении различных технологических условий прокатки. Анализируется работа участка черновых клетей при работе стана без регулирования межклетевых натяжений и с использованием двух различных систем косвенного регулирования натяжения, в которых о величине натяжения прокатываемого металла судят по величине момента прокатного двигателя. Проведена оценка точности регулирования натяжения для исследуемых систем.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, сортовой стан, моделирование, силовое взаимодействие клетей прокатного стана, момент прокатки, регулирование натяжения.

Введение

Одним из основных требований технологического режима прокатки на непрерывных станах горячей прокатки является поддержание натяжения прокатываемой полосы в межклетевых промежутках на заданном уровне [1, 2]. Известно, что для непрерывных сортовых прокатных станов в силу ряда причин не всегда имеется возможность использовать системы прямого регулирования натяжения [3, 4]. В этом случае используют системы косвенного регулирования натяжения, в которых учитывается связь между моментом двигателя клетки и величиной межклетьевого натяжения [5, 6]. В некоторых случаях при этом оказывается возможным регулировать и размеры проката [7–10].

При рассмотрении межклетьевого промежутка двухклетьевого непрерывного прокатного стана [11] для двигателя первой клетки действительно соотношение

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{св}} - M_1,$$

где $M_{\text{дв}}$ – момент двигателя первой клетки межклетьевого промежутка; $M_{\text{св}}$ – момент свободной прокатки (без натяжения); M_1 – составляющая момента прокатного двигателя первой клетки от действия переднего натяжения.

Если стабилизировать момент двигателя первой клетки, то при условии постоянства момента свободной прокатки можно обеспечить постоянство величины межклетьевого натяжения.

Для многоклетьевого прокатного стана для всех клетей, кроме первой и последней, в предыдущей формуле появляется составляющая момента двигателя M_0 для первой клетки межклетевых промежутков, зависящая от заднего натяжения для этой клетки

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{св}} + M_0 - M_1.$$

Если учесть, что для первой клетки многоклетьевого прокатного стана построена система регулирования натяжения со стабилизацией момента прокатного двигателя, то такая система может быть использована и для многоклетьевого прокатного стана, учитывая постоянство заднего натяжения для первой клетки этого стана (или его отсутствие).

Один из вариантов такой системы используется в электроприводах черновых клетях сортового стана 450 СПЦ ОАО «ММК», при этом воздействие на регулируемые клетки осуществляется в каскадном режиме. При регулировании натяжения между двумя смежными клетями изменяется скорость первой прокатной клетки межклетьевого промежутка с целью достижения необходимого уровня натяжения. Регулирование ведется по величине крутящего момента двигателя первой клетки. Для этого сравнивается величина крутящего момента до того, как прокат поступил на следующую за ней клеть, и после того, как прокат вошел в следующую клеть.

После того, как прокат вошел в первую клеть, определяется усредненное за некоторый период времени значение момента двигателя и оно заносится в память. Его значение сравнивается со значениями крутящего момента, который определяется после того, как прокат зашел во вторую прокатную клеть.

Если разница между двумя крутящими моментами превышает значение уставки натяжения (заданную разность моментов), то регулятор рассчитывает необходимую корректировку скорости первой клетки межклетьевого промежутка. Коррекция проводится до тех пор, пока не будет достигнута необходимая величина натяжения и разница моментов не достигнет заданного значения.

Фактически в такой системе стремятся стабилизировать момент прокатного двигателя.

Откорректированные опорные сигналы скорости сохраняются и используются для поступающей следующей заготовки с тем, чтобы поддерживать достигнутый уровень натяжения.

Другим вариантом системы регулирования межклетевых натяжений является стабилизация момента прокатного двигателя путем воздействия на скорость последующей клетки межклетьевого промежутка.

В таких системах точность регулирования натяжения зависит от точности определения момента свободной прокатки, который зависит от технологических условий прокатки, изменяющихся при переходе от одного сортамента к другому, в пределах прокатки одной партии и при прокатке одной заготовки. Это изменение технологических условий приводит к отклонению реальной величины момента прокатного двигателя от усредненного запомненного момента и воспринимается системой регулирования как отклонение натяжения от заданной величины. Это, в свою очередь, приводит к отклонениям действительных межклетевых натяжений от заданного уровня.

Изменение величины межклетевых натяжений приводит к изменению размеров проката и некачественному выполнению прокатываемого профиля, а его исчезновение, также как и его чрезмерная величина, нарушают технологический процесс прокатки. Поэтому поддержание заданного натяжения заготовки в межклетьевого промежутке при возможных возмущениях в переходных и установившихся режимах прокатки является важной задачей систем управления электроприводами и автоматизации прокатных станов.

Целью исследований является изучение работы черновых клетей сортового стана с учетом взаимосвязей электромеханических систем клетей, оценка изменений величин межклетевых натяжений в зависимости от условий прокатки, оценка эффективности применяемой системы косвенного регулирования натяжения.

Сложность проведения активных исследований на действующем стане и практическая невозможность разработки действующей физической модели черновой группы клетей в лабораторных условиях предопределили необходимость создания математической модели взаимосвязанных электромеханических систем прокатного стана, реализованной в программной среде MATLAB в приложении Simulink.

Методика и результаты исследования

Натяжение прокатываемой заготовки является функцией разности скоростей выхода металла из предыдущей клетки межклетьевого промежутка и входа металла в следующую клетку. Скорость входа и выхода металла из клетки определяется не только окружной скоростью валков, но и зонами опере-

жения и отставания металла в очагах деформации. Опережение и отставание, в свою очередь, являются функциями натяжения заготовки и величины обжатия. Для моделирования заготовки в межклетьевого промежутке использовалось выражение для натяжения в интегральной форме, предложенное Д.П. Морозовым [12, 13]:

$$T_{i,i+1} = \frac{EQ_i}{l_{i,i+1}} \int_0^t (v_{i+1} - v_i) dt + T_{(i,i+1)0},$$

где E – модуль упругости прокатываемого материала; Q_i – поперечное сечение заготовки между клетями i и $i+1$; $l_{i,i+1}$ – длина межклетьевого промежутка; v_i, v_{i+1} – скорости выхода металла из валков клетки с порядковым номером i и входа металла в клетку с порядковым номером $i+1$.

При вычислении скоростей учитывались величины опережения и отставания скорости металла от скорости валков в очагах деформации.

Моделирование проводилось в программной среде MATLAB [14]. На рис. 1 представлена математическая модель полосы в межклетьевого промежутке. Входными переменными этой модели являются линейные скорости валков смежных клетей, а выходная переменная – величина натяжения в межклетьевого промежутке.

Модели межклетевых промежутков и электроприводов каждой клетки представляются в виде подсистем с входными и выходными параметрами [15–18]. Это дает возможность моделировать многоклетевую прокатный стан с взаимосвязанными электроприводами клетей через прокатываемую заготовку [19–25]. На рис. 2 приведена схема моделирования черновой группы клетей непрерывного сортового прокатного стана. В подсистемах электроприводов клетей модели асинхронных двигателей представляются во вращающейся системе координат с ее ориентацией по вектору потокосцепления ротора, при этом считаются скомпенсированными перекрестные обратные связи по ЭДС в структурной схеме двигателя [26–29]. Регулирование скорости представлено системой подчиненного регулирования координат [30].

Проводится исследование влияния изменений технологических условий прокатки на точность регулирования межклетевых натяжений и на распределение нагрузок прокатных двигателей. Изменение технологических условий прокатки связано с изменениями моментов двигателей клетей. Так, на моменты при прокатке оказывают влияние размеры исходного проката, коэффициент трения в очаге деформации, предел текучести прокатываемой заготовки, температура прокатываемого металла. С учетом этого при моделировании задавалось изменение моментов двигателей при свободной прокатке на 10 % от заданного момента двигателя.

Рассматривались процессы прокатки без применения систем регулирования натяжения и с применением косвенных систем регулирования натя-

Электромеханические системы

жения путем стабилизации момента прокатного двигателя. При использовании систем регулирования натяжения в схему модели добавлялись регуляторы, вырабатывающие корректирующие воздействия для стабилизации моментов двигателей. Стабилизация моментов двигателей клеток осуществлялась в первом случае путем воздействия на регулятор скорости клетки, в которой производилось измерение и запоминание момента прокатного двигателя после захвата металла валками клетки

(первая система), а во втором случае – путем воздействия на регулятор скорости последующей клетки межклетьевого промежутка (вторая система). Результаты моделирования приведены в табл. 1, 2.

Без применения систем регулирования натяжения наибольшие изменения моментов двигателей происходят в этом случае для двигателей тех клеток, где меняются условия прокатки, при этом моменты двигателей остальных клеток также меняются из-за силовой связи прокатных клеток,

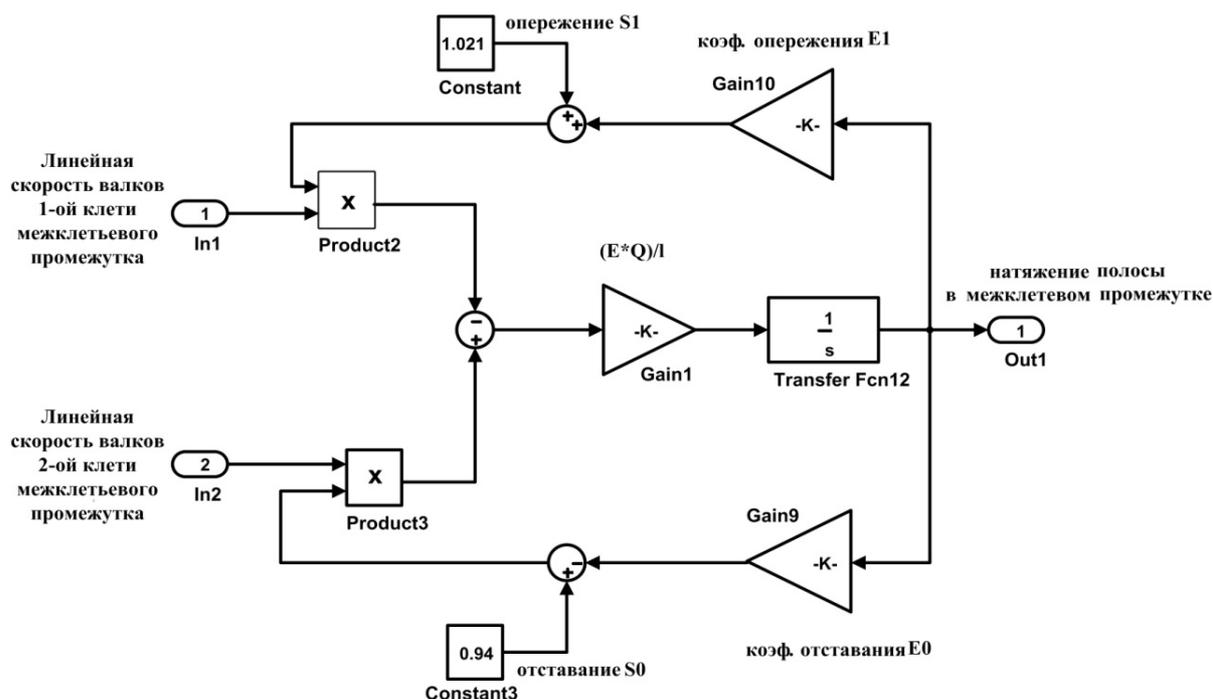


Рис. 1. Математическая модель полосы в межклетьевом промежутке



Рис. 2. Модель электроприводов черновых клеток сортового стана

Таблица 1

Изменение моментов двигателей при изменении момента прокатки

Условия	Изменение $M_{пр}$ в клетях на 10 %	Изменение моментов двигателей при изменении момента прокатки в клетях, Нм							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Система без стабилизации момента	в 1-й	194,7	63,4	46,2	10,5	7,9	4,7	4,6	12,3
	в 4-й	2,1	5,7	31,8	171,1	26,2	19,7	10,2	6,7
	в 8-й	3,2	6,3	8,0	8,8	12,3	54,1	124,1	201,7
	во всех клетях	196,4	193,7	182,1	174,4	172,4	167,1	164,7	158,8
Система со стабилизацией момента (первая система)	в 1-й	0	221,0	1,0	0	0	0	0	0
	в 4-й	0	1,8	90,0	0	89,0	1,5	0	0
	в 8-й	0	0	0	0	0	2,0	157,0	0
	во всех клетях	0	0	0	0	0	0	0	0
Система со стабилизацией момента (вторая система)	в 1-й	0	253,8	105,2	43,1	10,1	6,4	4,7	3,6
	в 4-й	0	0	0	0	143,4	88,4	67,7	34,0
	в 8-й	0	0	0	0	0	0	0	358,6
	во всех клетях	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

Изменение межклетевых натяжений при изменении момента прокатки

Условия	Изменение $M_{пр}$ в клетях на 10 %	Изменение натяжений между клетями, Н						
		1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8
Система без стабилизации момента	в 1-й	46,25	13,1	2,3	1,4	0,8	0	0
	в 4-й	5,1	7,8	-15,7	26,4	4,2	1,1	0
	в 8-й	0	0	0	2,1	5,4	14,7	21,3
	во всех клетях	24,2	12,5	3,8	12,4	2,1	0,8	3,2
Система со стабилизацией момента (первая система)	в 1-й	342,05	5,4	2,4	0,8	0	0	0
	в 4-й	-0,02	-2,2	-146,9	227	2,0	0	0
	в 8-й	0	0	0	0	0,6	3,6	243,1
	во всех клетях	171,1	106,5	1	123,5	114,0	118,4	151,5
Система со стабилизацией момента (вторая система)	в 1-й	62,8	-112,4	43,4	24,6	25,1	32,6	40,0
	в 4-й	6,2	8,1	10,3	40,6	-26,6	23,4	14,5
	в 8-й	0	-1,8	-1	-0,8	-3,2	-12,7	-118
	во всех клетях	43,8	41,0	52,4	58,7	56,7	48,1	53,2

т. е. из-за изменений межклетевых натяжений (табл. 1). При увеличении момента прокатки клетки №1 возрастает натяжение полосы в межклетевом промежутке 1–2. Вместе с ним увеличиваются значения натяжений в последующих межклетевых промежутках по ходу прокатки. Величина изменений натяжения по ходу прокатки уменьшается за счет демпфирующего действия клетей и в промежутках 6–7 и 7–8 становится равной нулю.

При увеличении момента прокатки клетки № 4 межклетевое натяжение в промежутке 4–5 также возрастает. Однако в предыдущем межклетевом промежутке 3–4 натяжение уменьшается, т. е. изменение моментов двигателей в черновой группе клетей происходит разнонаправлено.

При увеличении момента прокатки клетки № 8 возрастает натяжение полосы в межклетевом промежутке 7–8 и в предыдущих промежутках против хода прокатки.

Изменение моментов и натяжений распространяется и по ходу прокатки, и против хода про-

катки, но степень этих изменений снижается по мере удаления от клетки, в которой варьируется момент двигателя.

В случае увеличения моментов прокатки во всех клетях при отсутствии системы регулирования натяжения происходит неравномерное увеличение натяжений во всех межклетевых промежутках.

Изучение работы косвенных систем регулирования натяжения путем стабилизации момента прокатного двигателя позволило сделать следующие выводы.

Для первой системы, когда для восстановления натяжения используется воздействие на скорость первой клетки межклетевом промежутка, т. е. той клетки, в которой производится измерение момента двигателя, момент сохраняется неизменным, несмотря на изменение технологических условий прокатки в рассматриваемой клетях. Из табл. 1 видно, что при изменении момента свободной прокатки в клетях первой, четвертой и восьмой

суммарный момент двигателя восстанавливается (изменения равны нулю), при этом в соседних клетях происходят изменения моментов двигателей за счет изменений натяжений в межклетевых промежутках. Возмущения распространяются и по ходу, и против хода прокатки. Если изменяются технологические условия прокатки во всех клетях, то моменты прокатных двигателей сохраняются неизменными, но при этом изменяются межклетевые натяжения. Степень этих изменений зависит от реальных условий прокатки и может превысить допустимые значения.

Если использовать систему косвенного регулирования натяжения при стабилизации момента двигателя за счет переднего натяжения, т. е. для восстановления момента двигателя воздействовать на последующие клетки межклетьевого промежутка, то в этом случае результаты таковы: если стабилизируется момент клетей № 1, 4, 8, то изменения условий прокатки вызывают изменения нагрузок двигателей последующих клетей, т. е. возмущающие воздействия для стана распространяются по ходу прокатки (табл. 2), но при этом изменения условий прокатки в одной клетке вызывают изменения натяжений практически во всех межклетевых промежутках. Следует отметить, что для второй системы, по сравнению с первой, одинаковые изменения технологических условий в клетях черновой группы прокатного стана вызывают существенно меньшие изменения межклетевых натяжений.

В рассматриваемых случаях стабилизация момента осуществлялась дополнительным регулятором момента (натяжения). В модели применен пропорциональный регулятор момента (натяжения), коэффициент передачи которого подбирался экспериментально и первоначально определяется отношением напряжения задания скорости U_{zc} к суммарному моменту прокатки $M_{пр}$.

Для сравнения $M_{пр}$ при нормальных технологических условиях и при имитации их отклонений использованы блоки создания общей области памяти Data Store Memory пакета Simulink. С помощью блока Data Store Write происходила запись значения суммарного момента прокатки при нормальных условиях, затем оно сравнивалось с текущим суммарным моментом прокатки.

Таким образом, в случае регулирования межклетевых натяжений использование системы стабилизации момента двигателя за счет переднего натяжения для всех клетей позволяет более точно производить регулирование межклетевых натяжений с учетом изменения технологических условий прокатки.

Заключение

1. Создана модель электромеханической системы черновых клетей сортового стана 450 с использованием программной среды MATLAB и приложения SIMULINK.

2. Определены количественные зависимости параметров силовой связи электроприводов клетей в процессе прокатки и степень влияния этих параметров на нагрузки двигателей.

3. Исследованы процессы прокатки без применения систем регулирования натяжения и с применением косвенных систем регулирования натяжения путем стабилизации момента прокатного двигателя.

4. Использование системы стабилизации момента двигателя за счет переднего натяжения для всех клетей позволяет более точно производить регулирование межклетевых натяжений с учетом изменения технологических условий прокатки.

5. Полученные расчетные значения изменений межклетевых натяжений при изменении технологических условий прокатки могут быть использованы для установления уровней межклетевых натяжений, при которых будет происходить нормальный технологический процесс без потери натяжения и без недопустимого его увеличения.

Литература

1. Khrumshin, V.R. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill / V.R. Khrumshin, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev // *Metalurgist*. – 2015. – Vol. 59, no. 3–4. – P. 315–323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8

2. Карандаев, А.С. Система взаимосвязанного регулирования натяжения и толщины широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин, П.В. Шляев, В.В. Головин // *Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2007)*, 2007. – С. 410–413.

3. Радионон, А.А. Автоматизированный электропривод станов для производства стальной проволоки / А.А. Радионон. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – 311 с.

4. Пат. 1519806 Российская Федерация. Устройство регулирования натяжения полосы в межклетевых промежутках непрерывного прокатного стана / В.В. Шохин, А.С. Карандаев, А.В. Косенков и др. – Опубл. 07.12.1987.

5. Мецзяков, В.Н. Регулирование натяжения полосы в чистовой группе непрерывного широкополосного стана горячей прокатки по косвенному принципу / В.Н. Мецзяков, Е.Е. Диденко // *Электротехн. системы и комплексы*. – 2014. – № 1 (22). – С. 40–43.

6. Мецзяков, В.Н. Влияние температуры подката чистовой группы стана горячей прокатки на работу электропривода петледержателя / В.Н. Мецзяков, Е.Е. Диденко // *Электротехн. системы и комплексы*. – 2012. – № 20. – С. 41–52.

7. Пат. 555928 Российская Федерация. Способ регулирования размеров проката на непрерывном сорто-проволочном стане / М.Г. Поляков,

И.А. Селиванов, В.В. Шохин, Б.А. Никифоров,
Ю.А. Крылов. – Оpubл. 02.06.1975.

8. Пат. 555929 Российская Федерация. Уст-
ройство регулирования размеров готового проката
на непрерывном сорто-проволочном стане /
М.Г. Поляков, И.А. Селиванов, В.В. Шохин, Б.А. Ни-
кифоров, С.З. Мавлютов. – Оpubл. 03.06.1975.

9. Пат. 942839 Российская Федерация. Уст-
ройство регулирования размеров проката на не-
прерывном проволочном стане холодной прокатки /
В.П. Бычков, И.А. Селиванов, В.В. Шохин и др. –
Оpubл. 30.12.1980.

10. Пат. 839638 Российская Федерация. Уст-
ройство регулирования размеров проката / И.А. Се-
ливанов, В.В. Шохин, Ю.И. Кузнецов, Б.А. Ники-
форов, А.П. Ткаченко. – Оpubл. 25.10.1977.

11. Мецераков, В.Н. Математическое опи-
сание механической системы двух смежных кле-
тей чистовой группы непрерывного стана горячей
прокатки / В.Н. Мецераков, Е.Е. Диденко // Электр-
ротехн. комплексы и системы управления. –
2010. – № 3. – С. 8–13.

12. Морозов, Д.П. К теории электромехани-
ческих процессов станов холодной прокатки /
Д.П. Морозов // Вестник электропромышленно-
сти. – 1944. – №3. – С. 16–19.

13. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как
объект автоматизации / Н.Н. Дружинин. – М.:
Металлургия, 1975. – 336 с.

14. Черных, И.В. Моделирование электро-
технических устройств в MATLAB, SimPower-
System и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс;
СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

15. Шохин, В.В. Моделирование взаимосвя-
занного частотно-регулируемого электропривода
прокатного стана / В.В. Шохин, О.В. Пермякова,
Е.В. Короткова // Электротехн. системы и комп-
лексы. – 2013. – С. 70–75.

16. Shokhin, V.V. The study of continuous
rolling mill inter-stand tension inferential control sys-
tems / V.V. Shokhin, O.V. Permyakova // Procedia
Engineering. – 2015. – Vol. 129. – С. 231–238. DOI:
10.1016/j.proeng.2015.12.038

17. Пермякова, О.В. Влияние системы ста-
билизации момента прокатного двигателя на от-
клонения размеров профиля / О.В. Пермякова,
А.А. Радионов, В.В. Шохин // Изв. Тульского гос.
ун-та. Техн. науки. – 2010. – Вып. 3, ч. 3. –
С. 119–121.

18. Шрейнер, Р.Т. Математическое модели-
рование электроприводов переменного тока с по-
лупроводниковыми преобразователями частоты /
Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. –
654 с.

19. Карандаев, А.С. Совершенствование ал-
горитма согласования скоростей электроприво-
дов клетей черновой группы стана горячей про-
катки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Гал-
кин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия

«Энергетика». – 2011. – Вып. 16, № 34 (251). –
С. 35–41.

20. Снижение динамических нагрузок меха-
нического и электрического оборудования черно-
вой подгруппы клетей стана горячей прокатки /
В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев и др. //
Машиностроение: сетевой электрон. науч. журн-
нал. – 2013. – № 2. – С. 69–77.

21. Speed and Load Modes of Rolling Hollow
Billet at the Wide-Strip Rolling Mill / A.A. Radionov,
A.S. Karandaev, V.R. Khramshin et al. // Proceedings
of 2014 International Conference on Mechanical En-
gineering, Automation and Control Systems (MEACS),
2014. – P. 5. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986841

22. Согласование скоростей взаимосвязан-
ных электроприводов клетей черновой группы про-
катного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин,
А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин // Труды VII Межд-
дунар. (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по
автоматизир. электроприводе (АЭП-2012). – Ива-
ново, 2012. – С. 652–657.

23. Андрияшин, И.Ю. Разработка матема-
тической модели взаимосвязанных электромехани-
ческих систем черновой группы прокатного стана /
И.Ю. Андрияшин, А.Г. Шубин, А.Н. Гостев // Электр-
ротехн. системы и комплексы. – 2014. – № 3 (24). –
С. 24–31.

24. Храмшин, В.Р. Способы компенсации
статических отклонений скорости электропри-
водов клетей широкополосного стана горячей
прокатки / В.Р. Храмшин // Электротехника. –
2013. – № 4. – С. 49–55.

25. Математическая модель взаимосвязан-
ных электротехнических систем непрерывной
группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин,
И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев //
Машиностроение: сетевой электрон. науч. журн-
нал. – 2013. – № 1. – С. 12–21.

26. Теоретические основы построения час-
тотных электроприводов с векторным управле-
нием / В.А. Дартау, В.В. Рудаков, А.Е. Козярук и
др. // Автоматизир. электропривод. – М.: Энергия,
1980. – С. 93–101.

27. Соколовский, Г.Г. Электроприводы пере-
менного тока с частотным регулированием: учеб.
для высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. –
2-е изд., испр. – М.: Издат. центр «Академия»,
2007. – 272 с.

28. Соколовский, Г.Г. Моделирование элек-
тропривода с асинхронным двигателем при пи-
тании от преобразователя частоты с актив-
ным выпрямителем / Г.Г. Соколовский. – М.,
2007. – 76 с.

29. Виноградов, А.Б. Векторное управление
электроприводами переменного тока / А.Б. Вино-
градов. – Иваново, 2008. – 298 с.

30. Терехов, В.М. Системы управления элек-
троприводов: учеб. для вузов / В.М. Терехов, О.И. Оси-
пов. – М.: Издат. центр «Академия», 2006. – 304 с.

Шохин Валерий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; shww@mgn.ru.

Храмшин Вадим Рифхатович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; hvrmgn@gmail.com.

Новецки Роман Юзефович, магистрант кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск.

Поступила в редакцию 14 марта 2017 г.

DOI: 10.14529/power170208

MATHEMATICAL SIMULATION OF ROUGHING ELECTRIC DRIVES OF 450 BAR AND SHAPE MILL MOUNTED AT ARCH-FURNACE PLANT OF MAGNITOGORSK IRON AND STEEL WORKS, OJSC

V. V. Shokhin¹, shww@mgn.ru,
V.R. Khrumshin², hvrmgn@gmail.com,
R.Yu. Nowicki¹

¹ *Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,*

² *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

Mathematical simulation for the electromechanical system of the bar and shape mill roughing stands forms the basis for the investigation of force interaction between electric drives through a rolled strip under varying rolling process conditions. The paper focuses on operation of roughing stands without control of the inter-stand tensions and with two different systems of indirect tension control, where the rolling motor torque value specifies tension of rolled metal. Tension control accuracy for systems under study is estimated.

Keywords: automated electric drive, bar and shape mill, simulation, force interaction between mill stands, rolling torque, tension control.

References

1. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. [Reduction of Dynamic Loads in Rolling Mill Universal Stands]. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, no. 3–4, pp. 315–323. DOI 10.1007/s11015-015-0103-8
2. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Shiljaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V. [System of Mutual Control for Tension and Thickness of Broadband Hot Rolling Mill]. *Trudy V mezhdunarodnoj (XVI vserossijskoj) nauchno-tehnicheskoy konferencii po avtomatizirovannomu jelektroprivodu* [Proceedings of the V International (XVI All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric]. St. Petersburg, 2007, pp. 410–413. (in Russ.)
3. Radionov A.A. *Avtomatizirovannyj elektroprivod stanov dlya proizvodstva stal'noj provoloki* [Automated Electric Drive for Mills Producing Steel Wire]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2007. 311 p.
4. Shokhin V.V., Karandaev A.S., Kosenkov A.V. *Ustrojstvo regulirovanija natjazhenija polosy v mezhkletevyh promezhutkah nepreryvnogo prokatnogo stana* [Device Adjusting Strip Tension in Interstitial Spaces of Continuous Rolling Mill]. Patent RF, no. 1519806, 1987.
5. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. [Adjustment of Strip Tension in Finishing Train of Continuous Hot-Rolling Mill on Indirect Principle]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2014, no. 1 (22), pp. 40–43. (in Russ.)
6. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. [Influence of Finishing Roll Temperature of Hot Rolling Mill on Looper Electric Drive Operation]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2012, no. 20, pp. 41–52. (in Russ.)
7. Poljakov M.G., Selivanov I.A., Shokhin V.V., Nikiforov B.A., Krylov Ju.A. *Sposob regulirovanija razmerov prokata na nepreryvnom sorto-provolochnom stane* [Method for Adjustment of Rolled Products Dimensions at Continuous Wire Mill]. Patent RF, no. 555928, 1975.

8. Poljakov M.G., Selivanov I.A., Shokhin V.V., Nikiforov B.A., Mavljutov S.Z. *Ustrojstvo regulirovanija razmerov gotovogo prokata na nepreryvnom sorto-provolochnom stane* [Device Adjusting Finished Rolled Products Dimensions at Continuous Wire Mill]. Patent RF, no. 555929, 1975.
9. Bychkov V.P., Selivanov I.A., Shokhin V.V. *Ustrojstvo regulirovanija razmerov prokata ne nepreryvnom provolochnom stane holodnoj prokatki* [Device Adjusting Rolled Products Dimensions at Non-continuous Cold Rolling Mill]. Patent RF, no. 942839, 1980.
10. Selivanov I.A., Shokhin V.V., Kuznecov Ju.I., Nikiforov B.A., Tkachenko A.P. *Ustrojstvo regulirovanija razmerov prokata* [Device Adjusting Rolled Metal Dimensions]. Patent RF, no. 839638, 1977.
11. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. [Mathematical Description of Mechanical System of Two Adjacent Stands of Continuous Hot Rolling Mill Finishing Group]. *Electro-technical Complexes and Control Systems*, 2010, no. 3, pp. 8–13. (in Russ.)
12. Morozov D.P. [On Theory of Electric and Mechanical Process of Cold-Rolling Mills]. *Bulletin of Electrotechnical Industry*, 1944, no. 3, pp. 16–19. (in Russ.)
13. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak ob"ekt avtomatizatsii* [Continuous Stands as Automation Object]. Moscow, Metallurgy Publ., 1975. 336 p.
14. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Electric Devices Modeling in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p.
15. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Korotkova E.V. [Rolling Mill Interrelated Variable Frequency Electric Drive Modeling]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2013, pp. 70–75. (in Russ.)
16. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The Study of Continuous Rolling Mill Inter-stand Tension Inferential Control Systems. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 231–238. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.038
17. Permyakova O.V., Radionov A.A., Shokhin V.V. [Influence of Car Rental Engine Stabilization System on of the Profile Dimensions Tolerances]. *Proceedings of TulGU. Technical sciences*, 2010, iss. 3, part 3, pp. 119–121. (in Russ.)
18. Schreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical Modeling of AC Electric Drives with Semiconductor Frequency Converters]. Ekaterinburg, Ural Department of Russian Academy of Sciences, 2000. 654 p.
19. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Gostev A.N. [Speed Adjustment Algorithm Improvement for Stand Electric Drives of Hot Rolling Mill Roughing Train]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2011, vol. 16, no. 34 (251), pp. 35–41. (in Russ.)
20. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. [Dynamic Loads Reduction of Hot Rolling Mill Roughing Train Mechanical and Electrical Equipment]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 69–77. (in Russ.)
21. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Speed and Load Modes of Rolling Hollow Billet at the Wide-Strip Rolling Mill. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, 2014, p. 5. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986841
22. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. [Coordination of Interconnected Electric Drives Speeds at Draft Group Rolling Mill Cages]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VII International (XVIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric]. Ivanovo, ISPU, 2012, pp. 652–657. (in Russ.)
23. Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. [Development of Mathematical Model for Interrelated Electromechanical Systems of Rolling Mill Roughing Train]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2014, no. 3 (24), pp. 24–31. (in Russ.)
24. Khramshin V.R. [Ways of Compensation Static Deviations Speed the Electric Drive of the Broad-Strip Hot Rolling Mill]. *Jelektrotehnika*, 2013, no. 4, pp. 49–55. (in Russ.)
25. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. [Mathematical Model for Interrelated Electrical Systems of Wide Strip Rolling Mill Continuous Train]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 1, pp. 12–21. (in Russ.)
26. Dartau V.A., Rudakov V.V., Kozyaruk A.E. [Fundamentals of Construction of Variable Frequency Electric Drives with Vector Speed Control]. *Automated Electric Drive*. Moscow, Energy Publ., 1980, pp. 93–101. (in Russ.)
27. Sokolovski G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC Frequency Control Electric Drives]. Moscow, Academia Publ., 2007. 272 p.

28. Sokolovsky G.G. *Modelirovanie elektroprivoda s asinkhronnym dvigatelem pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypryamitelem* [Modeling of Electric Drive with Asynchronous Motor Powered from Frequency Converter with Active Rectifier]. Moscow, 2007. 76 p.
29. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector Speed Control of AC Electric Drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University Publ., 2008. 298 p.
30. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control System of Electric Drives]. Moscow, Academia Publ., 2006. 304 p.

Received 14 March 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шохин, В.В. Исследование на математической модели электроприводов черновых клетей сортового стана 450 СПЦ ОАО «ММК» / В.В. Шохин, В.Р. Храмшин, Р.Ю. Новецки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 58–66. DOI: 10.14529/power170208

FOR CITATION

Shokhin V.V., Khramshin V.R., Nowicki R.Yu. Mathematical Simulation of Roughing Electric Drives of 450 Bar and Shape Mill Mounted at Arch-Furnace Plant of Magnitogorsk Iron and Steel Works, OJSC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 58–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170208
