

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Е.С.Назарова, канд.техн.наук
Запорожский национальный технический университет,
ул. Жуковского, 64, Запорожье, 69063, Украина.
E-mail: nazarova@zntu.edu.ua

Статья посвящена математическому моделированию электромеханических систем станков холодной прокатки при модернизации существующих и проектировании новых систем автоматического управления электроприводами указанных станков. Используя разработанный комплекс компьютерных моделей элементов прокатного производства, усовершенствована система автоматического управления натяжением полосы стана холодной прокатки на примере синтезированной системы оптимального управления взаимосвязанными электроприводами моталки и клетки дрессировочного одноклетевого стана 1700-1 цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запорожсталь», что позволяет повысить качество управления и обеспечить энергосберегающий эффект за счет ее нечувствительности к ряду дестабилизирующих факторов, отсутствия перерегулирования, компенсации влияния упругостей длинного вала и прокатываемой полосы на динамические характеристики электропривода. Библи. 11, рис. 5.

Ключевые слова: математическое моделирование, энергосбережение, стан холодной прокатки, электромеханическая система.

Введение. Одним из основных показателей уровня развития экономики государства является энергоёмкость валового внутреннего продукта (ВВП). Энергоёмкость ВВП в Украине достаточно высока и составляет (по данным Международного энергетического агентства и органов государственной статистики) 0,5 килограмма нефтяного эквивалента на 1 доллар США. При этом ее величина в Дании и Японии – 0,11, в Великобритании – 0,14, Германии и Франции – 0,18, США – 0,21, России – 0,47. Проблема высокой энергоёмкости ВВП носит общегосударственный характер, так как влияет на уровень себестоимости продукции и ее конкурентоспособность [8].

Среди большого количества причин возникновения проблемы выделяют следующие: чрезмерная изношенность основных фондов, низкие темпы их обновления; недостаточный уровень внедрения новых технологий, направленных на повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, альтернативных источников энергии.

Эту проблему можно решить путем внедрения современных энергоэффективных технологий, машин и оборудования, что требует значительных инвестиций. В условиях ограниченных инвестиционных ресурсов модернизацию следует проводить в отраслях, обеспечивающих насущные потребности общества, а также в отраслях, выпускающих конкурентоспособную продукцию для внешнего рынка, в первую очередь, в металлургии [9]. Большая часть технологических мероприятий, связанных с улучшением использования энергоресурсов, должна ориентироваться на повышение уровня эксплуатации существующего оборудования [2], модернизацию технологических процессов за счет малокапитальных мероприятий, направленных на оптимизацию режимов работы и энергосбережение.

По разным оценкам структура потребления энергоресурсов наиболее энергоёмкими производствами металлургии выглядит следующим образом: около 40% приходится на доменное производство, около 20% на прокатное производство, менее 10% на коксохимическое и производство агломерата, примерно 5% – электросталеплавильное производство [3]. Таким образом, производство проката занимает второе место по потреблению энергоресурсов металлургических предприятий. Поэтому актуальными являются задачи модернизации энергоёмкого прокатного производства, исследование процессов энергопреобразования и разработка эффективных систем управления его агрегатами.

Как известно, главные приводы прокатных станков являются одними из основных потребителей энергии прокатных цехов: мощность отдельных двигателей приводов колеблется от 200 до 9000 кВт, напряжение питания главных приводов 6–10 кВ, режим их работы характеризуется резкими толчками нагрузки, имеющими длительность несколько секунд и величину до 2–2,5 номинальной мощности двигателей постоянного тока и до 4–4,5 двигателей переменного тока. Поэтому проведе-

ние предварительных экспериментов при модернизации приводов и их систем автоматического управления (САУ) целесообразно проводить, используя комплекс компьютерных моделей элементов прокатного оборудования, что окажет значительный энергосберегающий эффект по сравнению с экспериментом на реальном производственном оборудовании.

Цель работы. Показать возможности математического моделирования электромеханических систем станов холодной прокатки при модернизации существующих и проектировании новых систем автоматического управления электроприводами указанных станов.

Материал и результаты исследований. В мире накоплен положительный опыт по созданию математических моделей процесса холодной прокатки или отдельных его координат, однако многие из этих моделей имеют ограниченную область применения, недостаточно полно освещены вопросы моделирования названных систем с учетом переменных параметров многомассовых одновременно взаимосвязанных через обрабатываемый металл и «длинный вал» электромеханических систем (ЭМС) станов холодной прокатки (СХП) [4]. Вызывает трудности изменение структуры исследуемых ЭМС как в электрической, так и в механической частях, что не позволяет создать различные по конструкции модели агрегатов прокатного производства для проведения предварительных экспериментов на стадии модернизации существующих и проектировании новых систем управления [5].

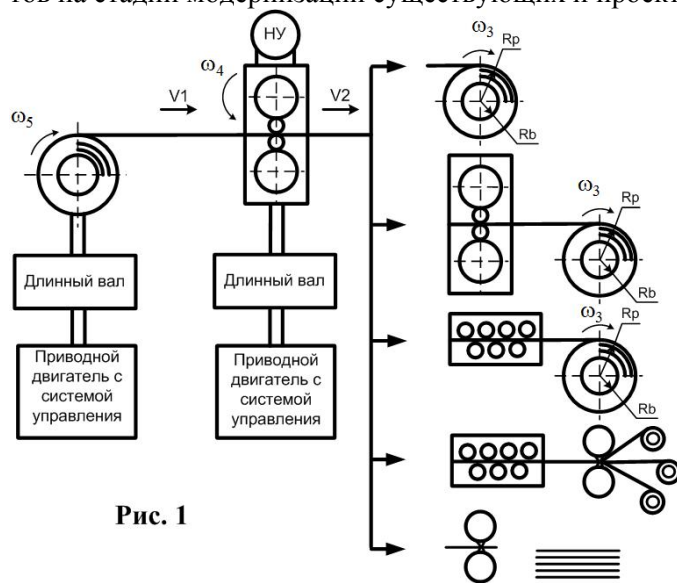


Рис. 1

Достаточно удобно рассматривать ЭМС в виде набора структурных схем, особенно, когда необходимо синтезировать структуру и параметры систем управления. Условно можно выделить агрегаты СХП, которые универсальны для большинства станов: наматывающее и разматывающее устройства, одна или более прокатных клеток, правильная машина, режущие прокатанный металл ножницы. Кроме того, все названные агрегаты связаны между собой: разматывающее устройство подает прокатываемую полосу в валки прокатной клетки, из клетки полоса поступает или в последующие клетки, если стан многоклетевой, или в правильную машину, из которой выходит полоса, которая подается или на наматывающее устройство, или на ножницы поперечной или продольной резки для последующего форми-

рования листов необходимого формата. Каждый из этих агрегатов приводится в движение электрическим двигателем, который упруго связан с исполнительным механизмом через длинный вал. Следовательно, в указанный выше набор основных элементов СХП необходимо добавить такие структурные единицы как «длинный вал» и «прокатываемая полоса», которые представляют собой упругие связи первого и второго родов. Обобщенная структурная схема СХП показана на рис. 1, где $\omega_3, \omega_4, \omega_5$ – угловые скорости моталки, валков клетки и разматывателя; V_1, V_2 – линейные скорости полосы на выходе из разматывателя и клетки, НУ – нажимное устройство, R_p, R_b – радиусы рулона и барабана моталки.

В качестве примера приводится наиболее распространенная структура в прокатных механизмах в виде четырехмассовой электромеханической системы с упругостями первого и второго рода, изображенная на рис. 2, описываемая (1), где L – расстояние между осями вращающихся механизмов; v_{kl}, v_M – линейные скорости клетки и моталки; F_C, C_p – сила натяжения и жесткость прокатываемой полосы; R_1, R_2 – радиусы рулона и валка клетки; J_M, J_{kl} – моменты инерции моталки и клетки; $M_{f1} - M_{f4}$ – моменты внешнего трения; M_{13}, M_{24} – упругие моменты; C_1, C_2 – жесткости упругих элементов; b_1, b_2 – коэффициенты внутреннего демпфирования; РД – редуктор; ω_1, ω_2 – угловые скорости приводных двигателей моталки и клетки; J_{M1}, J_{M2} – моменты инерции двигателей M_1 и M_2 ; k_{f3}, k_{f4} – коэффициенты вязкого трения; M_{d1}, M_{d2} – моменты двигателей M_1 и M_2 ; ε – относительное удлинение полосы; R_0 – радиус барабана; h – толщина полосы; $i_{d1}, i_{d2}, U_{d1}, U_{d2}$ – токи и на-

пряжения на выходе тиристорного преобразователя; T_{d1}, T_{d2} – электромагнитные постоянные времени электроприводов; R_{d1}, R_{d2} – сопротивления якорных цепей; C_{M1}, C_{M2} – конструктивные коэффициенты двигателей M1 и M2; Φ_1, Φ_2 – магнитные потоки двигателей M1 и M2; $p = d/dt$.

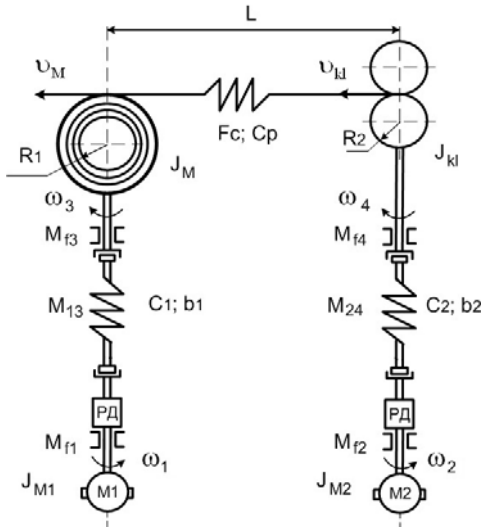


Рис. 2

$$\left. \begin{aligned}
 J_M p \omega_3(p) &= M_{d1}(p) - F_C(p) R_1(p) - k_{f3} \omega_3(p); \\
 J_{kl} p \omega_4(p) &= M_{d2}(p) + F_C(p) R_2 - k_{f4} \omega_4(p); \\
 F_C(p) &= \frac{C_p}{p} \{v_{kl}(p) - [1 + \varepsilon(p)] v_M(p)\}; \\
 \varepsilon(p) &= \frac{1}{C_p L} F_C(p); \\
 R_1(p) &= \sqrt{R_0^2 + \frac{h}{\pi} v_M(p)}; \\
 M_{d1}(p) &= i_{d1}(p) C_{M1} \Phi_1; \\
 M_{d2}(p) &= i_{d2}(p) C_{M2} \Phi_2; \\
 i_{d1}(p) &= \frac{1}{R_{d1}(T_{d1} p + 1)} (U_{d1}(p) - C_{M1} \Phi_1 \omega_3(p)); \\
 i_{d2}(p) &= \frac{1}{R_{d2}(T_{d2} p + 1)} (U_{d2}(p) - C_{M2} \Phi_2 \omega_4(p)),
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

С учетом (1) математическое описание силы натяжения металла между клетью и намоточно-размоточным механизмом при намотке и размотке примет вид

$$F_C = \begin{cases} \frac{C_p}{p} \{v_{kl}(p) - (1 + \varepsilon(p)) v_M(p)\}, & \text{при } v_{kl} - v_M > 0 \text{ – намотка;} \\ \frac{C_p}{p} \{v_M(p) - (1 + \varepsilon(p)) v_{kl}(p)\}, & \text{при } v_{kl} - v_M < 0 \text{ – размотка;} \\ 0, & \text{при } v_{kl} - v_M = 0 \text{ – отсутствие натяжения} \\ & \text{при технологической паузе.} \end{cases} \quad (2)$$

В процессе прокатки полоса по всей длине имеет различную толщину, которая, тем не менее, входит в пределы допусков по отклонению. Изменение значения h влияет на натяжение полосы F_C , а также на её упругие свойства. Существует диаграмма растяжения, отражающая свойства металла при холодной прокатке, согласно которой выделяют четыре зоны: зона упругости, когда сила натяжения полосы подчиняется закону Гука; зона текучести, когда происходит существенное изменение длины полосы без заметного увеличения нагрузки; зона упрочнения, при которой удлинение полосы сопровождается возрастанием нагрузки, но значительно более медленным, чем на упругом участке; зона разрушения структуры металла. Известное математическое описание упругостей второго рода дополнено условием, при котором имитируется эффект обрыва полосы, то есть, когда текущее значение силы натяжения полосы F_C достигает критического F'_{Cmax} , соответствующего начальному значению из зоны разрушения структуры металла, происходит обрыв прокатываемой полосы, а в математическом описании выходное значение силы натяжения F'_C обнуляется:

$$F'_C = \begin{cases} F_C, & \text{при } F_C < F'_{Cmax}; \\ 0, & \text{при } F_C \geq F'_{Cmax}, \end{cases} \quad (3)$$

$$F'_{Cmax} = K_r \cdot F_{Crab}, \quad (4)$$

где K_T – коэффициент предела прочности материала (в модели принято $K_T=1,5$); $F_{C_{rab}}$ – сила натяжения металла при рабочих режимах прокатки. Величины K_T , $F_{C_{rab}}$ определяются с учетом физико-механических свойств материала и геометрических размеров прокатываемой полосы.

На основании (1)–(4), а также известного математического описания электромеханических процессов прокатки [6] в прикладном пакете моделирования динамических систем Simulink среды MATLAB создан комплекс компьютерных моделей элементов прокатного оборудования, которые имитируют работу намоточно-размоточного механизма, рабочей клетки, правильной машины, упругого соединения «длинный вал», а также модель прокатываемой полосы с учетом реверсирования, обрыва полосы (2) – (4) и петлевой ямы (рис. 3).

Смоделировано управление названными приводными агрегатами при помощи двигателей постоянного тока независимого возбуждения и систем автоматического управления. Модели электродвигателей могут быть как стандартные, так и собственные или модернизированные. Каждая модель представляет собой самостоятельную подсистему с портами входных и выходных координат, логотипом и интерфейсом. Такой подход имеет преимущества, так как любые блоки могут соединяться друг с другом по каналам механических, электрических и информационных связей. Имеется возможность наблюдения любых электромеханических координат и задания различных режимов прокатки в зависимости от технологического процесса.

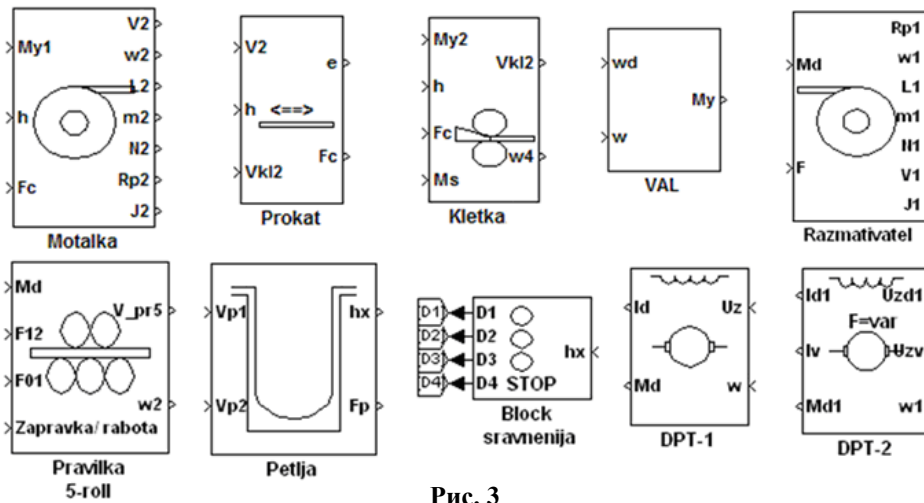


Рис. 3

Каждая созданная компьютерная модель соответствует отдельно взятой секции прокатной линии стана или механизма, который является составной частью одного из технологических процессов при производстве холоднокатанного листа. Одним из основных агрегатов стана холодной прокатки является наматывающий (разматывающий) механизм, поэтому приведем, в качестве примера, внутреннюю структуру модели наматывающего механизма «Motalka» (рис. 4). Аналогичные структуры находятся внутри каждой из подсистем комплекса компьютерных моделей элементов прокатного оборудования.

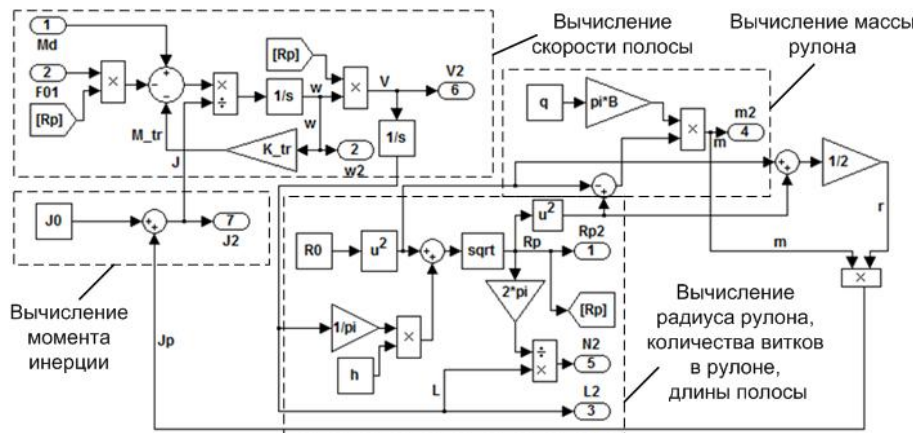


Рис. 4

Для станов холодной прокатки актуальной является стабилизация натяжения полосы в условиях действия упругих деформаций длинного вала [10, 11].

Комплекс компьютерных моделей намоточно-размоточного механизма, двигателя постоянного тока, упругостей первого и второго рода [1] использовался для исследования и оценки свойств системы оптимального управления натяжением полосы стана холодной прокатки, алгоритм работы которой имеет вид

$$U_y = U_{y\max} \operatorname{sat} \frac{g}{m_6} \left(\left(\frac{\gamma_{06}}{p} + \gamma_{16} \right) (F_C^* - F_C) - \gamma_{26} p F_C - \gamma_{36} p \omega_3 - \gamma_{46} (\omega_1 - \omega_3) - \gamma_{56} p \omega_1 - \gamma_{66} p I_d \right), \quad (5)$$

где F_C, F_C^* – реальное и желаемое значения силы натяжения прокатываемой полосы, U_y – напряжение на входе управляемого преобразователя питания двигателя моталки М1; $U_{y\max}$ – максимальное напряжение управления преобразователем; I_d – ток якорной цепи двигателя М1; γ_{i6} ($i = 0..6$) – весовые коэффициенты, полученные в результате решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов, при использовании модифицированного принципа симметрии [7], g – функция от отклонений переменных состояния объекта управления и управляющих воздействий, которые являются членами ряда Тейлора второго и более высоких порядков малости [7], $m_6 = 1/T_\mu$, T_μ – постоянная времени управляемого преобразователя. В коэффициенты алгоритма оптимального управления натяжением полосы входят переменные технологические параметры: угловая скорость полосы на входе в валки клетки ω_4 и радиус рулона R_1 .

Структура компьютерной модели синтезированной системы управления натяжением полосы приведена на рис. 5, а, графики полученных электромеханических процессов, которые относятся к номинальному режиму, на рис. 5, б. Для исследования и оценки свойств САУ смоделированы внешнее возмущение в интервале времени с 40 с до 60 с в виде наброса нагрузки $M_c = 6305$ Нм, что составляет 30% от номинального момента двигателя клетки (рис. 5, в), параметрические возмущения, вызванные изменением начального приведенного момента инерции (рис. 5, г), изменение сопротивления якорной цепи электропривода моталки (рис. 5, д), изменение начального радиуса рулона (рис. 5, е).

При моделировании использованы данные оборудования дрессировочного одноклетевого стана 1700-1 цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запорожсталь». Согласно технологической инструкции ТИ 226-П.ХЛ1-20-05 «Дрессировка холоднокатанных полос на станах 1700 №1 и №2» ОАО "Запорожсталь" мощность электродвигателя (ЭД) разматывающего устройства 2x150 кВт, $n = 300-1200$ об/мин, максимальное натяжение полосы 15000 Н, мощность ЭД рабочих валков клетки 2x660 кВт, $n = 450-1200$ об/мин, $n_{\text{ном}} = 600$ об/мин, максимальная скорость 20 м/с; мощность ЭД моталки 630 кВт; $n = 500-1000$ об/мин; скорость намотки 20 м/с. Для перехода от действительных значений величин к относительным используются базовые: $F_C = 5000$ Н; $\omega_3 = 70,16$ рад/с; $\omega_4 = 62,83$ рад/с.

При кратковременном набросе нагрузки на клетки в виде скачка M_c , составляющего 30% от номинального момента двигателя, амплитуда колебаний натяжения полосы увеличилась на 1-2%, а угловая скорость клетки уменьшилась на 1-2%, что допустимо по технологическому процессу. Увеличение начального приведенного момента инерции электропривода клетки в 3 раза приводит к более затянутым переходным процессам изменения скоростей клетки и моталки, однако на натяжение полосы это не оказывает влияния. Изменение сопротивления якорной цепи электропривода моталки влияет на электромагнитную и электромеханическую постоянные времени, которые определяют значения коэффициентов вспомогательных обратных связей алгоритма управления натяжением полосы. При увеличении сопротивления наблюдается повышение колебательности натяжения при разгоне до правочной скорости и работе на ней. При увеличении начального радиуса рулона в 2 раза, например, при вынужденной остановке прокатки рулона и последующем запуске прокатки того же рулона, угловая скорость моталки уменьшается пропорционально радиусу рулона, а натяжение полосы и угловая скорость клетки остаются неизменными.

Синтезированная система оптимального управления взаимосвязанными электроприводами моталки и клетки за счет полной наблюдаемости объекта управления, учета влияния переменной угловой скорости смежного электропривода и упругих связей первого и второго рода обеспечивает отработку задающего воздействия без перерегулирования и компенсирует влияние упругостей шпинделя и полосы на динамические характеристики электропривода без увеличения времени переходного процесса с нулевой статической ошибкой. Система является нечувствительной к ряду дестабилизирующих факторов: увеличению начального приведенного момента инерции электропривода клетки в 3 раза, изменению сопротивления якорной цепи электропривода моталки, увеличению начального ра-

тельности к ряду дестабилизирующих факторов, отсутствия перерегулирования, компенсации влияния упругостей длинного вала и прокатываемой полосы на динамические характеристики электропривода.

1. Бондаренко В.И., Пирожок А.В., Назарова Е.С. Моделирование систем управления взаимосвязанных электроприводов процесса прокатки с учетом упругостей первого и второго рода // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – Ч. 1. – С. 129–134.
2. Василев Я.Д., Путники А.Ю., Симененко О.В. Современный стан холодной прокатки для комбината «Запорожсталь» // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №1. – С. 37–40.
3. Злобин А.А., Курятов В.Н., Мальцев А.П., Романов Г.А. Основные концептуальные положения энергосбережения на предприятиях черной металлургии. – Режим доступа: http://www.kotel.ru/articles/text_826_7.htm
4. Квашин В.О., Мусиенко Ю.Н., Мельникова А.А. Синтез модели электропривода размотывателя с системой управления стабилизации скорости размотки полосы // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 2010. – №4. – Ч.2. – С. 1–4.
5. Назарова Е.С., Пирожок А.В. Моделирование и исследование электромеханических систем станов холодной прокатки / VII Междун. научно-практ. конф. «Научно-технический прогресс в металлургии». – Казахстан, Карагандинский государственный индустриальный университет. – 2013. – Том 2. – С. 98–105.
6. Садовой А.В., Назарова Е.С., Бондаренко В.И., Пирожок А.В. Новое в моделировании и исследовании электромеханических систем прокатного производства. – Запорожье: Просвіта, 2014. – 144 с.
7. Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами. – Киев: ИСИМО, 1996. – 298 с.
8. Постанова Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки» <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF>
9. Постанова Кабінету Міністрів України від 05.02.1997 р. № 148 «Про Комплексну державну програму енергозбереження України» <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/148%D0%B0-97-%D0%BF>
10. Waleed I. Hameed, Khearia A. Mohamad. Strip Thickness Control of Cold Rolling Mill with Roll Eccentricity Compensation by Using Fuzzy Neural Network // Engineering. – 2014. – No 6. – Pp. 27–33. Available at: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?paperID=41892>
11. Yuheng Yin, Liwei Cao, Yuran Wang and Hang Fu. Research and Design of Hydraulic AGC System Model of Cold Rolling Mill // International Journal of u- and e- Service, Science and Technology. – 2013. – Vol. 6. – No 5. – Pp. 89–96. Available at: http://www.sersc.org/journals/IJUNESST/vol6_no5/9.pdf

УДК 62-83:004.94

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

О.С. Назарова, канд.техн.наук
Запорізький національний технічний університет,
вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, 69063, Україна.
E-mail: nazarova@zntu.edu.ua

Стаття присвячена висвітленню можливостей математичного моделювання електромеханічних систем станів холодної прокатки з метою зменшення енерговитрат при модернізації існуючих і проектуванні нових систем автоматичного керування електроприводами вказаних станів. Використовуючи розроблений комплекс комп'ютерних моделей елементів прокатного виробництва, удосконалено систему автоматичного керування натягом смуги стана холодної прокатки на прикладі синтезованої системи оптимального керування взаємопов'язаними електроприводами моталки та кліті дресирувального одноклітьового стана 1700-1 цеха холодної прокатки №1 ВАТ «Запоріжсталь», що дозволяє підвищити якість керування і забезпечити енергозберігаючий ефект за рахунок її нечутливості до низки дестабілізуючих факторів, відсутності перерегулювання, компенсації впливу пружностей довгого валу і прокатуваної смуги на динамічні характеристики електропривода. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: математичне моделювання, енергозбереження, стан холодної прокатки, електромеханічна система.

THE MATHEMATICAL SIMULATION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF COLD ROLLING MILLS

Ye.S.Nazarova

Zaporozhye National Technical University,
str. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine.

E-mail: nazarova@zntu.edu.ua

Article is devoted to the potential of mathematical simulation of electromechanical systems of cold rolling mills in order to reduce energy consumption in the modernization of existing and designing new systems of automatic control of electric drives of these mills. Using the developed complex computer models of the rolling production elements, improved automatic control system of strip tension of cold rolling mill, the example of the synthesized optimal control system interconnected electric drives of winder and stand of a temper mill 1700-1 single stand cold rolling shop №1 JSC "Zaporizhstal". The application of optimal control system of strip tension will improve the quality control and provide energy-saving effect due to its insensitivity to a number of destabilizing factors, the lack of deregulation, the compensation effect of elastic long shaft and rolled strip on the dynamic characteristics of the drive. References 11, figures 5.

Key words: mathematical simulation, energy saving, cold rolling mill, electromechanical system.

1. Bondarenko V.I., Pirozhok A.V., Nazarova Ye.S. Simulation of control systems interconnected electric drives of rolling process with the elasticities of the first and second kind // *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2010. – Vol. 1. – Pp. 129–134. (Rus)
2. Vasilev Ya.D., Putnoki A.Yu., Simenenko O.V. Modern cold rolling mill to the plant "Zaporizhstal" // *Metalurgicheskaiia I Gornorudnaia promyshlennost*. – 2007. – No 1. – Pp. 37–40. (Rus)
4. Kvashnin V.O., Musienko Yu.N., Melnikova A.A. Synthesis of electric drive decoiler model with a control system stabilizing the speed of unwinding strip // *Visnyk Kremenchutskoho Derzhavnoho Politekhnicnoho universytetu*. – 2010. – No 4. – Pp. 1–4. (Rus)
3. Zlobin A.A., Kuriatov V.N., Maltsev A.P., Romanov G.A. The main conceptual positions of energy saving at enterprises of ferrous metallurgy. (Rus) Available at: http://www.kotel.ru/articles/text_826_7.htm (accessed 08.12.2014)
5. Nazarova Ye.S., Pirozhok A.V. Simulation and research of electromechanical systems of cold rolling mills / *Sbornik publikatsii VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauchno-tekhnicheskii progress v metalurgii"*. – Kazakhstan, Karagandinskii Gosudarstvennyi Industrialnyi Universitet. – 2013. – Vol. 2. – Pp. 98–105. (Rus)
6. Sadovoi A.V., Nazarova Ye.S., Bondarenko V.I., Pirozhok A.V. New in simulation and research of electromechanical systems of rolling production. – Zaporozhye: Prosvita, 2014. – 144 p. (Rus)
7. Sadovoi A.V., Sukhinin B.V., Sokhina U.V. Optimal control systems of precision electric drives. – Kiev: ISIMO, 1996. – 298 p. (Rus)
8. *Cabinet of Ministers of Ukraine* No 243, 01.03.2010 "On approval of the State Target Economic energy efficiency programs and the development of energy production from renewable energy sources and alternative kinds of fuel for 2010–2015". (Ukr). <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF>
9. *Cabinet of Ministers of Ukraine* No 148, 05.02.1997 "On comprehensive state program of energy conservation Ukraine". (Ukr) <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/148%D0%B0-97-%D0%BF>
10. Waleed I. Hameed, Khearia A. Mohamad. Strip Thickness Control of Cold Rolling Mill with Roll Eccentricity Compensation by Using Fuzzy Neural Network // *Engineering*. – 2014. – No 6. – Pp. 27–33. Available at: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?paperID=41892> (accessed 08.12.2014)
11. Yuheng Yin, Liwei Cao, Yuran Wang and Hang Fu. Research and Design of Hydraulic AGC System Model of Cold Rolling Mill // *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*. – 2013. – Vol.6. – No5. – Pp. 89–96. Available at: http://www.sersc.org/journals/IJUNESST/vol6_no5/9.pdf (accessed 08.12.2014)

Надійшла 15.12.2014
Остаточний варіант 08.07.2015