

УДК 621.771.25

Ю.Г. САМБОРСКИЙ, магистр, В.Г. ФАЙНШТЕЙН, канд. техн. наук, доц.,
Криворожский национальный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ КАК ОБЪЕКТА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Разработанная математическая модель непрерывного многоклетьевого стана горячей прокатки как объекта системы управления в режиме свободной прокатки. Предложенная модель учитывает, как динамические свойства электропривода так и технологические параметры стана, в частности учтена как упругая деформация, так и пластическая деформация горячего металла. Получены уравнения математического описания технологического процесса горячей прокатки в комплекте с известными уравнениями переходных процессов в электроприводе.

Ключевые слова: непрерывный стан горячей прокатки, режим свободной прокатки, электродвигатель, секундный объем, моделирование.

Жесткие требования мирового рынка металлопроката ставят производителей в условия, когда необходимо конкурировать с ведущими мировыми компаниями, повышая качество продукции и снижая ее себестоимость, что привело к предъявлению более жестких требований к системам управления режимами работы электропривода прокатных клетей и существующих способов управления технологическими переменными процесса прокатки.

Постановка задачи. Одно из направлений по улучшению качества металла это так называемый режим свободной прокатки [0], который по сравнению с режимом прокатки с подпором или натяжением [0] позволит улучшить заполнение калибров металлом, обеспечивая точный требуемый профиль проката. [0].

В настоящее время достичь режим свободной прокатки на реальных станах горячей прокатки возможно действиями оператора, за счет «тонкой» настройки соотношения скоростей, до тех пор пока значение тока (подпора или натяжения соответственно) не будет равным нулю. При этом не решаются вопросы, которые существенно влияют на качество работы стана:

практически невозможна установка режима свободной прокатки одновременно в трех и более клетях;

перенастройка стана на каждый слиток;

не исключаются ошибки оператора при ручной настройке стана;

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Сегодня не существует прямого способа контроля величины натяжения или подпора горячего металла, управляя которым возможно обеспечить режим свободной прокатки. О наличии усилий в прокатываемой полосе на участке между клетями судят косвенным путем (токи потребляемые двигателями клетей и (или) их скорости, и т.п.) [0].

Например, в [0,0,0] предлагается, для создания системы автоматического управления процессом непрерывной прокатки с минимальным натяжением, или подпором сортового металла, определять и запоминать ток электродвигателя задней клетки межклетьевого промежутка до захода металла в переднюю клетку этого же промежутка, а затем измерить ток этого же электродвигателя после захода металла в последующую клетку межклетьевого промежутка, сравнив эти токи, произвести корректировку скорости предыдущей клетки по сигналу разности этих токов.

Несмотря на технические проблемы реализации косвенного метода измерения натяжения (изменение тока двигателя соизмеримо с погрешностями его измерения), этот способ в настоящее время в основном предлагается использовать.

Качественное выполнение анализа работы системы управления электроприводом возможно только при условии наличия математической модели, в нашем случае уравнений, связывающих закон изменения моментов двигателей клетей от времени при отклонении скоростей этих двигателей от значений, соответствующих режиму свободной прокатки.

Анализ исследований и публикаций. В известных работах по теории прокатки [0,0,0] приводятся расчеты режима свободной прокатки только в статическом режиме, не рассматривая вопрос, а как будет проходить процесс во времени, например, после отклонения скорости от расчетного значения. Судя по технической литературе ранее вопросами управления и исследованиями процессов прокатки в динамическом режиме занимались электроприводчики, т.к.

технологов больше интересовало поведение системы в статическом режиме, причем, электроприводчики рассматривали, как правило, динамику привода без учета свойств технологического процесса [0]. В настоящее время появились работы, в которых исследуются процессы прокатки с учетом динамических свойств как системы клетей с металлом так и электропривода.

Например, в работе [0] представлена математическая модель прокатного стана в котором межклетевая связь, определяемая свойствами раската между клетями, рассматривается как упругое звено. Такая модель возможно удовлетворительно работает на станах холодной прокатки, но на станах горячей прокатки наряду с упругой деформацией имеет место и пластическая деформация металла действием которой нельзя пренебречь.

Поэтому ниже, для решения задачи управления процессом прокатки без подпора и натяжения (свободная прокатка) на непрерывно-заготовочных станах, приводится соображение по созданию линеаризированной модели процесса с результатами ее использования для решения некоторых задач.

Изложение материалов. Влияние изменения скорости клетей в линии стана на моменты их двигателей рассмотрены в [0] и получено выражение, связывающее изменение момента с изменением скорости, которое не зависит от времени. Нас интересует процесс изменения момента во временной плоскости. Это изменение можно получить если учесть связь момента с изменением высоты раската. По [0]

$$\Delta M_i = -\frac{2M_0 \alpha_i}{(\alpha_0 \theta_i - 2\gamma_0 \theta_i)} \cdot \Delta \gamma_i$$

где i - номер клетки в порядке следования раската; α_0 - расчетное значение угла захвата металла валками i -й клетки; γ_0 - расчетное значение критического угла; M_0 - расчетное значение момента на валу клетки при прокатке; $\Delta \gamma_i$ - изменение критического угла от расчетного значения

Свободная прокатка подразумевает собой выполнение условие постоянства секундных объемов [0]

$$V_{i-1} = V_i = V_{i+1} = const \quad (1)$$

где V_i - секунднй объем клетки i -той клетки в очередности входа раската в клетки

или

$$\omega_{i-1} R_{i-1} (1 + \varepsilon_{i-1}) S_{i-1} = \omega_i R_i (1 + \varepsilon_i) S_i = \omega_{i+1} R_{i+1} (1 + \varepsilon_{i+1}) S_{i+1},$$

где ω_0 - угловые скорости вращения валков клетки в режиме свободной прокатки; S - площадь поперечного сечения раската; R - радиус валков; ε - опережение.

При отклонении величины скорости вращения валков одной из клетей в линии прокатного стана, в межклетевом промежутке равновесие по (1) нарушается. При изменении скорости i -й клетки на величину $\Delta \omega_{i-1}$, для получения режима свободной прокатки, скорость i -той клетки должна измениться на величину

$$\Delta \omega_i = \Delta \omega_{i-1} Kc_{i-},$$

а при изменении скорости $i+1$ клетки на величину $\Delta \omega_{i+1}$

$$\Delta \omega_i = \Delta \omega_{i+1} \cdot Kc_{i+},$$

Коэффициенты согласования скоростей вращения валков клетей

$$Kc_{i-} = -R_{i-1} (1 + \varepsilon_{i-1}) S_{i-1} / R_i (1 + \varepsilon_i) S_i; Kc_{i+} = R_{i+1} (1 + \varepsilon_{i+1}) S_{i+1} / R_i (1 + \varepsilon_i) S_i$$

Если при изменении скорости валков $i-1$ клетки, скорость i -й клетки не будет корректироваться, то перед клетью объем металла будет изменяться

$$\Delta V = \Delta \omega_i R_i (1 + \varepsilon_i) S_i \cdot t,$$

где t - время, с момента изменения скорости $i(i+1)$ клетки.

Изменение объема металла приводит к изменению геометрии раската. Предполагая, что деформация в межклетевом промежутке устойчивая (нет прогиба полосы и она распространяется по ширине и высоте одинаково, а по длине деформация ограничена валками данной и последующей клетей) приближенно считаем, что изменение высоты раската приводит к пропорциональному изменению объема. Указанные допущения действуют только при малых величинах ΔV . При малом значении ΔV , согласно [0] изменение высоты раската связано с изменением

объема деформированного тела соотношением

$$\ln(\delta h + 1) = \frac{\Delta V}{V_0}$$

или

$$\delta h = \exp(\Theta \cdot t) - 1$$

где δh - относительное изменение высоты раската; $\Theta = \Delta\omega_i R_i (1 + \varepsilon_i) / L_s$ - постоянная времени процесса изменения h .

При изменении высоты по [0], если отношение удельной силы трения на контактной поверхности к критическому углу для всех клеток одинаково и остальные параметры прокатки постоянны, то приращение критического угла определяется как

$$\Delta\gamma_i = \gamma_{0i} \cdot \frac{1 + \varepsilon}{2\varepsilon} \left(-\frac{\Delta\omega_i}{\omega_{0i}} - \exp(\Theta \cdot t) + 1 \right) \approx \gamma_{0i} \cdot \frac{1 + \varepsilon}{2\varepsilon} \left(-\frac{\Delta\omega_i}{\omega_{0i}} - \exp(\Theta \cdot t) + 1 \right)$$

откуда получаем

$$\Delta M d_i = \frac{M_{0i}}{\omega_{0i}} \mu_i \Delta\omega_i + M_{0i} \mu_i [\exp(\Theta \cdot t) - 1]$$

где ω_{0i}, M_{0i} - расчетные значения скорости и момента на валу i -й клетки,

$$\mu_i = \frac{(1 + \varepsilon) / \varepsilon}{(\alpha_i - 2\gamma_{0i})}$$

Несмотря на то, что модуль упругости стали при горячей прокатке значительно уменьшается, пренебречь действием упругих сил нельзя. Поэтому, как и в [0], учитываем действие сил упругости, которые создают дополнительный момент на валу i -й клетки

$$\Delta M u_i = \frac{\Delta l \cdot E \cdot S_{i-1} \cdot R_i}{L_s} \approx E g \cdot S_{i-1} \cdot R_i \cdot [\exp(\Theta \cdot t) - 1]$$

В этом выражении Eg -модуль упругости прокатываемой стали. Суммарное приращение момента, вызванное рассогласованием скоростей

$$\Delta M d_i = \frac{M_{0i}}{\omega_{0i}} \mu_i \Delta\omega_i + (M_{0i} \mu_i + E g \cdot S_{i-1} \cdot R_i) [\exp(\Theta \cdot t) - 1]$$

На основании изложенного на рис. 1 показана структурная схема вычисления приращения момента при отклонении значения скорости от скорости свободной прокатки.

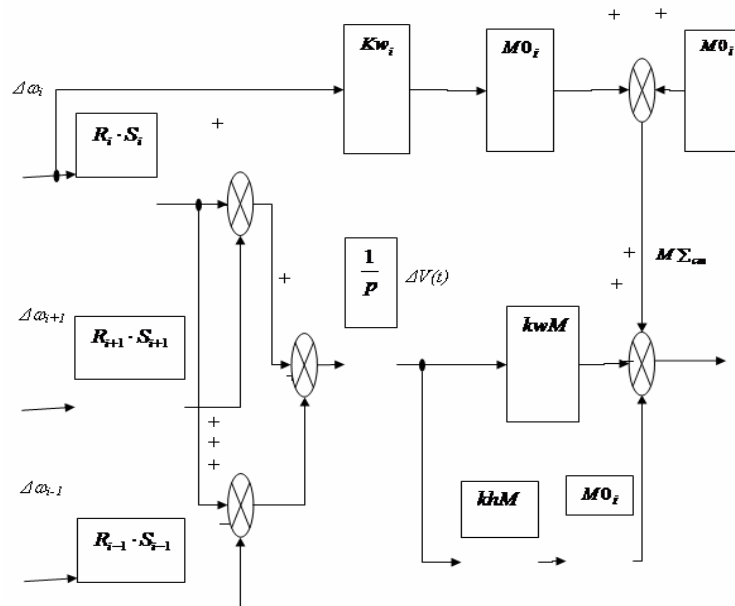


Рис. 1. Структурная схема непрерывного многоклетьевого стана горячей прокатки как объекта системы автоматического управления

где $Kw_i = 1/\omega_i$ - коэффициент вязкого трения; $khM = 1/2 \cdot R_i \cdot (\alpha_{0i} - \gamma_{0i}) \cdot h_i$ - коэффициент зависимости момента вызванный изменением высоты раската в i -й клетки $kwM = \frac{\sigma_{p0} \cdot R_{i-1}}{Ls \cdot ip_i}$ -

коэффициент зависимости момента вызванный изменением угловой скорости i -й клетки; σ_{pd} - допустимое напряжение растяжения (определяется по [0]); ip_i - передаточное число редуктора i -й клетки; Ls - расстояние между смежными клетями;

В качестве примера произведем расчет коэффициентов определения дополнительного момента двигателя при следующий параметрах клетки стана горячей прокатки

$$\sigma_{pd} = 1,05 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2, Ls = 5,5 \text{ м}, R_{i-1} = 0,4 \text{ м}, R_i = 0,426 \text{ м}, \alpha_{0i} = 0,375 \text{ рад}, \gamma_{0i} = 0,044 \text{ рад}, h_i = 0,365 \text{ м},$$

$$M0_i = 26350 \text{ Н} \cdot \text{м}, ip_i = 19,17$$

Определяем значения коэффициентов khM и kwM

$$kwM = \frac{1,05 \cdot 10^7 \cdot 0,4}{5,5 \cdot 19,17} = 39830; \quad khM = \frac{1}{2 \cdot 0,426 \cdot (0,375 - 0,044) \cdot 0,365} = 9,699.$$

Проведено математическое моделирование многоклетьевого стана горячей прокатки как объекта системы управления в режиме свободной прокатки (см. рис 1) в программной среде Simulink, результаты которого показали 20%-ное совпадение с результатами полученными на реально действующих станах горячей прокатки.

Выводы: Разработана математическая модель непрерывного стана горячей прокатки как объекта системы автоматического управления, которая позволит рассматривать вопросы анализа и синтеза системы управления электроприводом с учетом как технологических свойств объекта так и динамических свойств электропривода.

Список литературы

1. **Файнберг Ю.М., Зеленов А.Б.** Регулирование электропривода непрерывных станов горячей прокатки. Харьков. Металлургиздат 1956 – 13 с.
2. **Елисеев В.А., Шинянский А.В.** Справочник по автоматизированному электроприводу под редакцией Елисеева. Москва. Энергоатомиздат 1983
3. **Калинин В.П.** Исследование утяжки профиля и петлеобразования при непрерывной прокатке. Диссертация. Москва 1956
4. **Выдрий В.Н.** Динамика прокатных станов. Свердловск. Металлургиздат 1960
5. **Авторское свидетельство СССР №13971110**, кл. 6 В 21 В37/52, 1988, кол. 3.
6. **Авторское свидетельство СССР №1708462**, кл. 6 В 21 В37/52, 1992, кол. 4, 5.
7. **Кузьмин А.В., Светличный А.В., Коцегуб П.Х.** Согласование частот вращения вертикальных и горизонтальных валков слябинга с учетом статической нагрузки электропривода // Металл и литье Украины 1999. №5-6.
8. **Бондаренко В.И., Пирожок А.В., Назарова Е.С.** Моделирование систем управления взаимосвязанных электроприводов процесса прокатки с учетом упругостей первого и второго рода. // Запорожский национальный технический университет.
9. **Резвов Б.С.** Моделирование межклетевого взаимодействия при прокатке на непрерывных станах. Производство проката. 2011. №8.
10. **Целиков А.И., Гришков А.И.** Теория прокатки. Москва. Металлургия 1970 с-19

Рукопись поступила в редакцию 25.03.14