

С.Н. БАЛЮТА, канд. техн. наук, доц. КНАПУ (г. Киев)

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ, НАТЯЖЕНИЯ И ПЕТЛИ ПОЛОСЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Синтезированы оптимальные регуляторы, с помощью которых минимизируется критерий качества, включающий дисперсии продольной разнотолщинности и дисперсии отклонений натяжения полосы в межклетевых промежутках от их номинальных значений. Рассчитаны реализации случайных изменений продольной разнотолщинности и межклетевых натяжений широкополосного стана горячей прокатки.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, система регулирования.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами.

Автоматизированные системы управления широкополосными станами горячей прокатки выполняют разнообразные функции по слежению за прокатываемым металлом, управлению скоростью прокатки, расчету программ обжати, адаптации математических моделей и процессов управления стана, регулированию продольной разнотолщинности, формы и профиля полосы, межклетевых натяжений, диагностике оборудования и др. Однако основная доля экономического эффекта от внедрения всего комплекса подсистем автоматизации определяется точностью работы локальных подсистем регулирования геометрических параметров проката. Поэтому вопросы разработки систем, обеспечивающих высокоточное регулирование толщины, профиля и формы полосы, занимают одно из центральных мест во всем комплексе создания эффективных систем управления технологическими процессами прокатного производства.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме.

В практике проектирования систем автоматического управления геометрическими параметрами проката широко используются математические методы и модели прокатных станов для повышения качества проекта и ускорения выпуска проектной документации [1 – 6]. При создании АСУ ТП прокатного стана вопросы разработки локальных подсистем регулирования геометрических параметров проката занимают центральное место, так как от точности работы этих подсистем в значительной мере зависит эффективность работы всей АСУ ТП прокатного стана, поэтому проблемы синтеза систем, позволяющих повысить точность регулирования геометрических параметров проката, являются актуальными.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является разработка методики синтеза системы оптимального регулирования толщины, натяжения и петли полосы широкополосного стана горячей прокатки.

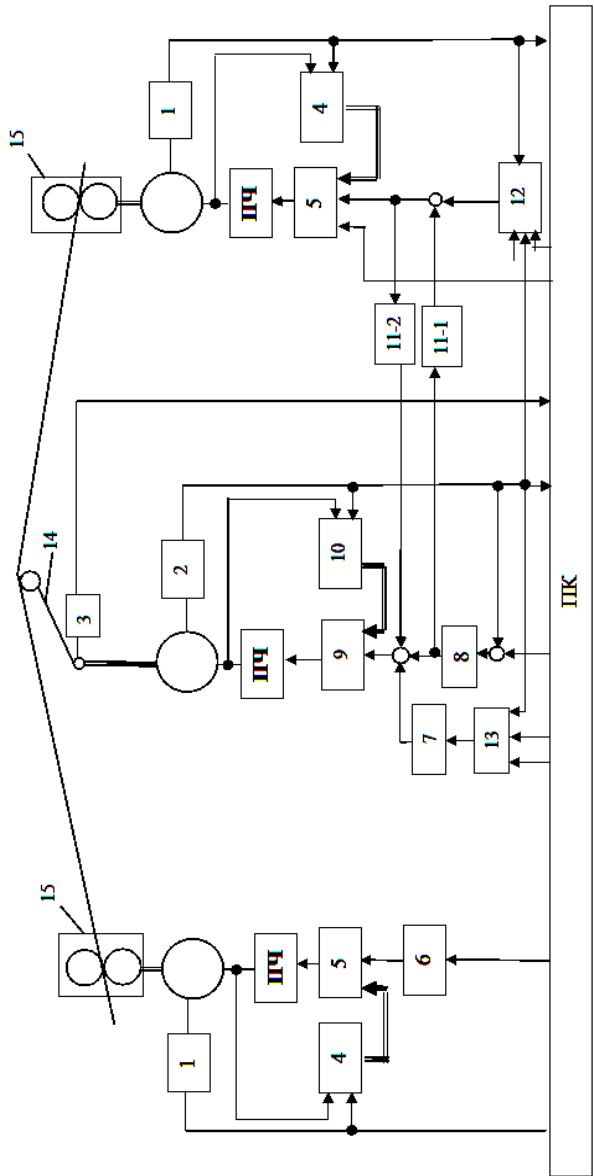


Рис. 1. Схема системы регулирования натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки

Задачей работы является синтез и исследование динамических характеристик синтезированной системы регулирования толщины, натяжения и петли полосы широкополосного стана горячей прокатки.

Изложение материалов исследования, полученных научных результатов. Процесс горячей прокатки сопровождается колебаниями технологических параметров – толщины, давления прокатки, натяжения полосы и т.д. Причем, если колебания толщины полосы обусловлены как неравномерностью толщины и механических свойство проката, а также эксцентриситетами валков прокатной клетки, то колебания натяжения полосы и пропорциональные им колебания токов главных приводов обусловлены наличием упругих элементов в трансмиссиях передачи момента прокатки от приводного двигателя до прокатного валка. В качестве примера на рис. 1 показана схема системы автоматического регулирования межклетевого натяжения и петли полосы [1]. На этой схеме обозначено: 1 – датчик частоты двигателя прокатной клетки; 2 – датчик угла петледержателя; 3 – датчик натяжения полосы; 4 – наблюдатель состояния привода клетки; 5 – регулятор скорости двигателя клетки; 6 – ПИ регулятор скорости; 7 – контроллер компенсации статического момента; 8 – регулятор положения петледержателя; 9 – регулятор скорости петледержателя; 10 – наблюдатель состояния петледержателя; 11 – контроллер перекрестных связей; 12 – регулятор натяжения; 13 – блок расчета статического момента петледержателя; 14 – петледержатель; 15 – прокатная клеть; ПЧ – преобразователь частоты.

Особенностью работы контура регулирования петли является то, что существенное изменение угла петли проката может производиться при совместном действии петледержателя и скорости приводного двигателя последующей (предыдущей) прокатной клетки. Так, например, при уменьшении угла петли, последующее его увеличение обеспечивается за счет увеличения угла петледержателя и уменьшения скорости последующей клетки. А при увеличении угла петли в результате срабатывания регулятора толщины (провисание петли), уменьшение указанной петли может быть выполнено только путем воздействия на скорость валков прокатной клетки.

Таким образом, требования к системе управления петледержателем реализуются посредством управления петлей с помощью схемы регулирования положения угла петледержателя с обратной связью по углу и соответствующим изменением скорости прокатной клетки посредством перекрестного регулятора. Для компенсации возмущений, действующих на петледержатель со стороны полосы, в схеме регулирования положения используют блок компенсации статического момента, создаваемого полосой. Затухание колебаний в системе петледержатель – полоса, обусловленных упругими свойства прокатываемой полосы и колебательными свойствами петледержателя, а также повышение качества управления системой достигается с помощью управления системой по переменным состояниям.

Система регулирования удельного натяжения состоит из внешнего контура регулирования удельного натяжения и подчиненного контура регулирования скорости прокатной клетки с регулятором состояния. Система регулирования петли состоит из регулятора положения петледержателя и подчиненного контура регулирования скорости петледержателя с регулятором по переменным состояниям. Между системами существует взаимное влияние, которое выражается в изменении статического момента на валу двигателя петледержателя при изменении удельного натяжения и изменении скорости движения петледержателя, которое, в свою очередь, оказывает влияние на удельное натяжение в зависимости от положения петледержателя. Для компенсации указанного взаимного влияния систем и согласования действий систем регулирования удельного натяжения и петли используют перекрестные регуляторы.

При входе прокатываемой полосы в последующую клетку межклетевого промежутка по сигналу с индикатора наличия металла появляются сигналы заданных величин угла подъема петледержателя α_u и удельного натяжения σ_u для данного межклетевого промежутка. Величина заданного угла подъема петледержателя β_u сравнивается со значением фактического угла β , полученного с цифрового датчика угла 2, и эта разница подается на вход регулятор положения 8. В результате на выходе регулятора положения формируется управляющий сигнал, подаваемый на вход регулятора 9 скорости двигателя петледержателя в переменных состояниях. На регулятор 9 также подаются переменные состояния петледержателя, определяемые с помощью наблюдателя состояния 10. Управляющий сигнал с выхода регулятора скорости подается на вход преобразователя частоты ПЧ двигателя переменного тока петледержателя. Возмущения, действующие на ролик петледержателя со стороны полосы, компенсируются с помощью блока компенсации статического момента 13. Это позволяет обеспечить статическую точность регулирования положения петледержателя.

Статический момент, создаваемый полосой, рассчитывается с помощью блока 13 и через контроллер 7 управляющий сигнал компенсации момента поступает на вход регулятора 9 скорости петледержателя в переменных состояниях. Перемещения петледержателя в соответствии с управляющими воздействиями системы регулирования положения являются возмущающими воздействиями для системы регулирования удельного натяжения [1]. Поэтому в системе регулирования удельного натяжения существует компенсация влияния системы автоматического регулирования положения петледержателя, реализованная за счет дополнительной связи [2]. Для этого на вход системы регулирования скорости клетки через перекрестный контроллер 11-1, поступает дополнительный сигнал с выхода регулятора положения петледержателя 8. Тем самым, появляется динамическая составляющая скорости клетки,

способствующая стабилизации петли металла и компенсирующая линейную скорость петледержателя в динамических режимах.

Динамичное изменение натяжения полосы, реализуемое изменением скорости прокатной клетки, также является возмущением для контура регулирования петли. Данное обстоятельство требует введения в схему соответствующей компенсации с помощью перекрестного контроллера 11-2, передающего управляющий сигнал с выхода регулятора натяжения 12 на вход регулятора скорости петледержателя 9. Контур регулирования скорости валков и тока двигателя прокатной клетки построены по известным принципам построения систем в переменных состояниях и систем подчиненного регулирования [1].

Регулирование скорости клетки до номинальной происходит путем изменения моментобразующей составляющей тока статора при постоянном значении потокообразующей составляющей тока статора (магнитного потока), а регулирование скорости выше номинальной – за счет ослабления магнитного потока и, соответственно, при изменении составляющей тока.

Основная задача системы совместного управления главными электроприводами и петледержателями широкополосного стана горячей прокатки заключается в поддержании заданного соотношения между частотами вращения рабочих валков клеток, что обеспечивает постоянство натяжения полосы между клетями и способствует уменьшению отклонения толщины прокатываемой полосы от заданной. Причем, при синтезе такой системы автоматического управления скоростью прокатных двигателей и петледержателей чистовых клеток непрерывного тонколистового стана горячей прокатки требуется рассмотрение многодвигательной электромеханической системы клеток, связанных прокатываемой полосой, как единой электромеханической системы.

Математическая модель многоклетевого непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. Для проектирования локальных подсистем автоматического регулирования толщины, натяжения и петли полосы необходима математическая модель широкополосного стана горячей прокатки как объекта управления. Рассмотрим вначале основные уравнения, связывающие энергосиловые параметры одной прокатной клетки. Количественное приращение конечной толщины Δh_1 , полного усилия ΔP и момента ΔM прокатки, а также приращение величины опережения ΔS , определяются следующими соотношениями [6]:

$$\Delta h_1 = \frac{\partial h_1}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial h_1}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial h_1}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial h_1}{\partial z_0} \Delta z_0 + \frac{\partial h_1}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial h_1}{\partial f} \Delta f,$$

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial P}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial P}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial P}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial P}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f,$$

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial M}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial M}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial M}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial M}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial M}{\partial f} \Delta f,$$

$$\Delta S = \frac{\partial S}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial S}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial S}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial S}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial S}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial S}{\partial f} \Delta f,$$

где Δh_0 , ΔT_0 , ΔT_1 , Δz_0 , $\Delta \sigma_T$, Δf – абсолютные приращения, соответственно, исходной толщины, заднего и переднего натяжения полосы, величины межвалкового зазора, механических свойств прокатываемого металла и величины коэффициента внешнего трения в очаге деформации.

На основании этих уравнений рассмотрим математическую модель многоклетвеного широкополосного стана горячей прокатки, состоящего из k клеток, расположенных на расстоянии L_i друг относительно друга и взаимодействующих через упругонапряженную полосу, следуя работе [6]. Введем векторы входной \vec{H}_i^* и выходной \vec{H}_i толщин, входного \vec{T}_i^* и выходного \vec{T}_i натяжения и положения нажимных устройств \vec{B} , компонентами которых являются соответствующие величины для каждой клетки $J = \overline{1, n}$, для линеаризованной модели и малых отклонений величин от их номинальных значений, получим следующее соотношение

$$\vec{H} = \overline{HH} \otimes \vec{H}^* + \overline{HT}^* \otimes \vec{T}^* + \overline{HT} \otimes \vec{T} + \overline{HB} \otimes (\vec{B} + \vec{\eta} \sin \omega t),$$

где \overline{HH} , \overline{HT}^* , \overline{HT} , \overline{HB} – векторы соответствующих коэффициентов передачи; $\vec{\eta}$ – вектор эксцентриситетов валков; \otimes – кронекеровское (поэлементное) перемножение векторов. Индекс времени i здесь и в дальнейшем, где это не нужно, опущен.

Аналогичные соотношения могут быть получены для векторов моментов главных приводов и опережения скорости движения полосы:

$$\vec{M} = \overline{MH}^* \otimes \vec{H}^* + \overline{MH} \otimes \vec{H} + \overline{MT}^* \otimes \vec{T}^* + \overline{MT} \otimes \vec{T},$$

$$\vec{S} = \overline{SH}^* \otimes \vec{H}^* + \overline{SH} \otimes \vec{H} + \overline{ST}^* \otimes \vec{T}^* + \overline{ST} \otimes \vec{T}.$$

Здесь векторы коэффициентов передачи по моменту \overline{MH}^* , \overline{MH} , \overline{MT}^* , \overline{MT} и опережению \overline{SH}^* , \overline{SH} , \overline{ST}^* , \overline{ST} по соответствующим переменным определяются по методике, приведенной в работе [6].

Вектор выходной скорости полосы определяется соотношением

$$\vec{v} = \vec{v}\omega \otimes \vec{\omega} + \vec{v}\vec{S} \otimes \vec{S},$$

где $\vec{\omega}$, $\vec{v}\omega$ – векторы скорости вращения приводных валков и окружности бочки; $\vec{v}\vec{S}$ – вектор коэффициентов передачи изменения выходной скорости полосы при изменении опережения \vec{S} .

Из уравнения постоянства секундного объема при холодной прокатке

$$\vec{v}^* \otimes \vec{H}^* = \vec{v} \otimes \vec{H}$$

может быть определен вектор входной скорости \vec{V}^* . Пренебрегая массой полосы и предполагая мгновенное распространение напряжений по длине полосы, получим

$$\vec{T}(j) = \vec{T}^*(j+1) \text{ при } j = \overline{1, (n-1)},$$

где $T^*(j)$ – натяжение на разматывателе полосы.

Натяжение смотки полосы

$$\vec{T}(j) = \vec{TL}(j)[\vec{v}^*(j+1) - \vec{v}(j)]\Delta t \text{ при } j = \overline{1, (n-1)},$$

где \vec{TL} – вектор удельных жесткостей полосы на растяжение в межклетевом промежутке между j -й и $(j+1)$ -й клетями, имеющий размерность $(n-1)$.

Толщина $H^*(j+1)$ полосы на входе $(j+1)$ клетки равна толщине $H(j)$ полосы на выходе j -й клетки с учетом времени транспортного запаздывания

$$H_i^*(j+1) = H_{i-k}(j) \text{ при } j = \overline{1, (n-1)},$$

где $k = INT(L_{j,(j+1)}/L_{\delta j})$ – целая часть числа, равного отклонению длины межклетевого промежутка $L_{j,(j+1)}$ между j -й и $(j+1)$ -й клетями от базовой длины $L_{\delta j}$ полосы в этом промежутке.

Математические модели главных электроприводов, приводов моталок, приводов петледержателей, электро- и гидроприводов нажимных устройств описываются в форме пространства состояний в виде соответствующих уравнений состояний, либо в виде соответствующих передаточных функций. Математические модели типовых П, ПД, ПИ и ПИД регуляторов, либо других регуляторов, отличных от типовых, также задаются в виде соответствующих уравнений состояний, либо в виде соответствующих передаточных функций. Количество используемых регуляторов не ограничено и задается проектировщиком. Таким образом, можно моделировать наличие любых регуляторов, описываемых в пространстве состояния, уравнением

$$\vec{x}_p(t) = A_p \vec{x}_p(t) + B_p \vec{U}_p(t),$$

в котором управляющим воздействием \vec{U}_p является любая переменная системы $\vec{y}(t)$, измеренная со случайной помехой $f(t)$ заданной интенсивности $\vec{U}_p(t) = \vec{y}(t) + \vec{f}(t)$, а выходом регулятора $y_p(t) = C_p \vec{x}_p(t)$ может быть управляющее напряжение $U_n(t)$ главного привода, петледержателя либо нажимного устройства $U_n(t)$ любой клетки.

Для формирования управления могут использоваться значения толщин полос в любой точке стана, а также значения натяжений полосы во всех межклетевых промежутках, что фактически соответствует управлению по полному вектору состояния, тем более, что в АСУ ТП прокатного стана фактически осуществляется сопровождение полосы по линии стана. Однако решить такую задачу практически невозможно в связи с высокой размерностью.

С инженерной точки зрения существенный практический смысл имеет задача параметрической оптимизации регуляторов, когда основная структура системы управления остается постоянной, а часть параметров, а возможно и структуры, изменяется и тем самым паритует изменение параметров внешних воздействий и объекта управления. При таком подходе можно синтезировать регуляторы, незначительно отличающиеся от оптимальных. Однако при этом их техническую реализацию можно существенно упростить. Такие регуляторы обладают и другими полезными свойствами, например, менее чувствительны (робастны) при изменении параметров и структуры объекта управления и входных сигналов.

Сформируем структуру многосвязанной системы автоматического регулирования толщины, натяжения и петли полосы на основании типовых схем для широкополосного стана горячей прокатки. Введем вектор искомым параметров \vec{X} , компонентами которого являются коэффициенты усиления регуляторов (П, ПИ, ПИД и т.д.) соответствующих каналов регулирования.

Изменения толщины и натяжения полосы являются случайными процессами. Основное назначение системы регулирования толщины, натяжения и петли широкополосного стана горячей прокатки заключается в поддержании заданных значений толщины полосы за прокатными клетями, межклетевых натяжений а также углов поворота петледержателей на заданных уровнях. Тогда критерием качества J может быть принята сумма дисперсий отклонений толщины полосы на выходе i -ых клеток $\Delta\bar{H}_i^2$ и дисперсий отклонений межклетевых натяжений $\Delta\bar{T}_i^2$ в промежутках между i -й и $(i+1)$ -й клетью, взятых с соответствующими весовыми коэффициентами

$$J = \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta\bar{H}_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \Delta\bar{T}_i^2 .$$

Здесь λ_i , γ_i – весовые коэффициенты, учитывающие различный "вес" составляющих дисперсий разнотолщинностей и дисперсий колебаний межклетевых натяжений относительно их заданных значений, а сами отклонения ΔH_i толщины полосы на выходе i -й клетки H_i от заданного значения H_i^3 и отклонения натяжений ΔT_i в промежутках между i -й и

$(i+1)$ -й клетью $T_{i,i+1}$ от заданных значений $T_{i,i+1}^3$ являются случайными процессами и определяются выражениями:

$$\Delta H_i = H_i - H_i^3, \quad \Delta T_i = T_i - T_i^3.$$

Тогда задача синтеза системы может быть сформулирована в виде следующей задачи нелинейного программирования.

$$\bar{X}^* = \arg \min_{\bar{X}} J(\bar{X}).$$

Естественно, что при этом необходимо учитывать ограничения на переменные состояния и управления отдельных каналов регулирования.

Результаты моделирования. В качестве примера на рис. 2 показаны реализации случайных изменений продольной разнотолщинности и межклетевых натяжений в синтезированной системе для трех клеток широкополосного стана горячей прокатки.

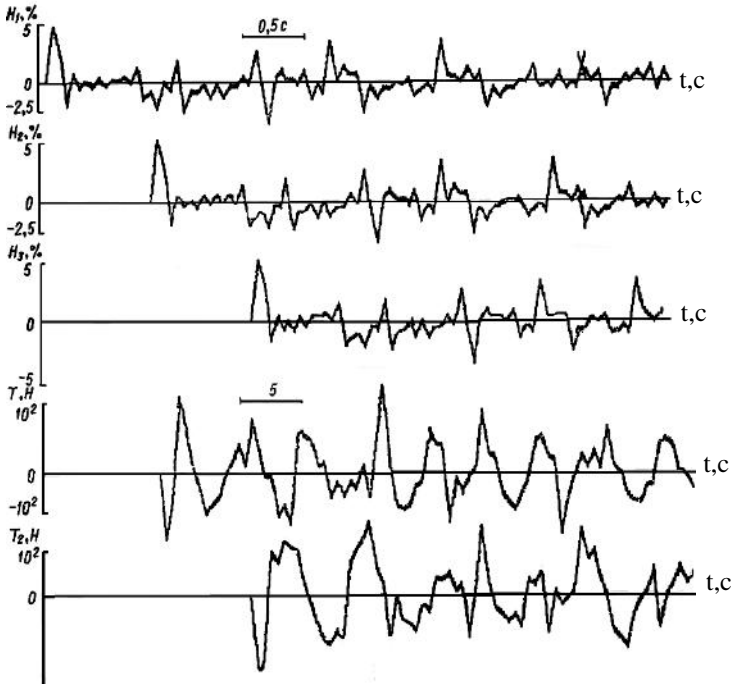


Рис. 2. Реализации случайных изменений продольной разнотолщинности и межклетевых натяжений в синтезированной системе для трех клеток широкополосного стана горячей прокатки

Как видно из этих графиков, случайные процессы регулируемых координат в синтезированной системе удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системе. Заметим, что в критерий качества явно не входят угловые положения петледержателей, однако минимизация дисперсий межклетевых натяжений фактически приводит и к минимизации дисперсий отклонений углов положения петледержателей от их заданных значений.

Выводы. Разработана математическая модель многоклетевого стана горячей прокатки как объекта управления системы автоматического регулирования толщины, натяжения и петли полосы широкополосного стана горячей прокатки. Синтезированы оптимальные регуляторы, с помощью которых минимизируется критерий качества, включающий дисперсии продольной разнотолщинности и дисперсии отклонений натяжения полосы в межклетевых промежутках от их номинальных значений. Рассчитаны реализации случайных изменений продольной разнотолщинности и межклетевых натяжений широкополосного стана горячей прокатки. С помощью синтезированных регуляторов удалось получить динамические характеристики системы, удовлетворяющие техническим требованиям, предъявляемым к системе регулирования толщины, натяжения и петли полосы широкополосного стана горячей прокатки. В дальнейшем целесообразно дополнить разработанную модель уравнениями поперечной разнотолщинности, профиля и формы полосы.

Список литературы: 1. Hamada K., Ueki S., Shitomi M. Finishing mill tension control system in the Mizushima hot strip mill // Kawasaki steel technical report. – 1985. – № 11. – P. 35-43. 2. Tanimoto S., Hayashi Y., Saito M. New tension measurement and control system in hot strip finishing mill // Meas. And Contr. Instrum. Iron and Steel Ind. Prod. 5th Process Technical Congress, Detroit / Werrendale, Pa. – 1985. – P. 147-154. 3. Fukushima Kenya. Looper optimal multivariable control for hot strip finishing mill // Trans. Iron and Steel Inst. Jap. – 1988. – № 6. – P. 463-469. 4. Олефир Ф.Ф., Опрышко И.А., Васичкин В.И., Жалнина Д.Ф. Исследование взаимосвязанной работы САР скорости и натяжения полосы / Анализ систем управления станов горячей прокатки. – К.: Наукова думка, 1970. – 175 с. 5. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с. 6. Кузнецов Б.И., Опрышко И.А., Богдаенко И.Н. Автоматизация управления листовыми прокатными станами. – К.: Техника, 1992. – 231 с.

УДК 621.3.01

Синтез системи регулювання товщини, натягу і петлі смуги ширококутового стана гарячої прокатки / Балюта С.Н. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 13. – С. 3 – 13.

Синтезовані оптимальні регулювальники, за допомогою яких мінімізується критерій якості, що включає дисперсії подовжньої різновщинності і дисперсії відхилень натягнення смуги в проміжках між клітей від їх номінальних значень. Розраховані реалізації випадкових змін подовжній різновщинності і натягнень міжклітей ширококутового стану гарячої прокатки. Іл.: 2. Бібліогр.: 6.

Ключові слова: ширококутовий стан гарячої прокатки, система регулювання.

UDK 621.3.01

Control system synthesis by thickness, tension and looper for hot strip finishing mill
/ Baluta S.N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2009. – №. 13. – P. 3 – 13.

Optimum regulators, which the criterion of quality, including dispersions of longitudinal different thickness and dispersion of rejections of pull of bar in interstage intervals from their basic values, is minimized by, are synthesized. Realization of casual changes longitudinal different thickness and interstage pulls of interstage intervals of hot rolling is expected. Figs. 2. Refs.: 6 titles.

Key words: hot strip finishing mill, control system.

Поступила в редакцию 14.02.2009