

*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.

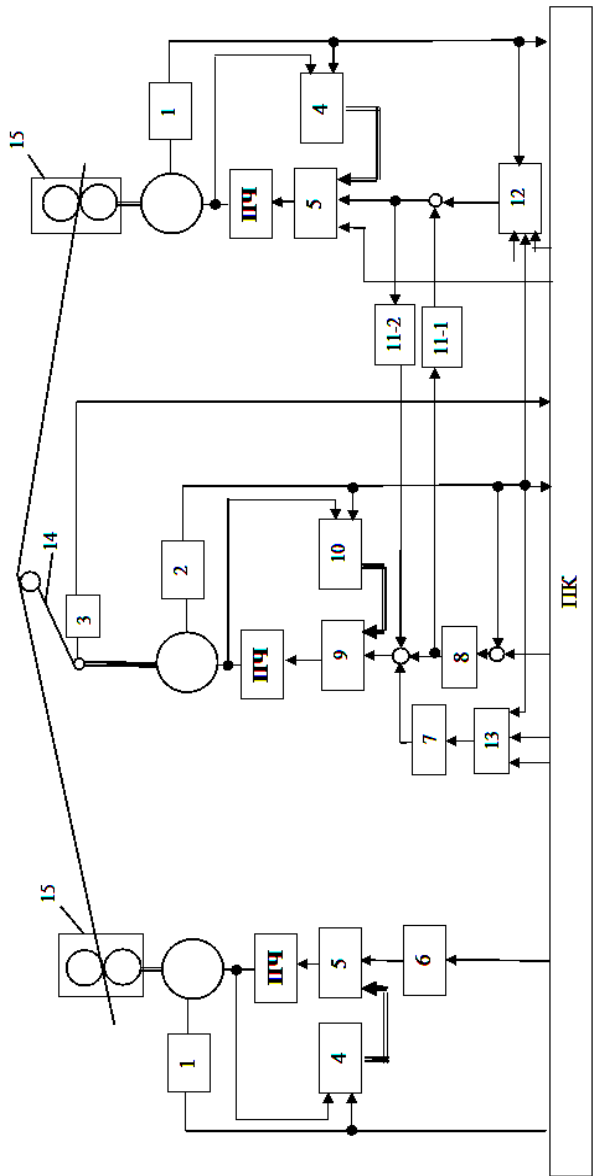


Рис. 1. Схема системы регулирования натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки

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  $\alpha_u$  и удельного натяжения  $\sigma_u$  для данного межклетевого промежутка. Величина заданного угла подъема петледержателя  $\beta_u$  сравнивается со значением фактического угла  $\beta$ , 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 поддержание 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  $\Delta h_1$ , полного усилия  $\Delta P$  и момента  $\Delta M$  прокатки, а также приращение величины опережения  $\Delta S$ , 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  $\Delta h_0$ ,  $\Delta T_0$ ,  $\Delta T_1$ ,  $\Delta z_0$ ,  $\Delta \sigma_T$ ,  $\Delta f$  – 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 многоклетевого 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

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

где  $\overline{HN}$ ,  $\overline{HT}^*$ ,  $\overline{HT}$ ,  $\overline{HB}$  – 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

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

где  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{v\omega}$  – векторы скорости вращения приводных валков и окружности бочки;  $\vec{vS}$  – 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  $k = INT(L_{j \cdot (j+1)} / L_{\delta j})$  – 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  $\lambda_i$ ,  $\gamma_i$  – весовые коэффициенты, учитывающие различный "вес" составляющих дисперсий разнотолщинностей и дисперсий колебаний межклетевых натяжений относительно их заданных значений, а сами отклонения  $\Delta H_i$  толщины полосы на выходе  $i$ -й клетки  $H_i$  от заданного значения  $H_i^3$  и отклонения натяжений  $\Delta T_i$  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.

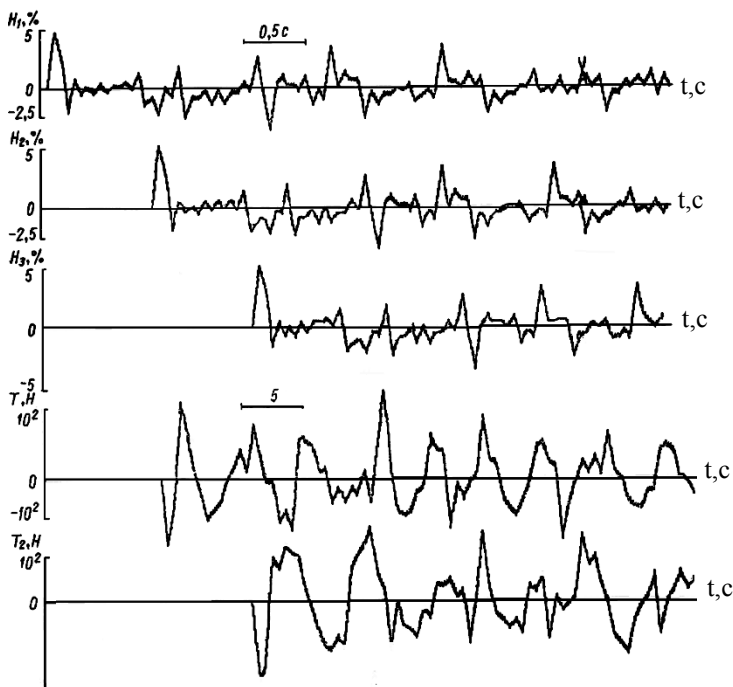


Рис. 2. Реализации случайных изменений продольной разнотолщинности и межклетевых натяжений в синтезированной системе для трех клеток широкополосного стана горячей прокатки

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. 5<sup>th</sup> 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., Богаенко И.Н.* Автоматизация управления листовыми прокатными станами. – К.: Техника, 1992. – 231 с.