



Головний редактор  
к.т.н. В.М. Божко (м. Київ)

Заступник головного редактора:  
д.т.н. ФРН М.А. Денисенко (м. Київ)

Члени редакційної колегії:

- д.т.н. І.М. Богаєнко (м. Київ)
- д.т.н. Г.Я. Вагін (м. Нижній Новгород, Росія)
- д.т.н. І.В. Волков (м. Київ)
- д.т.н. І.В. Жежеленко (м. Маріуполь)
- д.т.н. В.Г. Кузнецов (м. Київ)
- д.т.н. А.В. Праховник (м. Київ)
- д.т.н. Б.С. Рогальський (м. Вінниця)
- д.т.н. О.С. Яндульський (м. Київ)
- к.т.н. Д.Б. Банін (м. Київ)
- к.т.н. С.В. Божко (м. Київ)
- к.т.н. В.О. Пнаило (м. Київ)
- к.т.н. С.М. Пересада (м. Київ)
- к.в.н. А.П. Пушкар (м. Київ)
- к.т.н. С.Я. Межанин (м. Київ)
- к.т.н. В.І. Мозирський (м. Київ)
- к.т.н. Е.П. Островський (м. Київ)
- к.т.н. Д.Й. Розинський (м. Київ)
- Б.П. Біда (м. Київ)
- Л.Т. Вінниченко (м. Київ)
- Ю.С. Громадський (м. Київ)
- С.В. Федоров (м. Київ)
- В.Б. Ямпольський (м. Київ)

Технічний редактор:  
Н.М. Музиченко (м. Київ)

Засновник та видавець:  
ТОВ "Проектний інститут "Київпром-  
електропроект", ТОВ "ЕПІН"

Адреса редакції:  
02580, м. Київ-2, вул. М. Раскової, 21  
Тел./факс (044) 517-40-98  
E-mail: epin@krep.kiev.ua;  
promelectro@blgmlr.net;  
www.krep.com.ua

Оригінал-макет та друк  
ТОВ "ДІА"  
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45  
тел./факс. (044) 455-91-52  
E-mail. dla@onconet.kiev.ua

За достовірність інформації та рекламні відповідальність несуть автори та рекламодавці.  
Редакція може не поділяти точку зору авторів статей. Редакція зберігає за собою право редагувати і скорочувати зміст статей.  
Надслані матеріали не повертаються. Передрук та використання матеріалів можливе тільки з письмового дозволу редакції.  
Наукові статті зберігаються як факсові згідно з постановою президії ВАК України №4-05/07 від 03.06.2004 р.

№5

## ЗМІСТ

### 3 НОВЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

- 3 Денисенко М.А., Козаченко О.Б., Лосицький Ю.Є.  
Застосування багатифункціональних адаптивних фільтро-компенсуючих пристроїв в електрометалургії
- 12 Бовдан Савченко  
Гарантия на сухие трансформаторы Trihal от Schneider Electric увеличена до 3-х лет
- 14 Манилов А.М.  
Всегда ли необходима установка ограничителей перенапряжений в сетях 6, 10 кВ?

### 16 НАУКОВІ РОЗРОБКИ

- 16 Терешкевич Л.Б., Червінська Т.М.  
Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі
- 21 Йовбак В.Д., Балота С.Н., Богавенко І.Н.  
Система управління петледержателем для широкополосного стану горячий прокатки
- 29 Грицюк Ю.В., Петухов М.В., Ровальський Б.С., Штоарци С.А.  
Модифікація систем керування статичними тиристорними компенсаторами для забезпечення оптимальних режимів роботи
- 35 Курис Ю.В., Ткаченко С.И.  
Анализ эффективности мирового энергетического и экологического использования биомассы

### 41 НАУКА ВИРОБНИЦТВУ

- 41 Слынько В.М.  
Опыт сертификации системы управления качеством на электротехническом предприятии
- 46 Гинайло В.А., Гинайло А.В., Нагуга П.Р., Танкевич Е.Н.  
Зачем нужны автоматизированные системы учета электроэнергии?

### 56 ЗАПИТАННЯ-ВІДПОВІДІ

- 56 Городиський І.М.  
Стосовно „Правила приєднання електроустановок до електричних мереж“



УДК 621.771.23-413

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕТЛЕДЕРЖАТЕЛЕМ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Йовбак В.Д., канд. техн. наук,

Балюта С.Н., канд. техн. наук,

Богаенко И.Н., докт. техн. наук, проф., Научно-производственная корпорация  
«Киевский институт автоматики»

## ВВЕДЕНИЕ

Петледержатели, расположенные между клетями на стане горячей прокатки полосы, выполняют, по крайней мере, две важных функции:

- предотвращают изменения полосы по ширине и толщине, регулируя межклетевое натяжение в желательном диапазоне значений;
- предотвращают изменение петли между клетями и обеспечивают устойчивое вращение двигателей главных приводов клеток, поддерживая заданное значение угла петледержателя.

Дополнительные возмущения в системе петледержателя обуславливаются увеличивающимся использованием низкотемпературного нагрева слябов, высокоуглеродистых сталей и высоких скоростей прокатки. Кроме того, значительно возрастают требования к точности размеров полосы: толщина, ширина, края полосы. Поэтому важно разработать систему управления петледержателем с высокими рабочими характеристиками. Наиболее важная проблема управления петледержателем состоит в том, чтобы одновременно достигнуть управления углом петледержателя и натяжением, которые имеют взаимное влияние друг на друга.

Управление петледержателем включает:

- 1) управление натяжением, которое осуществляет контроль тока двигателя петледержателя и, таким образом, косвенное поддержание заданного значения натяжения полосы;
- 2) управление углом петледержателя, которое состоит в поддержании заданного значения угла петледержателя регулированием частоты вращения главного приводного двигателя прокатной клетки.

Однако, достаточная точность регулирования с помощью традиционной системы управления [1] не была достигнута из-за трудностей уменьшения взаимного влияния регулирования натяжения и угла петледержателя (величины петли полосы) и прояв-

ления явлений резонанса в механической системе петледержателя.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Системы автоматического регулирования натяжения и петли можно условно разделить:

**по способу регулирования:**

- косвенное регулирование удельного натяжения;
- прямое регулирование удельного натяжения;

**по типу используемого петледержателя:**

- с электромеханическим петледержателем;
- с редукторным приводом;
- с безредукторным приводом; с гидравлическим петледержателем;
- с пневматическим петледержателем;
- без петледержателя (системы регулирования удельного натяжения в первых межклетевых промежутках чистовой группы толстолистовых станов).

Опыт создания системы регулирования удельного натяжения и петли с использованием петледержателей с редукторным приводом обнаружил следующие существенные недостатки [1], затруднившие использование их для регулирования натяжения:

- большая величина потерь на трение в редукторе петледержателя, обуславливающая значительные погрешности в натяжении;
- значительный момент инерции, не позволяющий оперативно следить за нарушением секундного объема металла в межклетевом промежутке.

Стремление устранить эти недостатки привело к разработке новых конструкций петледержателей, усовершенствованию их привода и систем регулирования натяжения.

Петледержатели с гидравлическим приводом лишены указанных выше недостатков, причем, их принципиальная особенность заключается в формировании такого закона изменения момента петледержателя в

функции угла подъема, при котором обеспечивается постоянство статического натяжения при изменении высоты подъема петледержателя над линией прокатки [2]. Такие петледержатели в отечественной литературе стали называть безразличными, имея в виду независимость натяжения в статике от угла подъема петледержателя. Однако несовершенство конструкции гидропривода петледержателей, сложность их эксплуатации вынудили искать другие пути решения задачи [3], [4].

Создание современных систем регулирования удельного натяжения и петли (САРН) проводится по следующим направлениям [5]:

1. Преимущественное применение электро-механических петледержателей с безредукторным приводом и улучшенными динамическими показателями электродвигателей.
2. Использование для регулирования натяжения сигналов силоизмерительных устройств, встроенных в конструкцию петледержателя.
3. Применение микропроцессорных средств управления.

Одной из перспективных САРН является, система прямого регулирования натяжения с использованием статических силоизмери-

тельных датчиков [6], [11]. К принципиальным преимуществам такой системы относятся простота и малая стоимость оборудования по сравнению с системой, использующей петледержатели с приводом.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Структурная схема системы управления представлена на рис. 1. Контроллер управления включает главные контроллеры (КРН — контроллер натяжения, создаваемого петледержателем, и КРП — контроллер высоты петли) и контроллеры перекрестных связей (КПС). Перекрестные контроллеры компенсируют возмущения, обусловленные регулированием основных параметров — натяжения и высоты петли.

Построение предлагаемой системы автоматического регулирования натяжения выполнено по принципу прямого регулирования координат: по натяжению и высоте петли (углу петледержателя).

Система регулирования натяжения состоит из внешнего контура регулирования натяжения (контроллер КРН) и подчиненного контура регулирования скорости прокатной клети с регулятором состояния (ЗКРС) [7]. Система регулирования петли состоит из регулятора положения петледержателя (контроллер КРП) и подчиненного контура регулирования скорости петледержателя

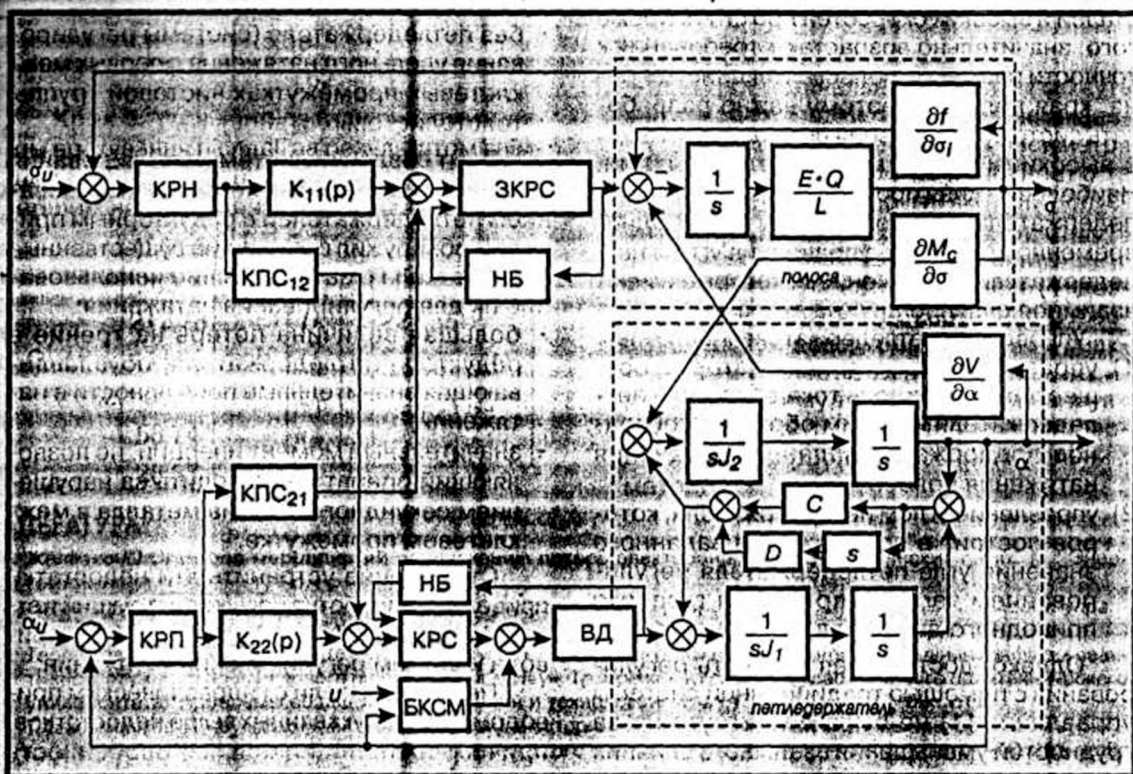


Рис. 1. Структурная схема регулирования натяжения и петли полосы

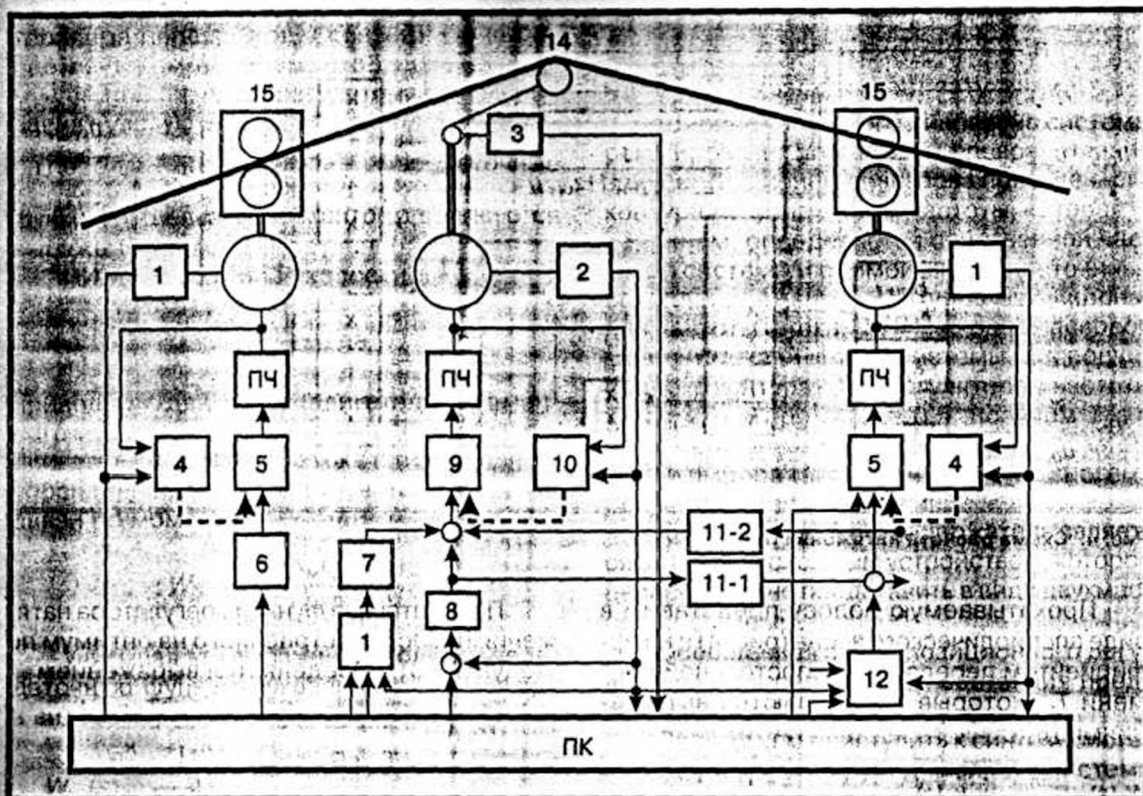


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического регулирования натяжения и петли полосы:  
1 — датчик частоты двигателя прокатной клетки; 2 — датчик угла петледержателя; 3 — датчик натяжения полосы; 4 — наблюдатель состояния привода клетки; 5 — регулятор состояния скорости двигателя клетки; 6 — ПИ регулятор скорости; 7 — контроллер компенсации статического момента; 8 — регулятор положения петледержателя; 9 — регулятор состояния скорости петледержателя; 10 — наблюдатель состояния петледержателя; 11 — контроллер перекрестных связей; 12 — регулятор натяжения; 13 — блок расчета статического момента петледержателя; 14 — петледержатель; 15 — прокатная клетка; ПЧ — преобразователь частоты.

с регулятором по переменным состояниям (КРС). Между системами существует взаимное влияние, которое выражается в изменении статического момента на валу двигателя петледержателя при изменении натяжения и изменении скорости движения петледержателя, которое в свою очередь оказывает влияние на удельное натяжение в зависимости от положения петледержателя.

Указанное взаимное влияние между каналами регулирования компенсирует-

ся с помощью микроконтроллеров перекрестных связей ( $K_{12}$  и  $K_{21}$ ). Функциональная схема системы управления представлена на рис. 2. Для синтеза параметров контроллера регулирования натяжения (КРН) используем структурную схему на рис. 3.

Внешним контуром в разрабатываемой системе является замкнутый контур регулирования удельного натяжения с воздействием на скорость клетки.

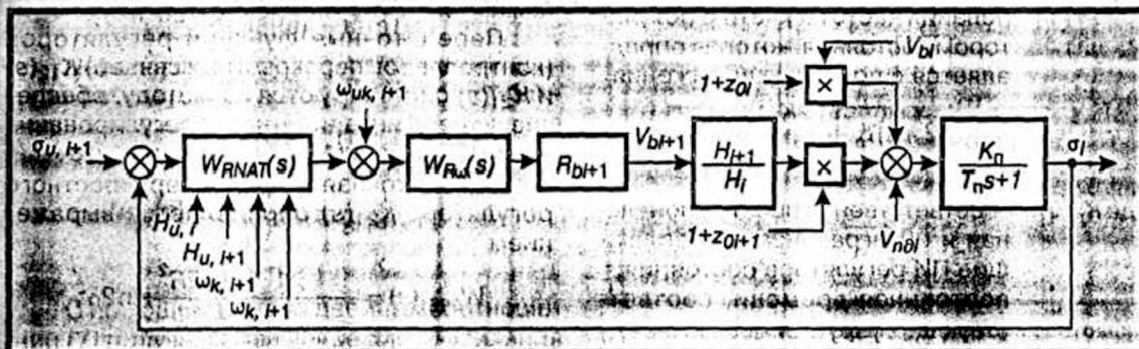


Рис. 3. Структурная схема САУ удельного натяжения с воздействием на скорость прокатной клетки

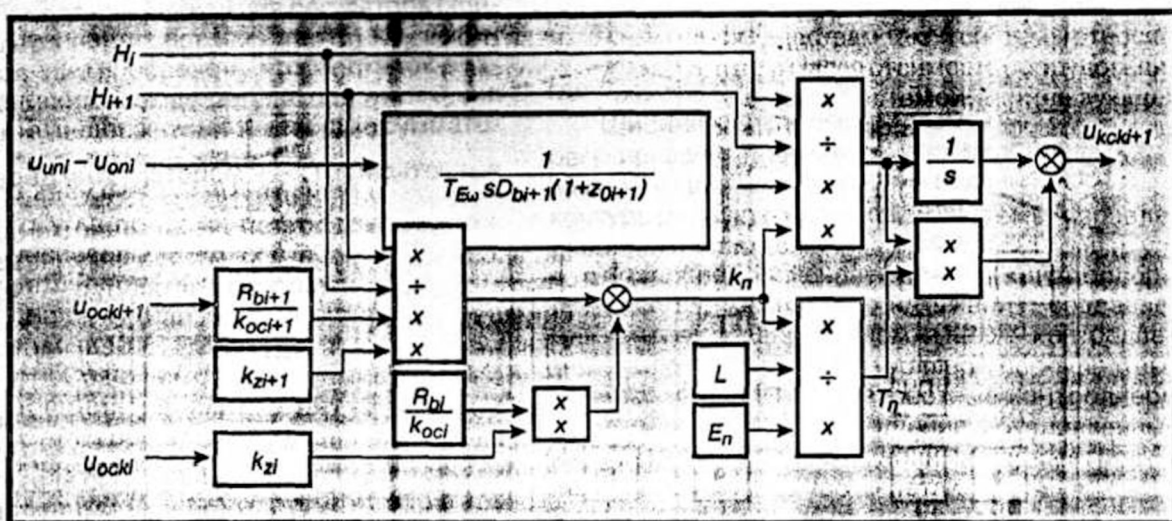


Рис. 4. Схема расчета натяжения полосы

Прокатываемую полосу представим в виде аperiодического звена (рис. 4) с коэффициентом передачи  $k_n$  и постоянной времени  $T_n$ , которые определяются выражениями [8]:

$$W_n(s) = \frac{k_n}{1 + sT_n}; \quad k_n(s) = \frac{1}{\omega_{bi} R_{bi} k_{zi} + \omega_{bi+1} R_{bi+1} k_{zi+1}}$$

$$T_n(s) = k_n \frac{L}{E_n} = \frac{L}{(\omega_{bi} R_{bi} k_{zi} + \omega_{bi+1} R_{bi+1} k_{zi+1}) E_n}$$

где  $\omega_{bi}$  — частота вращения  $i$ -го валка;  
 $R_{bi}$  — радиус валка;  
 $k_{zi}$  — коэффициент опережения;  
 $L$  — длина пролета между клетями;  
 $E_n$  — модуль упругости материала полосы.

Передаточная функция замкнутого контура регулирования скорости клетки с ПИ регулятором состояния представляется аperiодическим звеном [9]

$$W_{rw}(s) = \frac{\omega_L(s)}{\omega_U(s)} = \frac{1}{1 + sT_{Ew}}$$

где  $T_{Ew}$  — эквивалентная постоянная времени замкнутого контура регулирования частоты клетки с регулятором состояния, которая определяется с помощью выражения

$$T_{Ew} = (\sqrt{2} + 1) T_p + \frac{2K_p}{K_p^2 + 1} T_c,$$

где  $K_p$ ,  $T_p$  — соответственно пропорциональная и интегральная составляющие ПИ регулятора состояния;  
 $T_c$  — постоянная времени, соответствующая упругости связи между приводным двигателем и нагрузкой (валками прокатной клетки).

Передаточная функция регулятора натяжения полосы, настроенного на оптимум по модулю [10], определяется выражением

$$W_{pn}(s) = \frac{2}{T_{Ew} s R_{bi+1} k_{zi+1}} \frac{T_{ni} s + 1}{H_{i+1} / H_i} \frac{1}{k_n}$$

Таким образом, параметры указанного регулятора зависят от скоростей валков на входе  $\omega_{bi}$  и выходе  $\omega_{bi+1}$  из межклетевого промежутка и толщины прокатываемого металла на входе  $H_i$  и выходе  $H_{i+1}$  ( $i+1$ -ой прокатной клетки).

Алгоритм управления предполагает расчет уставок для исполнительной автоматики в микроконтроллере на основании сигналов, поступающих с датчиков скорости прокатных клеток и толщины прокатываемого металла, установленных в чистой группе стана при учете изменения указанных величин [8].

### СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ (МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ) ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ

Передаточные функции регуляторов (микроконтроллеров)  $K_{11}(s)$  и  $K_{22}(s)$  принимаются равными единице [11].

Передаточные функции регуляторов (контроллеров перекрестных связей)  $K_{12}(s)$  и  $K_{21}(s)$  синтезируются по методу, обеспечивающему инвариантность регулирования по возмущению [12].

Передаточная функция перекрестного регулятора  $K_{21}(s)$  определяется выражением

$$W_{PR21}(s) = \frac{1}{R_b(1 + z_{0i})} \frac{2R^2}{H_i / H_0} \frac{1}{L} \sin 2\alpha,$$

где  $R$  — радиус ролика петледержателя.

Передаточная функция регулятора (контроллера перекрестных связей)  $K_{12}$  выбирается таким образом, чтобы скачок возмущения на выходе регулятора натяжения давал нулевую реакцию на выходе сумматора перед интегратором  $\frac{1}{sI_1}$ . Передаточные

функции отдельных элементов описываются выражениями, соответственно:

ПИ — регулятора скорости:

$$W_{PIS} = \frac{r_p(sT_R + 1)}{sT_R}, \text{ где } T_R = \frac{1}{r_i};$$

приводного двигателя (двигателя переменного тока с векторным управлением ( $i_q$ ) или двигателя постоянного тока с тиристорным управлением ( $i_q = i_a$ )) и с учетом обратной связи по моменту:

$$W_D = \frac{K_M i_q}{sT_\Sigma + (r_M + 1)}.$$

Учитывая эти выражения, получим передаточную функцию указанного регулятора в виде:

$$W_{12}(s) = \frac{s^2 T_R T_\Sigma + s T_R (r_M + 1)}{s^2 T_{Ew} T_R + s(T_R + T_{Ew}) + 1} \times \frac{R_M (1 + z_{01+1}) H_{1+1}}{K_M i_q L} \frac{k_n}{sT_n + 1} 2R^2 B H_i \sin 2\alpha,$$

где  $B$  — ширина полосы;

$r_M$  — коэффициент обратной связи регулятора состояния по моменту.

### СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕНИЯ ПЕТЛЕДЕРЖАТЕЛЯ

Для определения параметров П-регулятора (рис. 5) подчиненный контур регулирования скорости в переменных состоянии аппроксимируется звеном  $PT_1$ ; при этом полином знаменателя передаточной функции замкнутого контура регулирования частоты  $W_{Ww}(s)$  обрывают на линейном члене:

$$W_{Ww}(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_u(s)} = \frac{1}{1 + sT_{Ew}}.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования положения с приближенным описанием контура регулирования частоты описывается выражением

$$W_{W\theta}(s) = \frac{\alpha(s)}{\alpha_u(s)} = \frac{1}{1 + \frac{s(1 + sT_{Ew})}{K_{pos}}}.$$

С помощью метода двойных соотношений [7] получим выражение для П-усиления регулятора положения:

$$K_{npos} = \frac{D_{pos}}{T_{Ew}},$$

где  $D_{pos}$  — коэффициент затухания.

Ширина частотного диапазона системы регулирования положения непосредственно зависит от ширины диапазона подчиненного контура регулирования частоты, которая, в основном, определяется собственной частотой системы и суммой малых постоянных времени элементов контуров регулирования частоты и тока. В случае одномассовой модели механической системы для подчиненного контура с ПИ-регулятором частоты  $T_{Ew} = 4T_\Sigma$  и при  $D_{pos} = 0,5$ , получим  $T_{E\theta} = 2T_{\Sigma w}$ , что допускает влияние регулирования тока и выбора тактовой частоты на систему регулирования положения.

Конструктивно петледержатель является остаточным сложным устройством, которое целесообразно представить в виде двухмассовой системы.

Обобщенная схема позиционного регулирования в переменных состоянии представлена на рис. 6.

Прежде чем приступить к синтезу системы регулирования, убедимся, что система главного привода, которая характеризуется матрицей управления [12]

$$Q_K = [B \ A \ B \ \dots \ A^{n-1} \ B],$$

удовлетворяет критерию управляемости:

$$\text{rank}(Q_K) = n.$$

Запишем уравнение состояния системы в общем виде, где переменные заменяются физическими величинами

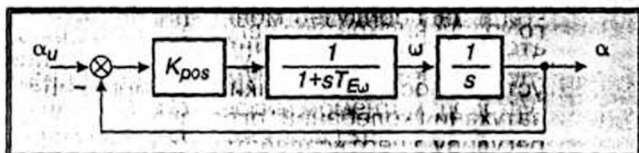


Рис. 5. Схема замкнутого контура регулирования положения петледержателя

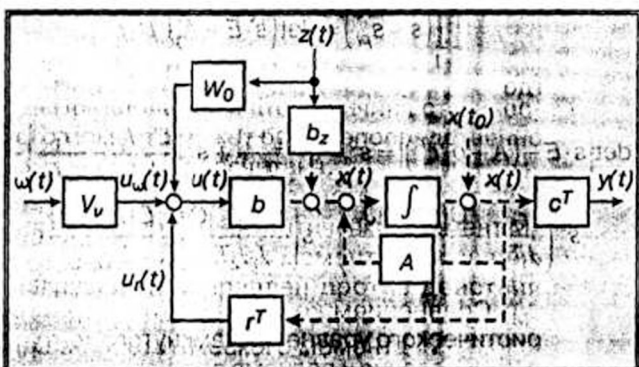


Рис. 6. Обобщенная схема регулятора состояния с возмущением и блоком компенсации

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + b \cdot u(t) - b_2 \cdot z(t); \quad y(t) = c^T \cdot x(t);$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \vartheta_M \\ \omega_L \\ \alpha \\ M_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{C}{J_1} & 0 & \frac{C}{J_1} & \frac{1}{J_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{J_2} & 0 & -\frac{C}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \vartheta_M \\ \omega_L \\ \alpha \\ M_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot M_c(t);$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \cdot [\omega_M \ \vartheta_M \ \omega_L \ \alpha \ M_M(t)]^T;$$

где  $J_1$  — момент инерции приводного двигателя;

$J_2$  — момент инерции нагрузки (петледержателя);

$\omega_M$  — частота вращения двигателя;

$\omega_L$  — частота вращения нагрузки (петледержателя);

$\vartheta_M$  — угол поворота ротора двигателя;

$\alpha$  — угол петледержателя;

$M_M(t)$  — момент двигателя;

$C$  — коэффициент упругости жесткой связи между двигателем и нагрузкой (петледержателем);

$M_c(t)$  — момент сопротивления.

Синтез регулятора состояния производим путем задания полюсов передаточной функции, используя характеристическое уравнение регулятора состояния [12]. Параметры регулятора состояния  $r_x$  рассчитываются путем сравнения характеристического полинома замкнутого контура системы регулирования, полученного путем задания его полюсов  $s_{p1}, \dots, s_{pn}$  и характеристического уравнения контура регулирования с регулятором состояния, с учетом требований устойчивости, динамики регулирования и затухания колебаний, ограничения уставки регулирующего воздействия, а также нечувствительности к изменению параметров объекта регулирования:

$$\prod_{i=1}^5 (s - s_{pi}) = \det(s \cdot E - A + B \cdot r^T);$$

где

$$\det[s \cdot E - (A + b \cdot r^T)] = s^5 - s^4 \frac{r_5 - 1}{T_\Sigma} + s^3 \left( \frac{C \cdot J_\Sigma}{J_1 J_2} - \frac{r_1}{J_1 T_\Sigma} \right) - s^2 \left( \frac{r_2}{J_1 T_\Sigma} - \frac{C(r_5 - 1) J_\Sigma}{J_1 J_2 T_\Sigma} \right) - s \left( \frac{(r_1 + r_3) C}{J_1 J_2 T_\Sigma} \right) - \frac{C(r_4 + r_2)}{J_1 J_2 T_\Sigma}.$$

Сравнением коэффициентов характеристического уравнения замкнутого контура регулирования и полинома получают аналитические выражения для вычисления элементов вектора обратной связи  $r$  в виде

$$r = \begin{bmatrix} r_{\omega_M} \\ r_{\vartheta_M} \\ r_{\omega_L} \\ r_\alpha \\ r_{M_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_1 J_2 \left[ \frac{\sqrt{2} + 1}{T_p^2} + \frac{2K_p(\sqrt{2} + 1)}{T_p T_c} + \frac{K_p^2 + 1}{T_c^2} + \frac{C \cdot J_\Sigma}{J_1 J_2} \right] \\ J_1 T_\Sigma \left[ \frac{2(\sqrt{2} + 1) K_p}{T_c T_p^2} - \frac{(K_p^2 + 1)(\sqrt{2} + 1)}{T_c^2 T_p} - \frac{1}{T_p^3} + \frac{C(r_{M_M} - 1) J_2}{J_1 J_2 T_\Sigma} \right] \\ - \frac{J_1 J_2 T_\Sigma}{C} \left[ \frac{(\sqrt{2} + 1)(K_p^2 + 1)}{T_p^2 T_c^2} + \frac{2K_p}{T_c T_p^2} \right] - r_{\omega_M} \\ \frac{J_1 J_2 T_\Sigma}{C} \cdot \frac{K_p^2 + 1}{T_p^3 T_c^2} - r_{\vartheta_M} \\ \left( \frac{\sqrt{2} + 1}{T_p} + \frac{2K_p}{T_c} \right) T_\Sigma - 1 \end{bmatrix}$$

где  $T_p$  и  $K_p$  — соответственно постоянная времени и коэффициент затухания колебаний в системе, задаваемые с помощью полюсов системы.

### СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕТЛЕДЕРЖАТЕЛЯ

Для измерения угла поворота петледержателя  $\vartheta_L(t)$  применяют измерительные устройства различной конструкции. Однако от измерения скорости вращения петледержателя  $\omega_L(t) = \dot{\alpha}(t)$  очень часто отказываются в виду стоимостных причин; при этом частота вращения приблизительно рассчитывается с помощью отношения

$$\omega_L(t) = \dot{\alpha}(t) = \frac{\Delta \alpha(t)}{\Delta t}.$$

Однако, такое приближение определения скорости приводит к ограничениям качества регулирования.

Момент приводного двигателя (переменного и постоянного тока) можно рассчитать, исходя из известного тока якоря двигателя постоянного тока или фазного тока двигателя переменного тока с помощью выражения

$$M_M(t) = K_M I_s(t),$$

где  $K_M$  — конструктивная постоянная машины.

При регулировании положения петледержателя в переменных состояниях измеряется положение петледержателя, а скорость петледержателя, скорость ротора двигателя и момент вращения двигателя определяются с помощью наблюдателя состояния.

Момент нагрузки, обусловленный натяжением полосы, ее весом, изгибом, а также трением, измеряется с помощью соответствующего датчика. Для обеспечения необходимого натяжения полосы и динамики регулирования петли полосы применяют



блок компенсации момента, создаваемого полосой.

Синтез наблюдателя петледержателя производим посредством задания полюсов характеристического уравнения. Система линеаризованных уравнений в переменных состояния для позиционирования петледержателя имеет вид

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + b \cdot u(t); \quad y(t) = c^T \cdot x(t);$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \vartheta_M \\ \omega_L \\ \alpha \\ M_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{C}{J_1} & 0 & \frac{C}{J_1} & \frac{1}{J_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{J_2} & 0 & -\frac{C}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_M \\ \vartheta_M \\ \omega_L \\ \alpha \\ M_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \cdot u(t);$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \cdot [\omega_M \ \vartheta_M \ \omega_L \ \alpha \ M_M(t)]^T = \vartheta_L(t).$$

При расчете наблюдателя предполагаем, что параметры объекта регулирования известны:  $\hat{A} = A$ ;  $\hat{b} = b$ .

Уравнение в переменных состояния для наблюдателя имеет вид

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = \hat{A} \cdot \hat{x}(t) + \hat{b} \cdot u(t) + l \cdot c^T (\hat{x}(t) - \hat{y}(t)) =$$

$$= \hat{A} \cdot \hat{x}(t) + \hat{b} \cdot u(t) + l \cdot (y(t) - \hat{y}(t)); \quad \hat{y}(t) = c^T \cdot \hat{x}(t);$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_M \\ \hat{\vartheta}_M \\ \hat{\omega}_L \\ \hat{\alpha} \\ \hat{M}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{C}{J_1} & 0 & \frac{C}{J_1} & \frac{1}{J_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{J_2} & 0 & -\frac{C}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_M \\ \hat{\vartheta}_M \\ \hat{\omega}_L \\ \hat{\alpha} \\ \hat{M}_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_\Sigma} \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \end{bmatrix} \cdot (y(t) - \hat{y}(t));$$

$$\hat{y}(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \cdot [\hat{\omega}_M \ \hat{\vartheta}_M \ \hat{\omega}_L \ \hat{\alpha} \ \hat{M}_M(t)]^T = \hat{\alpha}(t).$$

Управляющий сигнал  $u(t)$  формируется из задаваемой величины  $u_H(t)$  и обратных связей по переменным состояния  $u_r(t)$ :

$$u(t) = [r_{\omega_M} \ r_{\vartheta_M} \ r_{\omega_L} \ r_{\alpha} \ r_{M_M}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega}_M(t) \\ \hat{\vartheta}_M(t) \\ \hat{\omega}_L(t) \\ \hat{\alpha}(t) \\ \hat{M}_M(t) \end{bmatrix} + v_W \alpha(t).$$

Проверяем наблюдаемость системы:

$$Q_H = [C \ CA \ \dots \ CA^{n-1}]$$

$$\text{rank}(Q_H) = n.$$

Характеристическое уравнение для наблюдателя в переменных состояния имеет вид

$$\det [s \cdot E - (A - 1 \cdot c^T)].$$

Синтез наблюдателя проводим путем задания его полюсов наблюдателя с использованием теоремы раздельности [12]. При этом нужно обращать внимание на то, что динамика наблюдателя должна быть выше, чем динамика регулятора. Это обеспечивается заданием полюсов наблюдателя левее от полюсов, задаваемых регулятором при синтезе регулятора состояния.

Решая характеристическое уравнение, получаем значения вектора обратной связи полного наблюдателя в аналитическом виде:

$$l = \begin{bmatrix} l_{\omega_M} \\ l_{\vartheta_M} \\ l_{\omega_L} \\ l_{\alpha} \\ l_{M_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{J_2}{C} \left[ \frac{(K_n^2 + 1)(\sqrt{2} + 1)}{T_n^2 T_c^2} + \frac{2K_n}{T_n^3 T_c} - \frac{C}{J_2 T_\Sigma} \right] \cdot l_{\omega_M} + \frac{C}{J_1} l_{\vartheta_M} + \frac{C}{J_1 T_\Sigma} l_{\alpha} \\ \frac{J_2}{C} \left[ \frac{1}{T_n} \left( \frac{\sqrt{2}(\sqrt{2} + 1) \cdot K_c}{T_n T_c} + \frac{(\sqrt{2} + 1)(K_n^2 + 1)}{T_c^2} - \frac{1}{T_n} \right) - \frac{l_{\omega_M}}{T_\Sigma} - \frac{C}{J_1} l_{\alpha} - \frac{C J_\Sigma}{J_1 J_2 T_\Sigma} \right] \\ \frac{2K_n(\sqrt{2} + 1)}{T_n T_c} + \frac{(\sqrt{2} + 1)}{T_c^2} + \frac{K_n^2 + 1}{T_c^2} - \frac{1}{T_n T_c} - \frac{C J_\Sigma}{J_1 J_2} \\ - \frac{\sqrt{2}(\sqrt{2} + 1)}{T_n} + \frac{2K_n}{T_c} + \frac{1}{T_\Sigma} \\ \frac{(K_n^2 + 1) T_\Sigma}{T_n^3 T_c^2} - \frac{J_1 J_2}{C} - l_{\omega_M} J_1 - l_{\vartheta_M} J_2 \end{bmatrix}$$

где  $T_n$  и  $K_n$  — соответственно постоянная времени и коэффициент затухания колебаний в наблюдателе системы, задаваемые с помощью полюсов системы.

При позиционном регулировании петледержателя возникает необходимость компенсации возмущений системы, обусловленных статическим моментом, действующим на петледержатель [5]:

$$M_C = 2T \frac{R}{L} \sin 2\alpha + (G_{neur} r_C + G_n R) \cos \alpha,$$

где  $G_{neur}$  — вес неуравновешенной части полосы;

$G_n$  — вес полосы.

Предполагаем, что величина статического момента может быть непосредственно измерена или рассчитана.

В контуре позиционного регулирования петледержателя статический момент  $M_C$  рассматривается как момент возмущения (нагрузки) и направлен против действия момента двигателя. Исходя из условия компенсации статического момента

$$\frac{M_M(s)}{M_C(s)} = \frac{W_v(s) \cdot W_c(s)}{1 - W_v(s) r_{M_M}} = 1,$$



передаточную функцию  $W_c(s)$  блока компенсации момента нагрузки петледержателя с учетом его технической реализации представим в виде апериодического звена

$$W_{срДТ}(s) = (1 + sT_{\Sigma} - r_{M_m}) \frac{1 - r_{M_m}}{1 + sT_1} = \frac{k_A(1 + sT_A)}{1 + sT_1},$$

где  $k_A = 1 - r_{M_m}$ ;  $T_A = \frac{T_{\Sigma}}{1 + r_{M_m}}$ .

При этом  $T_1$  выбираем так, чтобы выполнялось условие  $T_1 \ll T_A$ .

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Для оценки характеристик системы управления моделировались переходные процессы при регулировании натяжения и петли полосы как с обычной, так и с предлагаемой системой управления. Так, в частности, моделирование показало, что при изменении межвалкового зазора последующей клетки на 1% (рис. 7) максимальное положительное перерегулирование по удельному натяжению для традиционной системы превышает 11,5%, а для разработанной системы отсутствует.

При этом продолжительность переходного процесса для разработанной системы составляет 0,25...0,32 с, а для традиционной системы соответственно 1...1,2 с.

Значительное отклонение удельного натяжения в традиционной системе объясняется влиянием системы регулирования положения петледержателя, а для разработанной системы это влияние скомпенсировано перекрестным регулятором. Изменения удельного натяжения для традиционной системы носят колебательный характер. Незначительная разница в реакциях обеих систем на приложенное возмущающее воздействие в начальный момент времени (практически одинаковые отрицательные отклонения) объясняется тем, что в предлагаемой системе, так же как и в существующей, в контуре регулирования натяжения находится инерционная прокатная клетка, за счет изменения скорости которой осуществляется воздействие на контур регулирования удельного натяжения.

Вместе с тем, из сравнения кривых на рис. 7 видно, что в предлагаемой системе полностью отсутствует положительное отклонение удельного натяжения, в то время как в существующей оно достигает 13%. Отсутствие положительного перерегулиро-

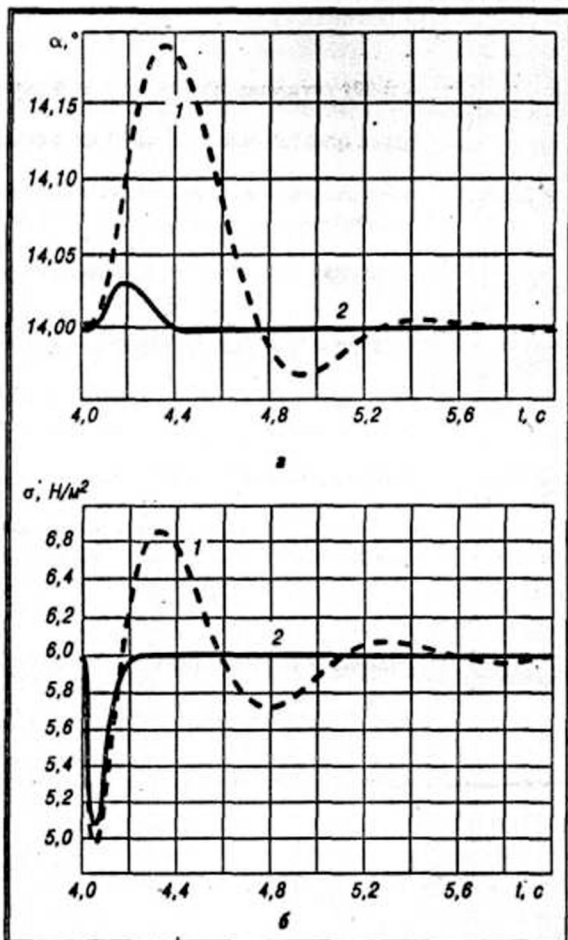


Рис. 7. Изменение положения петледержателя (а) и натяжения (б) для существующей (кривая 1) и предлагаемой систем управления (кривая 2) при изменении межвалкового зазора последующей клетки промежутка на 1%

вания, а также уменьшение времени переходного процесса в предлагаемой системе обусловлено вступлением в работу внутреннего контура регулирования натяжения.

### ВЫВОДЫ

1. Исследования систем регулирования натяжения и петли полосы показали, что система управления с использованием переменных состояния и компенсацией перекрестных связей позволяет повысить качество регулирования натяжения и петли полосы и уменьшить длительность переходного процесса в системе.
2. Применение регуляторов состояния для построения системы управления позволяет повысить устойчивость системы и значительно улучшить быстродействие системы управления геометрическими параметрами горячекатанной полосы в целом.



ЛИТЕРАТУРА

1. АСУ листопркатных станов/ Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Васичкин В.И. и др. М.: Металлургия, 1994. — 334 с.
2. Shaw D.A., Foulds J.G., Horner A.C. Custom design of hydraulic gauge control for three Canadian hot strip mills// Iron and Steel eng. — 1988. — №12. — P. 21-29.
3. Каратников В.Ф., Пистрак М.Я. Состояние и основные направления развития систем автоматического регулирования натяжения на широкополосовых станах горячей прокатки в СССР и за рубежом // Электротехн. пром-сть. Сер. 08. Электропривод. Обзор. информ. — 1975. — Вып. 6. — С. 23-28.
4. System for optimizing performance of loopers on continuous hot strip mills/ G.R. Gagliardi, R. Passoni, L. Zanicotti // BTF — special issue. — 1984. — P. 71-74.
5. Система автоматического регулирования натяжения и петли с перекрестными связями для широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Чертоусов и др. // Электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 21-27.
6. Митрофанов В.З., Топаллер А.В. Вычислительное устройство для измерения удельных межклетевых натяжений на листовом стане горячей про- катки // Автоматизация и электропривод метал, машин и агрегатов. Труды ВНИИМЕТМАШ. — 1979. — № 258. — С. 102-109.
7. Балюта С.М. Частотно-регулювані електромеханічні систем з інтелектуальним керуванням автоматизації технологічних процесів: (Монографія). — К.: НУХТ, 2005. — 281 с.
8. Храмшин В.Р., Карандаев А.С. Анализ процессов образования натяжения в электромеханической системе прокатная клеть — моталка / Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. Махвуз. сб. науч. тр. Под ред. Б.Н. Парсункина. — Магнитогорск: МГТУ, 2001. — С. 153-158.
9. Lappat, A.: Zustandsregelung eines elektrischen Antriebes mit elastischer, schwach gedampfer Mechnik: Elektrise, Berlin 40, 1986, pp. 25-27
10. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования координат электроприводов: Учеб. пособ. 1 Уральский гос. профессионально педагогический университет. — Екатеринбург, 1997. — 277 с.
11. Fukushima Kenya. Looper optimal multivariable control for hot strip finishing mill // Trans. Iron and Steel Inst. Jap. 1988. №6. — P. 463-469. (англ.).
12. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 368 с.

(11)