СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕРЕРВНИМ ЛИСТОПРОКАТНИМ СТАНОМ

Бессараб В.І., Борисов О.О.
Донецький національний технічний університет,
кафедра автоматики і телекомунікацій

Abstract
Bessarab V., Borisov A. Synthesis of an adaptive control system of a continuous sheet mill. *In the article the problems of the continuous rolling mill adaptive control technique are discussed. The algorithm of the adaptive control technique is offered, that allows optimum control executing by means of the mill parameters enrollment.*

Загальна проблема і мета роботи. Істотним резервом у забезпеченні високих техніко-економічних показників листопрокатного виробництва є удосконалення систем автоматичного управління технологічним процесом прокатування. Типові системи регулювання товщин і натягів смуги, що застосовуються в виробництві, вже не задовольняють сучасним вимогам, тому що роздільне управління в каналах регулювання товщини і натягу не забезпечує оптимального режиму роботи стану як багатозв'язного об'єкта. Багатомірні системи управління прокатним виробництвом дозволяють поліпшити якість регулювання, проте вони потребують достатньо адекватної багатозв'язної моделі реального процесу у стані, тому що невідповідність одного з параметрів впливатиме на усі канали управління. Параметри стану у процесі тривалої роботи механічного устаткування і варіації сортаменту листопрокату зазнають певних змін. Тому система управління прокатуванням повинна бути адаптивною до змін параметрів процесу. Синтез такої системи на базі нових моделей і принципів управління безперервним станом, розглянутих у [5-6] є актуальною задачею.

Мета даної роботи - обгрунтування алгоритмів і розробка системи адаптивного управління безперервним прокатним станом.

Аналіз досліджень у даній області та постановка задачі. Аналіз робіт з автоматизації безперервного стана показав, що в області адаптивного управління прокатним виробництвом на базі сучасних комп'ютерних технологій існують певні прогалини. Підходи до автоматизації на базі моделей, запропонованих в [1], уже не задовольняють сучасним вимогам. У [5,6] було запропоновано нову багатозв'язну модель безперервного стану і розглянуто основи управління прокатуванням як багатомірним нелінійним об'єктом із перемінним запізнюванням. Ця стаття базується на результатах досліджень, викладених у [5,6] і є подальшим розвитком даного напрямку.

У роботах [5,6] запропоновано систему рівнянь, яка описує багатозв'язний процес прокатування:

$$\begin{cases} H_i(p) = K_{Hi}(p)u_{Hi}(p) - k_{1i}T_{i-1,i}(p) - k_{2i}T_{i,i+1}(p) + k_{Pi} \\ H_i^{i+1}(p) = H_i(p)e^{-\tau_i(p)p} \\ w_i(p) = K_{wi}(p)u_{wi}(p) - K_{Mi}(p)M_{ci}(p) \\ M_{ci}(p) = k_{Mi}(H_{i-1}(p) - H_i(p)) + R_i(T_{i-1,i}(p) - T_{i,i+1}(p)) \\ pT_{i,i+1}(p) = k_{Ti,i+1}(H_i(p)w_{i+1}(p) - H_{i-1}(p)w_i(p)) \end{cases}, \qquad (1)$$

де i – номер кліті, $H_i(p)$ - товщина листа, що прокатується, $w_i(p)$ - кутова швидкість валка, $T(p)$ - міжклітьовий натяг, $K_{Hi}(p)$ - передатна функція замкнутої системи керування натискним пристроєм, $u_{Hi}(p)$- значення керуючого сигналу на вході системи керування натискним пристроєм, $K_{wi}(p)$- передатна функція замкнутої системи управління швидкістю двигуна головного приводу, $u_{wi}(p)$ - завдання на систему управління швидкістю двигуна головного приводу, $K_{Mi}(p)$- передатна функція двигуна головного приводу щодо моменту навантаження, $M_{Ci}(p)$- момент навантаження двигуна головного приводу, R_i - радіус валка, $k_{Mi}, k_{Ti,i+1}$ - коефіцієнти пропорційності відповідно для моменту прокатування і натягу смуги, k_P - коефіцієнт, який враховує пружні властивості кліті, швидкість прокатування і т.п., k_1, k_2 - коефіцієнти передачі, які враховують вплив переднього і заднього натягів на товщину прокату, $\tau_i(p)$- міжклітьове запізнювання, що є перемінним і визначається як відношення міжклітьової відстані до швидкості смуги на виході з попередньої кліті .

У реальній системі коефіцієнти $k_{Mi}, k_{Ti,i+1}, k_{Pi}, k_{1i}, k_{2i}, R_i$ не є постійними, а перетерплюють повільні зміни. До змін параметрів прокатки можна віднести: знос валків у процесі прокатування, зміну розмірів станини й інших елементів кліті через зміни їхньої температури у процесі прокатування і під час пауз, збільшення товщини масляної плівки підшипників рідинного тертя при розгоні стану та інші (рис.1).

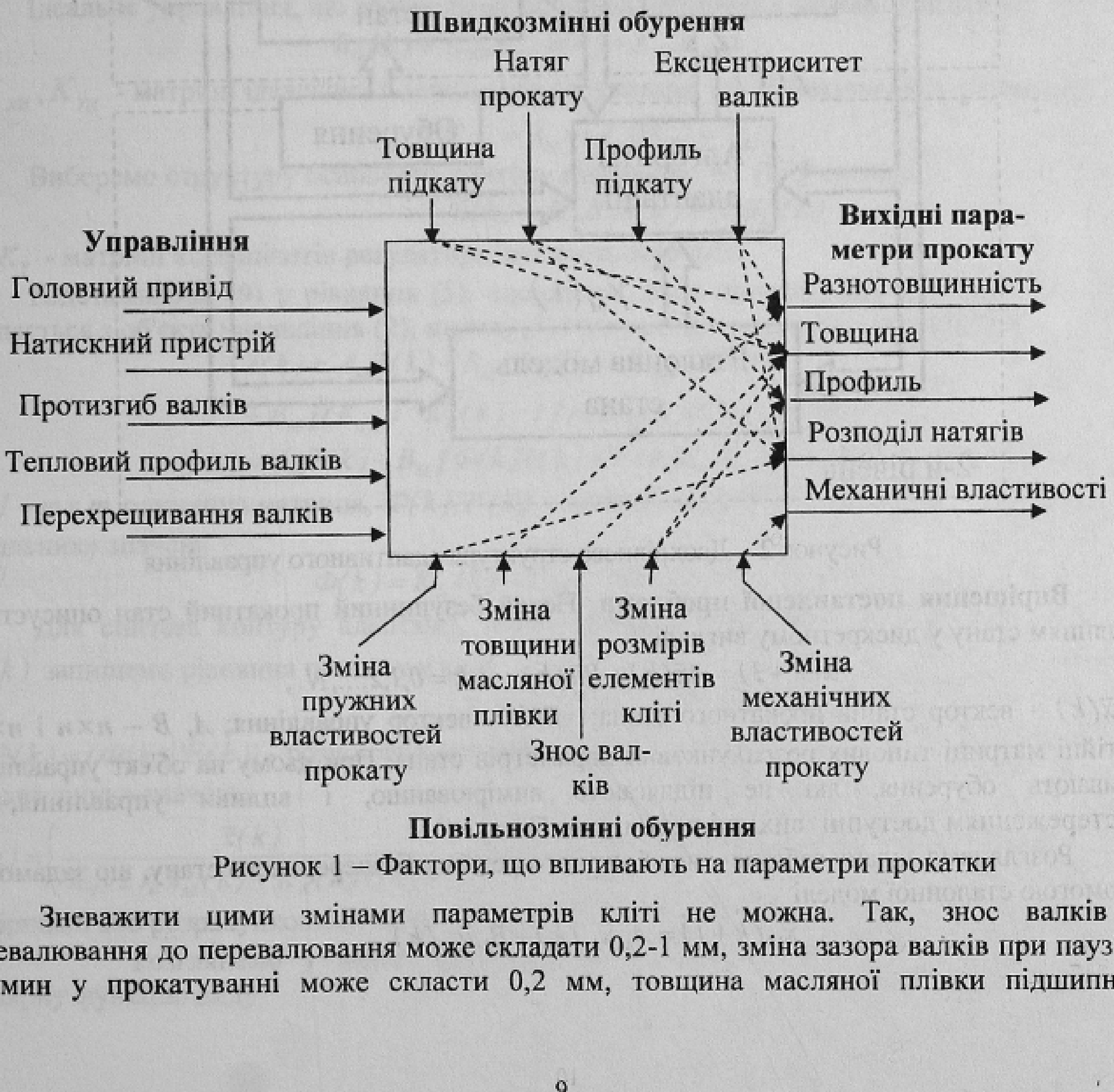

Рисунок 1 – Фактори, що впливають на параметри прокатки

Зневажити цими змінами параметрів кліті не можна. Так, знос валків від перевалювання до перевалювання може складати 0,2-1 мм, зміна зазора валків при паузі 10-20 мин у прокатуванні може скласти 0,2 мм, товщина масляної плівки підшипників рідинного тертя при прокатуванні однієї смуги може змінитися на 0,2-0,3 мм при зміні швидкості прокатування на 3-8 м/с.

Для якісної роботи системи управління параметри моделі (1) повинні змінюватися відповідно до дрейфу технологічних параметрів прокатного стану.

Таким чином виникає постановка задачі адаптивного управління в якій поводження об'єкта залежить від сукупності

$$\bar{\gamma}^T = \left[k_{Mi}, k_{Ti,i+1}, k_{Pi}, k_{1i}, k_{2i}, R_i\right] \in \Re,$$

де $\Re$ - множина можливих значень $\bar{\gamma}$, що визначає клас припустимих обурень коефіцієнтів $k_{Mi}, k_{Ti,i+1}, k_{Pi}, k_{1i}, k_{2i}, R_i$. Вектор $\bar{\gamma}$ квазістационарний: постійний або змінюється повільно (повільніше динамічних процесів в об'єкті і змін зовнішніх впливів).

Потребується синтезувати алгоритм адаптивного управління, що має двухрівневу структуру: алгоритм регулювання або алгоритм 1-го (основного) рівня, що залежить від вектора параметрів регулятора й алгоритм 2-го рівня, що змінює (настроює) вектор параметрів регулятора таким чином, щоб забезпечити досягнення цілі управління при невідомому $\bar{\gamma}$, рис. 2) і використовує величини, що вимірюються або обчислюються на основі вимірів, не залежать від $\bar{\gamma}$ і забезпечують для $\bar{\gamma}$ мету управління.

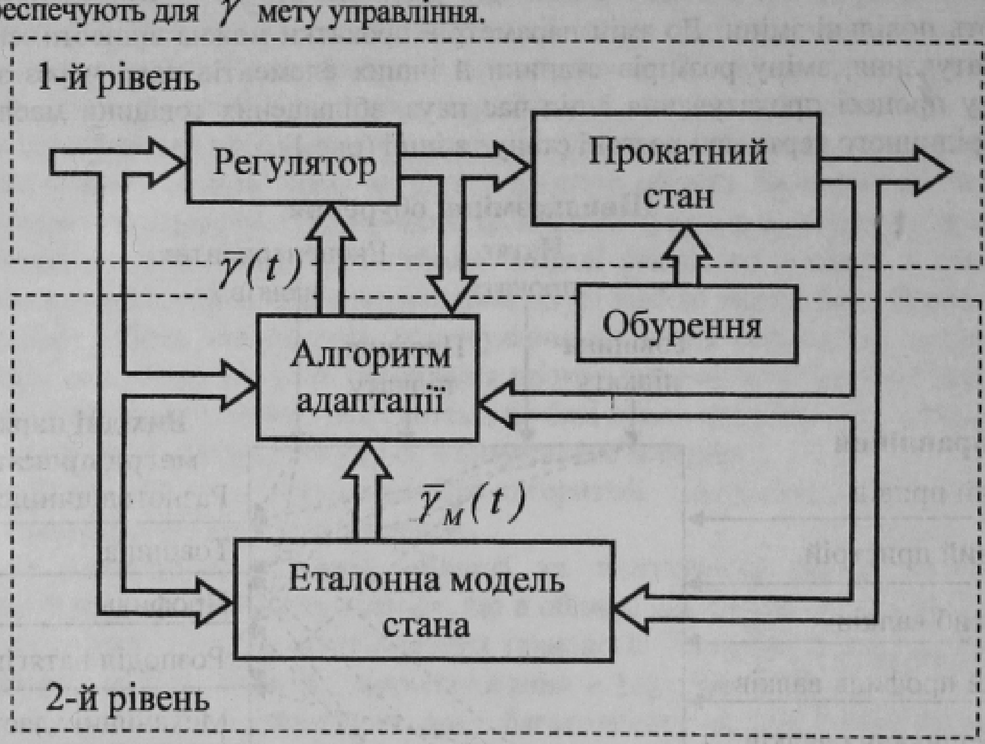

Рисунок 2 – Двохрівнева структура адаптивного управління

Вирішення поставленої проблеми. Нехай безупинний прокатний стан описується рівнянням стану у дискретному вигляді

$$\bar{x}(k+1) = A\bar{x}(k) + B\bar{u}(k), \qquad k = 0,1,2,...,N., \tag{2}$$

де $\bar{x}(k)$ - вектор станів прокатного стана; $\bar{u}(k)$- вектор управління; A, B – $n\times n$ і $n\times m$ постійні матриці типових розрахункових параметрів стана. При цьому на об'єкт управління впливають обурення, які не підлягають вимірюванню, і впливи управління, а спостереженням доступні вихідні перемінні об'єкту.

Розглянемо задачу забезпечення бажаного режиму безперервного стану, що задамо за допомогою еталонної моделі

$$\bar{x}_M(k+1) = A_M\bar{x}_M(k) + B_M\bar{u}_M(k) \tag{3}$$

де $\bar{x}_M(k)$ - вектор параметрів стану еталонної моделі, $\bar{u}_M(k)$ - вектор управління. При цьому дана модель повинна бути усталеною, тобто матриця $A_м$ - гурвицева.

Будемо вважати, що вектор параметрів $\bar{\gamma}$ стана, що складається з коефіцієнтів матриць A і B, заздалегідь не визначений. Відомо лише, що $\bar{\gamma} \in \Re$. Множину $\Re$ можна задати, наприклад, за допомогою максимальних і мінімальних значень, що можуть приймати параметри прокатного стана в процесі його роботи.

Формалізуємо ціль управління, вимагаючи, щоб

$$\lim_{k\to\infty} e(k) = 0 \tag{4}$$

де $\bar{e}(k) = \bar{x}(k) - \bar{x}_M(k)$ - помилка системи .

Синтез основного контуру здійснимо для типових розрахункових параметрів стану. Для одержання структури «ідеального» регулятора запишемо рівняння у відхиленнях

$$\bar{e}(k+1) = A_M\bar{e}(k) + (A - A_M)\bar{x}(k) + B\bar{u}(k) - B_M\bar{u}_M(k). \tag{5}$$

Поставимо вимогу виконання умови розв'язності рівняння

$$(A - A_M)\bar{x}(k) + B\bar{u}(k) - B_M\bar{u}_M(k) = 0. \tag{6}$$

При цьому рівняння (5) матиме вигляд

$$\bar{e}(k+1) = A_M\bar{e}(k). \tag{7}$$

рішення якого асимптотично усталено в силу гурвицевості матриці $Aм$ і, отже, в ідеальних умовах ціль управління (4) досягається.

Ідеальне управління, що задовольняє співвідношенню (6), можна описати як:

$$\bar{u}_И(k) = K_{XИ}K_{YИ}\bar{x}(k) + K_{YИ}\bar{u}_M(k), \tag{8}$$

де $K_{XИ}, K_{YИ}$ - матриці ідеальних коефіцієнтів регулятора, що задовольняють рівнянням

$$BK_{XИ} = A_M - A,\; BK_{YИ} = B_M.$$

Виберемо структуру основного контуру відповідно до (8) у вигляді

$$\bar{u}(k) = K_XK_Y\bar{x}(k) + K_Y\bar{u}_M(k) \tag{9}$$

K_X, K_Y - матриці коефіцієнтів регулятора, що настроюються.

Підставляючи (9) у рівняння (5), одержуємо опис процесу, що настроюється, який складається з об'єкта управління (2), моделі (3) і регулятора основного контуру (9),

$$\begin{aligned}\bar{e}(k) &= A_M\bar{e}(k) + B_M(K_X(k) - K_{XИ})\bar{x}(k) + \\ &+ B_M[(K_{YИ})^{-1}K_Y(k) - I] \times (K_X(k)\bar{x}(k) + \bar{u}_M(k)) = \\ &= A_M\bar{e}(k) + B_M[\Phi(k)\bar{x}(k) + \Psi(k)K_Y(k)(\bar{u}_M(k) + K_X(k)\bar{x}(k))]\end{aligned} \tag{10}$$

де $I - m\times m$ одинична матриця, $\Phi(k), \Psi(k)$ - матриці відхилень коефіцієнтів регулятора від «ідеальних» значень

$$\Phi(k) = K_X(k) - K_{XИ}, \quad \Psi(k) = (K_{YИ})^{-1} - (K_{YK}(k))^{-1}. \tag{11}$$

Для синтеза контуру адаптації, тобто алгоритму настроювання матриць $K_X(k)$ і $K_Y(k)$ запишемо рівняння процесу у виді

$$\bar{e}(k) = A_M\bar{e}(k) + B_M\Theta(k)\Sigma(k) \tag{12}$$

де $\Theta(k) = (\Phi(k) \vdots \Psi(k))$ - розширена матриця відхилень коефіцієнтів, що настроюються, від їх «ідеальних» значень,

$\Sigma(k) = \begin{pmatrix} \bar{x}(k) \\ \hline K_Y(k)[\bar{u}_M(k) + K_X(k)\bar{x}(k)] \end{pmatrix}$ - $p\times 1$ вектор вимірювання (вектор, елементи якого є вимірними або розрахунковими на основі вимірів функціями), $p = n + m$.

Розглянемо у якості претендента на роль функції Ляпунова квадратичну скалярну функцію виду

$$V(k)=0.5\bar{e}^T H\bar{e}+0.5tr(\Theta^T(k)\Gamma^{-1}\Theta(k)), \quad H=H^T, \Gamma=\Gamma^T. \tag{13}$$

Тут tr означає суму елементів головної діагоналі матриці (слід матриці).

Визначимо функцію (13), використовуючи рівняння процесу (12)

$$V(k+1)=\bar{e}^T(k)H\bar{e}(k+1)+tr(\Theta^T(k)\Gamma^{-1}\Theta(k))=$$
$$=\bar{e}^T(k)HA_M\bar{e}(k)+\bar{e}^T(k)HB_M\Theta(k)\Sigma+tr(\dot{\Theta}^T(k)\Gamma^{-1}\Theta(k))=$$
$$=\bar{e}^T(k)HA_M\bar{e}(k)+tr\left[\left(B_M^T H\bar{e}(k)\Sigma^T+\Gamma^{-1}\Theta(k+1)\right)^T\Theta(k)\right]$$

Неважко помітити, що якщо алгоритм адаптації обраний у виді

$$\Theta(k+1)=-\Gamma B_M^T H\bar{e}(k)\Sigma^T, \quad \Gamma=\Gamma^T>0, \tag{14}$$

то функція V є функцією Ляпунова.

Останнє твердження випливає з гурвицевости матриці A_M, для якої в силу леми Ляпунова існує $H=H^T>0$, що задовольняє матричному рівнянню

$$A_M^T H+HA_M=-Q, \quad Q=Q^T>0$$

і, отже,

$$V(k+1)=-0.5\bar{e}^T(k)Q(k)\bar{e}(k). \tag{15}$$

Таким чином, система (12), (14) усталена й у силу (15) цілі управління $\bar{e}(k)\to 0$ при $k\to\infty$ досягається. Тому що $V(k+1)$ не містить у явному вигляді параметрів, що настроюються, то з приведених міркувань випливає лише обмеженість матриці $\Theta(k)$.

Для реалізації алгоритму адаптації варто записати рівняння (14) у термінах матриць коефіцієнтів $K_X(k), K_Y(k)$, що настроюються. Для цього достатньо представити Γ у виді

$$\Gamma=\begin{pmatrix}\Gamma_1 & 0\\ 0 & \Gamma_2\end{pmatrix}$$

де $\Gamma=\Gamma^T>0$ - квадратичні матриці відповідних розмірів. При цьому система (14) записується у виді

$$\Phi=-\Gamma_1 B_M^T H\bar{e}(k)\bar{x}^T(k)$$
$$\Psi=-\Gamma_2 B_M^T H\bar{e}(k)\left(\bar{u}_M+K_X\bar{x}\right)^T\left(K_Y\right)^T.$$

Використовуючи рівності (11), з урахуванням $K_X\equiv 0$ $K_Y\equiv 0$, одержуємо

$$K_X(k)=-\Gamma_1 B_M^T H\bar{e}^T\bar{x}(k), \; K_Y(k)=-K_Y\Gamma_2 B_M^T H\bar{e}(\bar{u}_M+K_X\bar{x})^T(K_Y)^T K_Y.$$

Структурну схему адаптивної системи управління подано на рис. 3.

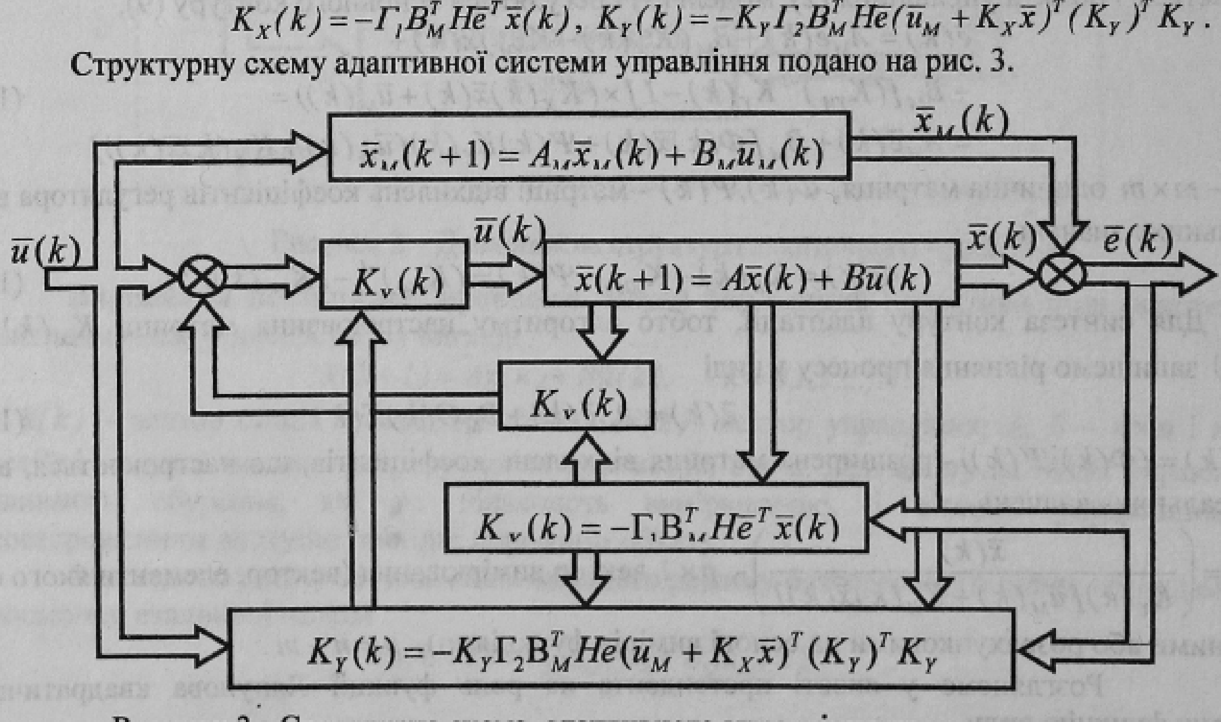

Рисунок 3 - Структурна схема адаптивного управління прокатним станом

Наприкінці необхідно відмітити, що розвиток і удосконалювання технології та організаційної структури прокатного виробництва, напівекспериментальний, дослідницький характер розробок АСУ, прогрес в області використовуваних технічних засобів управління призводять до необхідності численних і неминучих змін в алгоритмі функціонування і структурі системи управління на всіх етапах її життя, включаючи проектування, розробку, упровадження, експлуатацію. У таких умовах життєздатність, розширюваність системи багато в чому визначаються її гнучкістю - спроможністю до достатньо простої і швидкої реконфігурації структури. Це відноситься і до реалізуючих її засобів, насамперед до ЕОМ і програмного забезпечення. Структурна організація спеціального програмного забезпечення в загальному випадку залежить від обраної методології проектування, технологічного процесу, для якого створюється АСУ, використовуваних у системі управління стандартних технічних і програмних засобів.

Висновки

1. У реальних умовах роботи умовно-постійні параметри прокатування перетерплюють певні зміни, тому для якісного функціонування системи управління параметри регулювання повинні змінюватися відповідно до дрейфу технологічних параметрів безперервного прокатного стану.

2. У якості алгоритму управління доцільно використовувати алгоритм адаптивного управління, що має двухрівневу структуру: алгоритм регулювання або алгоритм 1-го (основного) рівня, що залежить від вектора параметрів регулятора й алгоритм 2-го рівня, що змінює (настроює) вектор параметрів регулятора таким чином, щоб забезпечити досягнення цілі управління при невідомому векторі параметрів стана.

3. Розроблено алгоритм адаптивного управління, який забезпечує бажану динаміку процесу безперервного прокатування, що задається еталонною моделлю. Розробка алгоритму включає синтез основного контуру і синтез контуру адаптації. Робота алгоритму базується на підстроюванні коефіцієнтів регулятора, що настроюються, при їхньому відхиленні від "ідеальних".

Література

1. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Металлургия, 1975. -336 с.

2. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. –541 с.

3. Кузнецов Б.И., Опрышко И.А. и др. Автоматизация управления листовыми прокатными станами. Киев: "Техніка", 1992. – 231 с.

4. Бессараб В.І., Борисов О.О. Проблеми автоматизації процесу холодної листопрокатки // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 38.-Донецьк: ДонНТУ,-2002.- С. 7-12.

5. Борисов А.А., Мокрый Г.В. Математическая модель процесса непрерывной листопрокатки как объекта управления // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 48.-Донецьк: ДонНТУ,-2002.-С. 92-100.

6. Борисов О.О., Попов В.О. Моделювання безперервного стана і основи управління ним як багатозв'язним об'єктом // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 64.-Донецьк: ДонНТУ,-2003.- С. 31-37.

7. Борисов А. А., Жукова Н.В. Новый принцип автоматического управления технологической линией производства порошковой проволоки // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 12.-Донецьк: ДонНТУ.- С. 9-15.