

ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОЇ ЛИСТОПРОКАТКИ

Бессараб В.І., Борисов О.О.

Донецький національний технічний університет,
кафедра автоматики і телекомунікаційE-mail: bvi@fcita.dn.ua

Abstract

Bessarab V., Borisov A. Problems of automations process of cool strip rolling. In a article is described a problems of automation of technological process of cool strip rolling in metallurgy. Offered algorithms of governing a continuous rolling mills take into consideration nonlinear object of regulation.

Підвищення конкурентноздатності вітчизняної металургійної продукції, зокрема холоднокатаного листа, пов'язано з корінним удосконаленням технологічного устаткування і впровадженням сучасних засобів автоматичного управління процесом прокатки. Забезпечення вимог до якості холоднокатаного листа в умовах високої продуктивності прокатних станів, породжують ряд нових проблем управління технологічним процесом прокатки, що принципово не можуть бути вирішені за допомогою відомих локальних систем (замкнутого чи розімкненого типу) стабілізації її параметрів.

Схема холодної прокатки припускає пружний механічний взаємозв'язок між клітями через лист, що приводить до впливу робочих параметрів однієї кліті на параметри суміжних клітей. Робочий режим окремої кліті характеризується комплексом змінних, котрий можна розглядати як вектор у деякому просторі, що визначає її поточне становище:

$$\bar{X}_i = |H_{i-1}^*, H_i, T_{i-1}, T_i, v_{i-1}, v_i, d_i, P_i, M_i, w_i, S_i, l_i, U_{oi}, I_{oi}| \quad (1)$$

де H_{i-1}^* - товщина смуги вхідної в i кліть; H_i - товщина смуги вихідної з i кліті; T_{i-1} - натяг смуги на вході в i кліть; T_i - натяг смуги на виході з i кліті; v_{i-1} - швидкість смуги на вході в i кліть; v_i - швидкість смуги на виході з i кліті; d_i - розчин між валками; P_i - зусилля прокатки; M_i - момент прокатки для i кліті; w_i - кутова швидкість валка i кліті; S_i - випередження смуги; l_i - довжина дуги захоплення з урахуванням пружного сплюснення валків; U_{oi} - напруга керуючого сигналу на систему ТП-Д i кліті головного приводу; I_{oi} - струм двигуна i кліті.

Процес прокатки також характеризується комплексом умовно-постійних параметрів:

$$|K_i, d_{mi}, P_{mi}, \mu_i, R_i, B, \sigma_{i-1}, \sigma_i, \psi_i| \quad (2)$$

де K_i - коефіцієнт твердості пружної системи кліть-валок; d_{mi} - товщина масляної плівки в підшипниках; P_{mi} - тиск попереднього вибою валків; μ_i - коефіцієнт тертя між металом, що прокачується, і валками; R_i - радіус недеформованого робочого валка; B - ширина смуги; σ_{i-1}, σ_i - границі текучості до і після обтиснення; ψ_i - коефіцієнт плеча (положення) зусилля прокатки.

Дослідження безперервних станів у всіх взаємозв'язках як об'єктів автоматизації залишається одним з актуальних наукових напрямків. Складність об'єкта полягає в тому, що рівняння прокатки, що описують процес, нелінійні і при аналізі перехідних процесів необхідно враховувати транспортне запізнювання смуги при переміщенні з кліті в кліть. Крім того, математичний опис процесів у прокатному стані вимагає урахування пружних

властивостей його клітей. Різні збурювання зв'язані зі зміною тиску металу на валки і натягів смуги в багатоклітьовому стані приводять до динамічного порушення рівноваги параметрів стану і, як наслідок, відхиленням вихідної товщини смуги від заданої. Усе це визначає складності при створенні алгоритмів управління прокатними станами. Задача керування ще більш ускладнюється при забезпеченні максимальної продуктивності стану, тобто максимальному використанні ресурсів електромеханічного устаткування. У загальній постановці задача оптимізації виглядає такою:

Нехай динамічна модель об'єкта задана системою рівнянь

$$\bar{Y}(t) = \bar{f}(\bar{U}(t), \bar{F}(t)). \quad (3)$$

Знайти керування, що максимізує функцію мети

$$V(t) = V(\bar{V}(t), \bar{U}(t), \bar{F}(t)) \quad (4)$$

при умовах обмежень, накладених на сталі значення перемінних

$$\bar{\mathcal{G}}_{\min} \leq \bar{\mathcal{G}}(\bar{Y}(t), \bar{U}(t)) \leq \bar{\mathcal{G}}_{\max} \quad (5)$$

де $\bar{Y}(t)$ - вектор регульованих змінних;

$\bar{U}(t)$ - вектор керуючих змінних;

$\bar{F}(t)$ - вектор неконтрольованих збурень;

$V(t)$ - скалярна функція мети (швидкість виходу смуги);

$\bar{f}, \bar{\mathcal{G}}$ - m -мірні вектор-функції;

$\bar{\mathcal{G}}_{\min}, \bar{\mathcal{G}}_{\max}$ - m -мірні вектори обмежень.

У такій постановці задачі швидкість прокатки не є постійною, що висуває ряд додаткових труднощів зв'язаних у першу чергу з тим, що при розгляді збурювань у системі стану при постійній швидкості прокатки міжклітьове запізнювання можна вважати величиною постійною, тому що швидкість смуги не перетерплює значних змін у перехідному процесі. Це дозволяє здійснити рішення диференціальних рівнянь стану по ділянках із уведенням результатів попередньої ділянки в наступну. При прискоренні стану запізнювання є величиною перемінною і залежить від швидкості смуги. Швидкість смуги у функції часу визначається тільки в результаті рішення рівнянь перехідного процесу. Отже, неможливо одержати строгого аналітичного рішення, тому що для рішення системи рівнянь наступної кліті необхідно визначити запізнювання як функцію часу, а для його визначення необхідно знати швидкість смуги на цій ділянці, що неможливо поки система не вирішена. Крім того, неможливе рішення в елементарних функціях системи рівнянь поєднуючих між собою швидкості двигунів суміжних клітей з урахуванням закону суцільності [1]. Це створює додаткових труднощів при розробці алгоритмів керування станами з перемінною швидкістю прокатки і вимагає розробки спеціальних методів для рішення задач такого виду. Тим часом, максимізація швидкості прокатки найчастіше передбачається в якості одного з основних критеріїв ще на стадії попередньої, до заправлення смуги, настроювання розчинів між валками, швидкостей і уставок локальних САР на межклітьові натяги, товщини, зусилля прокатки, сили струмів і напругу головних приводів.

Проблеми, розглянуті вище, підіймалися фахівцями в області керування безперервними станами холодної прокатки. Особливої уваги заслуговують праці Дружиніна М.М. [1] і авторів [2,3]. Однак у їхніх роботах аналітичні труднощі були в деякій мірі переборені шляхом лінеаризації вихідних рівнянь розкладанням нелінійних функцій у ряд Тейлора по перших ступенях величин, тобто спрощеного опису фізичних процесів. У такий спосіб були отримані лінійні математичні моделі процесу прокатки для дослідження режимів роботи і керування станами з постійною швидкістю прокатки. Ці моделі мають наступні основні недоліки:

- 1) наближений опис реальних процесів у стані;

2) непридатність для управління станами з перемінною швидкістю прокатки (при максимізації продуктивності), тому що лінеаризація передбачає малі збільшення аргументів нелінійних функцій, а при прискоренні стану вони можуть бути значними.

Розглянемо узагальнену нелінійну динамічну модель прокатного стану у виді системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned}
 1) \quad M_i(t) &= R_i \left(2\psi_i \frac{P_i(t)}{l_i(t)} (H_{i-1}^*(t) - H_i(t)) - T_{i,i+1}(t) + T_{i-1,i}(t) \frac{H_i(t)}{H_{i-1}^*(t)} \right); \\
 2) \quad H_i(t) &= d_i(t) + \frac{P_i(t) - P_m}{K_i} - d_m; \\
 3) \quad P_i(t) &= \frac{BX_i(t)H_{i-1}^*(t)}{2\mu_i} \left[\frac{1}{\varphi_i(t)} \left(\frac{X_{i-1}(t)}{X_i(t)} \right)^{\varphi_i(t)} e^{m_i(t)} - \left(\frac{X_{i-1}(t)}{X_i(t)} - 1 \right) - \frac{1}{\varphi_i(t)} \right]; \\
 4) \quad \varphi_i(t) &= \frac{H_{i-1}^*(t)}{H_{i-1}^*(t) + H_i(t)}; \\
 5) \quad X_i(t) &= 1,15\sigma_i - \frac{T_i(t)}{BH_i(t)}; \quad X_{i-1}(t) = 1,15\sigma_{i-1} - \frac{T_{i-1}(t)}{BH_{i-1}(t)}; \\
 6) \quad m_i(t) &= \frac{2\mu_i l_i(t)}{H_{i-1}^*(t) + H_i(t)}; \\
 7) \quad l_i(t) &= \sqrt{R_i (H_{i-1}^*(t) + H_i(t)) + \frac{P_i(t)R_i}{aB}}; \\
 8) \quad v_{i+1}(t) &= \gamma_{i+1} w_{i+1}(t) \left[1 + b_{i+1} (T_{i+1,i+2}(t) - T_{i,i+1}(t)) \right] \frac{H_{i+1}(t)}{H_i^*(t)}; \\
 9) \quad v_i(t) &= \gamma w_i(t) \left[1 + b_i (T_{i,i+1}(t) - T_{i-1,i}(t)) \right]; \\
 10) \quad pT_{i,i+1}(t) &= \frac{EB}{L_{i,i+1}} H_{i+1}(t) (v_{i+1}(t) - v_i(t)); \\
 11) \quad w_i(t) &= W_{U_i}(p) U_i(t) - W_{M_i}(p) M_i(t); \\
 12) \quad H_{i-1}^*(t) &= H_{i-1}(t - \tau).
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Тут: $\gamma_j = \frac{\pi R_j}{30j} (1 + s_0)$, де j - передаточне число редуктора головного приводу, s_0 -

випередження металу при прокатці без натягу; ν - коефіцієнт Пуассона; b - коефіцієнт, що характеризує залежність випередження від натягів смуги; E - модуль пружності матеріалу, що прокочується; $L_{i,i+1}$ - довжина межклітьового проміжку; $W_{U_i}(p), W_{M_i}(p)$ - передатні функції системи приводу кліті відповідно по каналі керуючого впливу і що обурює (p - оператор Лапласа); τ - час запізнювання між клітями.

Рівняння (1) і (8),(9) системи (6) складені на основі рівнянь відповідно для моменту прокатки і швидкості металу запропонованих Дружиніним М.М. [1]; рівняння (2) власне кажучи являє собою рівняння Головіна-Симса, що лежить в основі непрямого виміру товщини смуги використовуючи пружні властивості кліті; рівняння (3)-(7) отримані з формули Целикова О.І.[1]; рівняння (10) отримано з вираження запропонованого Морозовим Д.П. [1]; рівняння (11) і (12) - стандартні рівняння відповідно електропривода (в операторній формі в загальному виді) і транспортного запізнювання.

Аналізуючи дану систему (6) можна укласти, що при такій кількості нелінійностей здійснити ефективне управління на її основі досить складно, хоча в плані дослідження об'єкта управління вона становить визначений інтерес. Задачу управління можна значно спростити введенням у модель даних отриманих шляхом безпосереднього виміру деяких параметрів процесу прокатки за допомогою датчиків.

Технологічно до контрольованих параметрів прокатки слід відносити: H_i - товщину смуги, T_i - натяг смуги, d_i - розчин між валками, P_i - зусилля прокатки, w_i - кутову швидкість валка (чи двигуна), I_i - струм двигуна (при двухзонному регулюванні - струми збудження і якоря). До керуючих впливів: зміну розчину між валками d_i і напругу керуючого сигналу на систему керування електроприводом (завдання на кутову швидкість двигуна w_i). Як правило саме на ці параметри накладаються системні обмеження. Інші параметри робочого режиму кліти технологічно прямому контролю не підлягають і їхні відхилення можуть розглядатися як обурюючі впливи.

Таким чином, управління технологічним процесом холодної прокатки безперервного стану при наявності повного комплексу засобів контролю відбувається відповідно до структурної схеми показаної на рис. 1 (позначення на рисунку відповідають поясненням до (1)).

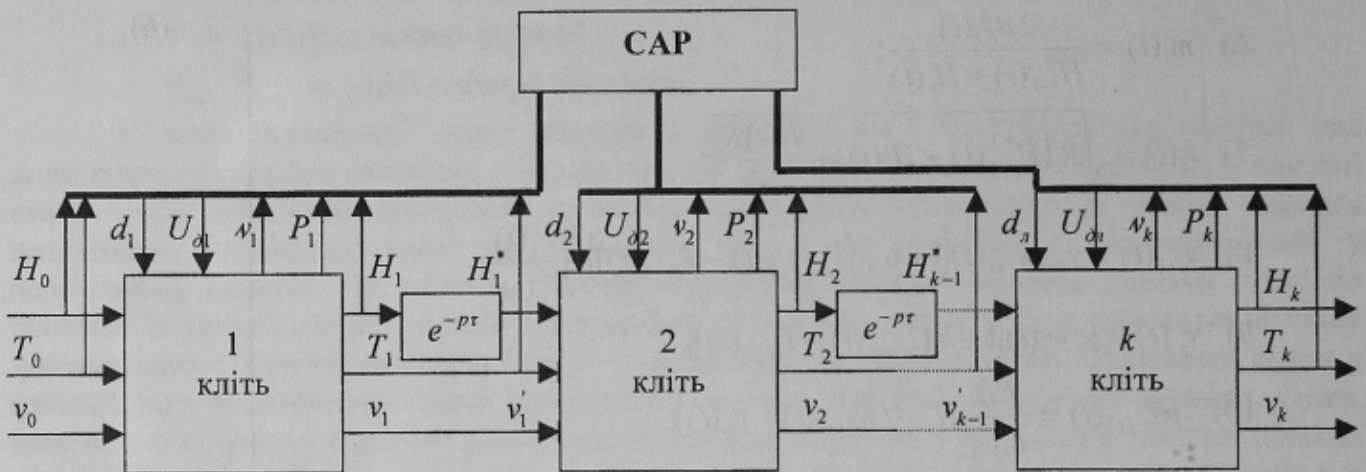


Рис.1 Структурна схема управління процесом холодної прокатки

Однак, слід зазначити, що не всі стани мають повний комплекс зазначених засобів технологічного контролю, що визначає в задачі керування відновлення невимірюваних перемінних параметрів на моделі. Управління такими станами визначає максимально можливу адекватність математичної моделі реальним процесам у прокатному стані. Однак, нелінійні моделі процесів холодної прокатки й алгоритми керування на їхній основі через їхню складність власне кажучи не розглядалися. З одного боку, це обґрунтовано з ряду причин відомих фахівцям. З іншого боку, управління нелінійним об'єктом на базі лінійних моделей [1,2] може привести до погіршень регулювання. Тим часом, облік нелінійностей об'єкта регулювання може істотно підвищити якість управління.

Аналіз системи рівнянь (6) показує, що процес управління обтисненням металевого листа є безінерційним, а динаміка процесу прокатки визначається динамікою зміни міжклітьових натягів і динамікою головного приводу. Строго говорячи, це допущення можливе за умови використання на прокатних станах сучасних гідравлічних (гідромеханічних) натискних пристроїв маючих високу швидкодію [4].

Пропонується структура системи управління процесом прокатки з урахуванням нелінійностей об'єкта шляхом прямого контролю зусилля прокатки (рис. 2).

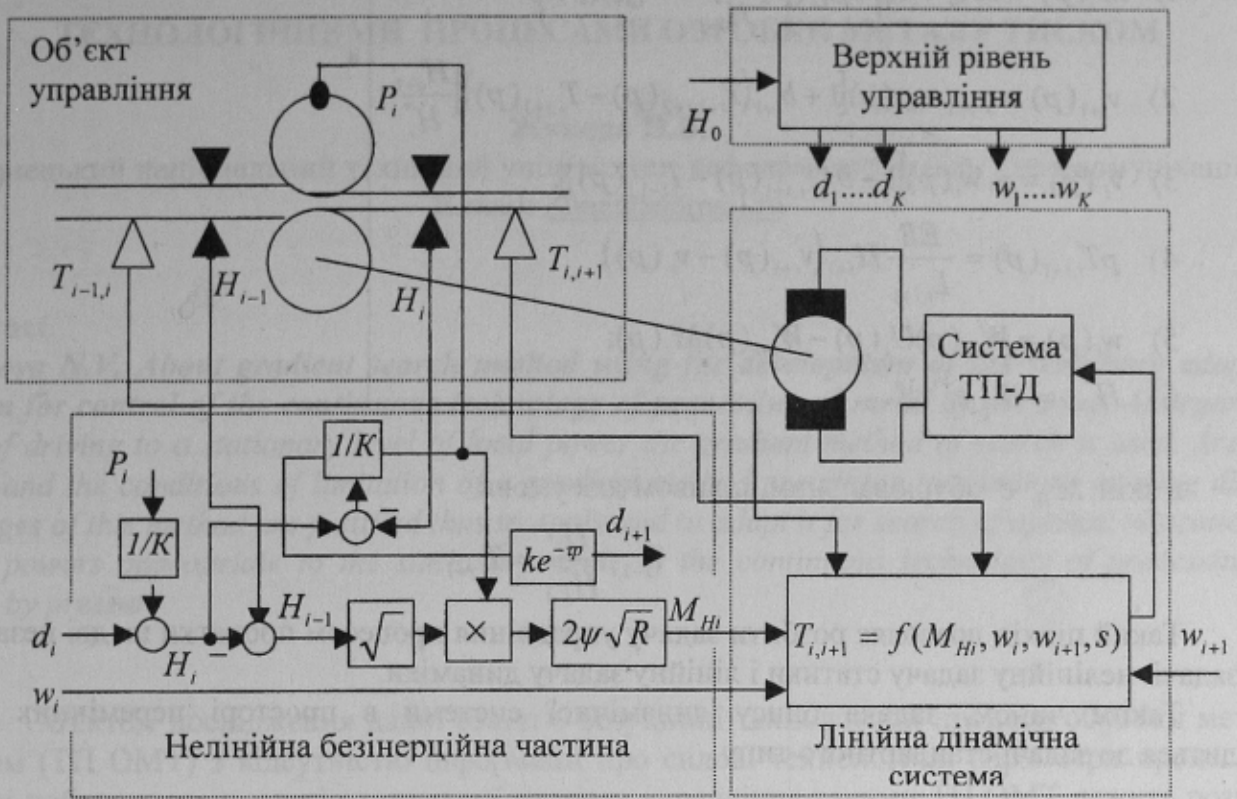


Рис. 2 Структура системи управління процесом прокатки з урахуванням нелінійностей об'єкта регулювання

Система містить два рівні керування: верхній і нижній. На верхньому рівні зважується задача оптимізації в постановці (3)-(5) (наприклад, з використанням принципу максимуму Понтрягіна), а на нижньому - стабілізації параметрів прокатки в залежності від рішення задачі верхнього рівня.

На нижньому рівні здійснюється "двухзонне" регулювання параметрів прокатки.

У першій зоні на основі рівняння Головіна-Симса визначається $H_i = f(d_i)$ і зважується нелінійна задача залежності моменту прокатки M_{Hi} від величини обтиснення листа $\Delta H_i = H_{i-1} - H_i$. Компенсація нелінійностей залежності $H_{i+1} = f(d_{i+1})$ здійснюється на основі рівняння Головіна-Симса шляхом подачі з урахуванням запізнювання в ланцюг керування натискним пристроєм $i+1$ кліті сигналу з месدوزи i кліті взятого з визначеним коефіцієнтом k . Таке рішення дозволяє позбавитися небезпечності порушення статичної стійкості регулювання властивого системам типу «Gagemeter». Коефіцієнт k повинен урахувувати зміну натягів між клітями, наприклад, за допомогою формули У.Хессенберга та Р.Симса

$$P_i = P_i' \left(1 - \frac{T_{i-1,j} + T_{i,j+1}}{4\tau_s} \right)$$

де P_i' - зусилля прокатки без урахування натягів,

$$\tau_s = 0,57 \frac{\sigma_{i-1} + \sigma_i}{2} - \text{опір чистому здвигу.}$$

В другій зоні вирішується лінійна система рівнянь динаміки

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad M_i(p) &= M_{Hi} + R_i \left(T_{i-1,i}(p) \frac{H_i}{H_{i-1}^*} - T_{i,i+1}(p) \right); \\ 2) \quad v_{i+1}(p) &= \gamma_{i+1} w_{i+1}(p) \left[1 + b_{i+1} (T_{i+1,i+2}(p) - T_{i,i+1}(p)) \right] \frac{H_{i+1}}{H_i^*}; \\ 3) \quad v_i(p) &= \gamma w_i(p) \left[1 + b_i (T_{i,i+1}(p) - T_{i-1,i}(p)) \right]; \\ 4) \quad p T_{i,i+1}(p) &= \frac{EB}{L_{i,i+1}} H_{i+1} (v_{i+1}(p) - v_i(p)); \\ 5) \quad w_i(p) &= W_{Ui}(p) U_i(p) - W_{Mi}(p) M_i(p); \\ 6) \quad H_{i-1}^* &= H_{i-1} e^{-\tau_{i-1} p}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

в якій M_{Hi} є обурювальним впливом для умови

$$T_{i-1,i} \frac{H_i}{H_{i-1}^*} = T_{i,i+1}. \quad (8)$$

Такий підхід дозволяє розбити задачу управління процесом прокатки на дві незалежні підзадачі: нелінійну задачу статички і лінійну задачу динаміки.

Таким чином, задача опису динамічної системи в просторі перемінних стану зводиться до задачі стандартного типу.

Висновки

1. Підвищені вимоги до якості холоднокатанного листа в умовах максимальної продуктивності станів безперервної прокатки визначають поряд з удосконаленням технологічного устаткування розробку нових алгоритмів управління процесом прокатки.

2. При розробці алгоритмів управління безперервним станом необхідно враховувати нелінійності об'єкта регулювання.

3. Управління на базі загальної нелінійної математичної моделі через складність об'єкта регулювання сполучено з визначеними труднощами.

4. Перспективним є управління процесом прокатки з урахуванням нелінійностей об'єкта з введенням у модель даних отриманих шляхом безпосереднього виміру зусилля прокатки.

Література

1. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: "Металлургия", 1975, 336 с.
2. Бройдо Б.С. Синтез систем автоматического управления непрерывными станами холодной прокатки. – М.: "Металлургия", 1978, 160 с.
3. Автоматизация управления листовыми прокатными станами / Кузнецов Б.И., Опрышко И.А., Богаенко И.Н. и др. – К.: Техника, 1992, 231 с.
4. Лямбах Р.В., Климовицкий М.Д. Проблемы автоматизации прокатного производства // Сталь. - 1999. - №2. - с. 40-43.
5. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: "Металлургия", 1980, 320 с.