

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕРЕРВНИМ ПРОЦЕСОМ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

**Борисов О.О., Жукова Н.В., Верховський Я.М.**  
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк  
кафедра автоматики і телекомунікацій  
E-mail: [alexbor@fcita.dn.ua](mailto:alexbor@fcita.dn.ua), [Zhnatka@mail.ru](mailto:Zhnatka@mail.ru)

### *Abstract*

*Borisov A.A., Zhukova N.V., Verhovskiy J.M. Refinement of systems of automatic control of a continuous process of cold rolling. The elementary dynamic equation of continuous rolling, which takes into account correlation between a leading parameters of the rolling process in adjacent closets is offered. The principle of control efficiency estimation is offered and the control strategy tasks are defined.*

**Загальна постановка проблеми.** Реконструкція цехів безперервної холодної листопрокатки з метою виробництва продукції, що задовольняє сучасним вимогам автомобільної, електротехнічної, харчової, машинобудівної, електронної й інших галузей народного господарства, є найважливішою задачею металургійної промисловості України. У даний час сформовані устояні напрямки в області удосконалення механічного обладнання прокатних станів, спостерігається визначений прогрес у розвитку технологій його виробництва [1]. Разом з тим у фахівців в області прокатки сьогодні є незаперечним той факт, що без ефективної системи автоматичного управління прокатним станом одержати якість металевого листа, що задовольняла б сучасним вимогам, неможливо. Це, у першу чергу, зв'язано з необхідністю узгодження роботи декількох клітей, що впливають одна на іншу через металеву штабу. Таким чином, модернізація систем автоматичного управління безперервною прокаткою на базі удосконалення алгоритмів управління залишається істотним резервом у забезпеченні найвищих техніко-економічних показників листопрокатного виробництва. Однак, складність і багатозв'язність даного об'єкта управління визначають різноманітність підходів до його математичного опису і управління, а прогрес у даних питаннях можливий тільки на базі аналізу наявних рішень [2]. Цей факт приводить до того, що ряд українських металургійних підприємств із залученням вітчизняних і закордонних фахівців працюють над удосконаленням систем автоматичного управління безперервними станами холодної прокатки. Тому, удосконалення математичного опису динаміки безперервної прокатки з погляду автоматизації, методів управління безперервним станом і створення таких систем, які б підвищували ефективність його функціонування і якість продукції, є важливою науковою задачею.

Аналіз положень теорії подовжньої прокатки, результатів експериментальних досліджень на діючих станах, відомих моделей і рівнянь, показав наявність деяких протиріч у математичних описах процесів пластичної деформації металу і кінематики прокатки, що відзначається в останніх публікаціях фахівців у цій області [3].

**Постановка задач дослідження.** Одним з головних показників якості прокату є ступінь його подовжньої різнотовщинності, задача мінімізації якої представляє найбільшу практичну складність. При цьому, товщиною листа управляють шляхом зміни прозорів між валками за допомогою натискних пристроїв і шляхом зміни натягів листа, що залежать від кутових швидкостей валків. Основні збурення, що впливають на процес холодної прокатки: варіація профілю підкату і подовжнього натягу, розподіл напруг по ширині підкату, знос валків і ексцентриситети валкової системи. Технологічно до основних контрольованих параметрів

прокатки варто відносити:  $H_i$  - товщину штаби,  $T_i$  - натяг штаби,  $d_i$  - зазор між валками,  $P_i$  - зусилля прокатки,  $w_i$  - кутову швидкість валка (двигуна),  $v_i$  - лінійну швидкість прокату.

Відомі багатозв'язні динамічні моделі прокатного стану засновані на лінійному рівнянні, що відображує пропорційну залежність похідної міжклітьового натягу  $T_{i,i+1}$  (рис. 1) від різниці лінійних швидкостей штаби на вході  $i+1$ -ї і виході  $i$ -ї кліті, що залежать від відповідних кутових швидкостей валків  $w_{i+1}$  і  $w_i$ .

Системний аналіз наявних теоретичних і експериментальних досліджень показав, що міжклітьовий натяг  $T_{i,i+1}$  залежить не тільки від кутових швидкостей валків суміжних клітей  $w_i$  і  $w_{i+1}$ , але і від товщини підкату  $H_{i-1}$  і товщини листа на виході  $i$ -ї кліті  $H_i$ , тобто обтиснення в ній. Таким чином виникає задача нового математичного опису і аналізу процесу холодної прокатки металеві штаби.

**Рішення задач і результати досліджень.** Пропонується найпростіше рівняння динаміки процесу безперервної прокатки:

$$\frac{dT_{i,i+1}}{dt} = k_T (H_i(t)w_{i+1}(t) - H_{i-1}(t)w_i(t)), \quad (1)$$

де  $k_T$  - комплексний коефіцієнт, пропорційний модулю пружності металу, поперечному сеченню штаби і довжині міжклітьового проміжку.

Рівняння засноване на законі суцільності і твердженні про подобу процесів у осередках деформації суміжних клітей при однакових відносних обтисненнях у них [4].

Відмінною рисою запропонованого рівняння динаміки прокатного стану є відображення взаємозв'язку між всіма основними параметрами процесу прокатки в суміжних клітях: товщиною підкату  $H_{i-1}$ , товщиною листа на виході  $i$ -ї кліті  $H_i$ , кутовою швидкістю  $i$ -ї  $w_i$  і  $i+1$ -ї  $w_{i+1}$  кліті, міжклітьовим натягом  $T_{i,i+1}$  (рис. 1).

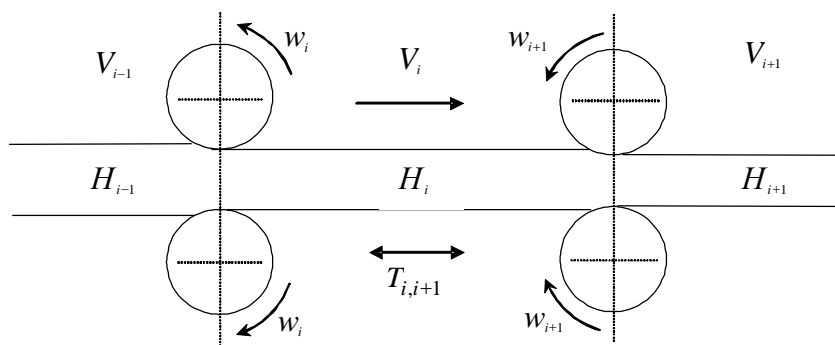


Рисунок 1 - Схема прокатки для суміжних клітей

Аналіз (1) дозволяє зробити висновок, що міжклітьове запізнювання, яке визначає узгодження роботи натискних пристроїв суміжних клітей, і представляє відношення довжини міжклітьового проміжку до лінійної швидкості штаби в ньому є змінною і залежить від товщини підкату - основного збурення для прокатного стану. Таким чином, прокатний стан можна класифікувати як нелінійний об'єкт із перемінним запізнюванням. Виходячи з (1), систему рівнянь, що описує процес безперервної прокатки, можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} H_i(p) = K_{H_i}(p)u_{H_i}(p) + k_H \\ H_i^{i+1}(p) = H_i(p)e^{-\tau_i(p)p} \\ w_i(p) = K_{w_i}(p)u_{w_i}(p) - K_{M_i}(p)M_{c_i}(p) \\ M_{c_i}(p) = k_{M_i}(H_{i-1}(p) - H_i(p)) + R_i(T_{i-1,i}(p) - T_{i,i+1}(p)) \\ pT_{i,i+1}(p) = k_{T_{i,i+1}}(H_i(p)w_{i+1}(p) - H_{i-1}(p)w_i(p)) \end{cases}, \quad (2)$$

де  $K_{H_i}(p)$  - передатна функція замкнутої системи управління натискним пристроєм,  $u_{H_i}(p)$  - значення сигналу управління на вході системи управління натискним пристроєм,  $K_{w_i}(p)$  - передатна функція замкнутої системи управління швидкістю двигуна головного приводу,  $u_{w_i}(p)$  - завдання на систему управління швидкістю двигуна головного приводу,  $K_{M_i}(p)$  - передатна функція двигуна головного приводу щодо моменту навантаження,  $M_{c_i}(p)$  - момент навантаження двигуна головного приводу,  $R_i$  - радіуси валків,  $u_{H_i}(p)$  - коефіцієнти, що підлаштовуються, відповідно в каналах зміни товщини, моменту прокатки і натягу штаби,  $\tau_i(p)$  - перемінне міжклітьове запізнювання,  $p$  – оператор Лапласа.

Регулювання товщин і натягів штаби може здійснюватися за допомогою незалежних систем автоматичного регулювання товщини (САРТ) і систем автоматичного регулювання натягу (САРН), однак більш досконалим є комплексне регулювання за допомогою двозв'язної системи управління кліттю, що враховує взаємовплив даних параметрів прокатки. Двовірні система управління визначає розробку відповідної двозв'язної моделі локальної кліті як об'єкта управління.

Для окремої кліті, як двовірного об'єкту, можлива лінійна постановка задачі управління. Враховуючи, що система регулювання товщини мінімізує різнотовщинність на виході  $i$ -ї кліті (рис.1), а швидкість  $i$ -го двигуна відносно  $i+1$ -го постійна, рівняння динаміки міжклітьового натягу (1) можна записати у вигляді лінійного операторного рівняння

$$pT_{i,i+1} = k_T(H_i w_{i+1}(p) - H_{i-1}(p)w_i), \quad (3)$$

і задача може бути вирішена в просторі параметрів стану.

Розроблено відповідну двовірну модель у вигляді канонічної структури для стандартизації підходу до управління. Модель спрощена практично без утрати її адекватності реальному процесу з урахуванням того, що при збільшенні моменту прокатки внаслідок збільшення товщини підкату швидкість привода падає по визначеному закону, однак це падіння швидкості, у тім чи іншому ступені, відповідає закону управління, що передбачає визначене зменшення швидкості.

Виходячи з вищевикладеного і моделі (2), двозв'язна модель кліті має вигляд:

$$\begin{cases} H_1(p) = K_{H_1}(p)u_{H_1}(p) - k_{H_1}T_{1,2}(p) \\ w_1(p) = K_{w_1}(p)u_{w_1}(p) \\ pT_{1,2}(p) = k_{T_{1,2}}(H_1(p)w_2 - H_0w_1(p)) \end{cases}, \quad (4)$$

чи для переходу до канонічної структури

$$\begin{cases} H_1(p) = K_{H_1}(p)u_{H_1}(p) - k_{H_1}T_{1,2}(p) \\ T_{1,2}(p) = \frac{k_{T_{1,2}}w_2}{p} H_1(p) - \frac{k_{T_{1,2}}H_0}{p} K_{w_1}(p)u_{w_1}(p) \end{cases}. \quad (5)$$

Системі (5) найбільш відповідає Р-канонічна структура, що представлена на рис. 2. У матричній формі вираження, відповідне Р-канонічній структурі, має вигляд:

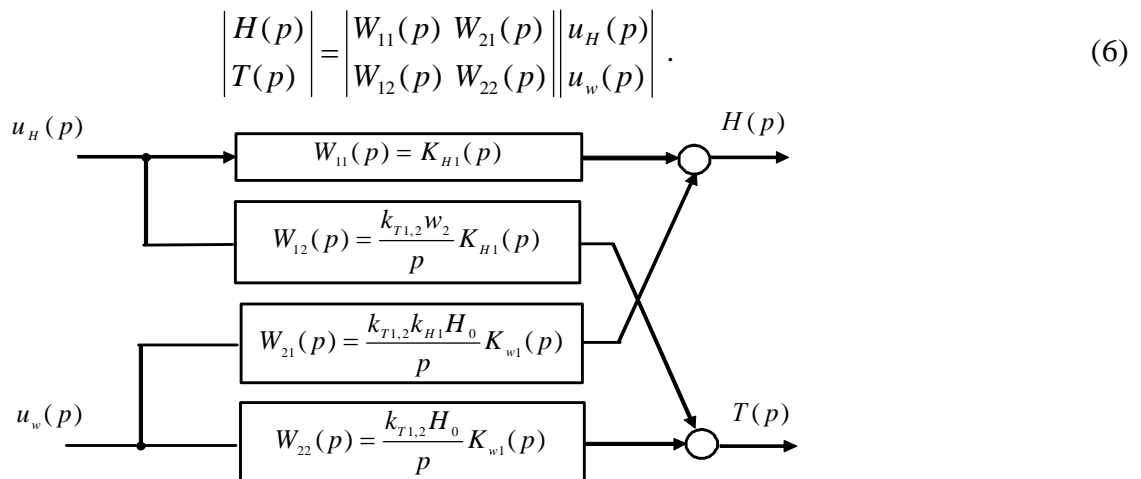


Рисунок 2 – Р-канонічна структура двозв’язної моделі кліті

Рівняння стану, відповідні даній моделі:

$$\begin{bmatrix} x_{11}(k+1) \\ x_{12}(k+1) \\ x_{21}(k+1) \\ x_{22}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11}(k) \\ x_{12}(k) \\ x_{21}(k) \\ x_{22}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{12} & 0 \\ 0 & b_{21} \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_H(k) \\ u_w(k) \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} H(k) \\ T(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^T & 0 & c_{21}^T & 0 \\ 0 & c_{12}^T & 0 & c_{22}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11}(k) \\ x_{12}(k) \\ x_{21}(k) \\ x_{22}(k) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Визначення матриць  $A(T)$  і векторів  $b(T)$  для об’єктів досить високого порядку не представляє труднощів при використанні програмного забезпечення для наукових і інженерних розрахунків – MatLab. З його допомогою здійснюється перехід від передатної функції до рівняння стану безперервної системи в просторі станів, а потім до рівняння стану дискретної системи, чи здійснюється перехід до дискретної системи безпосередньо від системи (6).

Моделювання двозв’язної системи показало, що використання в системах автоматичного управління кліттю двомірних регуляторів дозволяє зменшити різновтовщинність листопрокату на 15-20 % у порівнянні з одномірними (рис. 3).

Виходячи з вираження (1) запропоновані наступні способи управління двигунами головного приводу прокатного стана:

- кутова швидкість двигуна кожної наступної кліті змінюється щодо швидкості двигуна попередньої кліті відповідно до вираження (1), а швидкість першої кліті незмінна;
- у залежності від товщини підкату істотно змінюється тільки швидкість двигуна першої кліті, а швидкості двигунів усіх наступних клітей задовольняють умові (1);
- кутова швидкість проміжного двигуна головного приводу є незмінною, а зміни швидкостей попередніх і наступних двигунів задовольняють умові (1) і мають різний знак.

Виконано аналіз даних способів управління і показано істотні переваги другого з них:

- транспортне запізнювання в міжклітьових проміжках, починаючи з другої кліті, тут на відміну від інших способів інваріантне щодо збурення товщини листа на вході стана, що дозволяє досить просто реалізувати систему компенсації ексцентриситету валків у суміжних клітях;

- значно спрощується задача верхнього рівня, тому що збурення товщини листа на вході стана майже не проходить у наступні кліті;
- значно зменшуються вимоги до динамічних характеристик систем головного приводу і натискних пристроїв, починаючи з другої кліті, що дозволяє знизити вартість технологічного обладнання;
- підвищується надійність роботи системи управління за рахунок спрощення алгоритмів і зменшення обсягів обчислень.

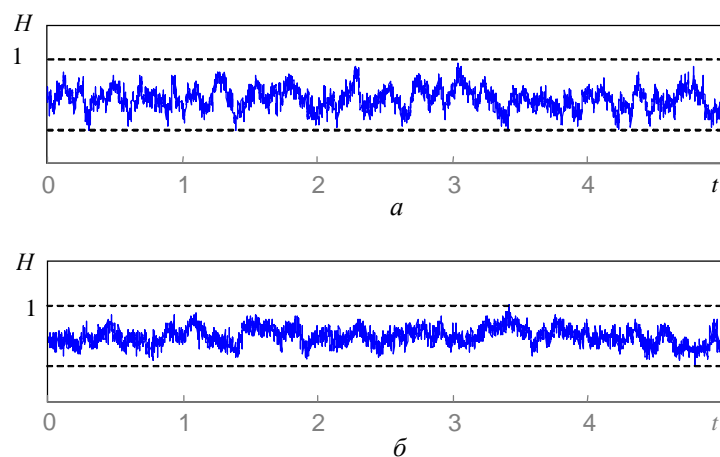


Рисунок 3 – Різновтовщинність у системі з одновимірними регуляторами (а) і двовимірним регулятором (б)

Таким чином, пропонується максимально подавляти збурення товщини вхідного листа вже першою кліткою стана, а не "виправляти" різновтовщинність у всіх наступних клітках. У них досягається тільки необхідне обтиснення листа і придушуються відносно високочастотні складові його різновтовщинності, що не можуть бути придушені системою регулювання, через обмеження визначені її швидкодією, і які незначно впливають на міжкліткові натяги, через інтегруючі властивості каналу натягу.

Основні труднощі при оцінці управління прокатним станом зв'язані з численністю факторів, що впливають на цю оцінку, різномірністю критеріїв оцінки, неможливістю приведення до єдиної шкали вимірювання, необхідністю урахування взаємного впливу факторів, ситуацій на «ваги» критеріїв, розпливчастості категорій існуючих оцінок [5]. Як показники, що характеризують управління виробництвом прокату, як правило, виступають геометричні і фізико-механічні параметри прокату, енергосилові витрати на виробничий процес, продуктивність безперервного стана, інтенсивність зносу механічних вузлів, надійність роботи обладнання і т.п.

Пропонується принцип оцінки ефективності управління (стратегії управління) з урахуванням взаємовпливу факторів на базі виділення сильно зв'язаних груп, поділу частот обробки інформації з груп з виділенням групового аргументу (показника, аспекту) і адаптивного розподілу «ваг» групових аспектів в оцінках реальних ситуацій. Відповідно до цього принципу, задача оцінки ефективності управління ставиться в такий спосіб:

1. На базі часткових, прогнозних і статистичних оцінок якості управління складаються матриці даних, що відображують вплив визначених факторів на ефективність управління і враховуються при реалізації стратегії (знаходження зв'язків між показниками і факторами взаємовпливу, формування відповідних матриць є окремою задачею, рішення якої повинно базуватися на знайдених залежностях теорії і практики безперервної прокатки).

2. За даними кореляційного аналізу оцінюється ступінь зв'язку між факторами і формується кореляційна матриця зв'язаності.

3. У матриці зв'язаності аргументовано виділяються групи сильно зв'язаних факторів, що обумовлюють механізм впливу цієї групи на реалізацію управління.

4. Для зв'язаних груп даних визначаються приватні аргументовані аспекти, як внутрішньої сутності явищ, що відображають інтегрований вплив групи виділених параметрів на ефективність управління.

5. На базі агрегованих оцінок (аспектів) формується критерій оцінки стратегії управління (рейтинг) по сукупності факторів.

#### **Висновки.**

1. Рівняння динаміки основних параметрів прокатки в міжклітьовому проміжку є нелінійним.

2. Безперервний стан варто класифікувати як багатозв'язний нелінійний об'єкт із перемінним запізнюванням.

3. Комплексна багатозв'язна модель прокатного стану повинна враховувати перемінні запізнювання і динаміку натискних пристроїв.

3. Можлива лінеаризації математичної моделі окремої кліті прокатного стану (розроблено Р-канонічну структуру двозв'язної моделі кліті, досліджена ефективність управління кліттю як за допомогою двох незалежних систем регулювання натягу і товщини, так і за допомогою більш досконалої двозв'язної системи управління кліттю).

4. Перспективний спосіб управління безперервним станом, коли в залежності від товщини підкату істотно змінюється тільки швидкість двигуна першої кліті, а швидкості двигунів усіх наступних клітей задовольняють сформульованій умові. Завдяки такому способу управління збурення товщини підкату на вході стану найменш проходить у наступні кліті, що дозволяє значно знизити вимоги до динамічних характеристик систем головного привода і натискних пристроїв, починаючи з другої кліті, а також досить просто реалізувати систему компенсації ексцентриситету валків у суміжних клітях, тому що тут транспортне запізнювання в міжклітьових проміжках, починаючи з другої кліті, інваріантно щодо збурення товщини підкату на вході стану.

5. Основні труднощі при оцінці управління прокатним станом зв'язані з численністю факторів, що впливають на цю оцінку, різноманітністю критеріїв оцінки, неможливістю приведення до єдиної шкали вимірювання, необхідністю урахування взаємного впливу факторів, ситуацій на «ваги» критеріїв, розпливчастості категорій існуючих оцінок. Запропоновано метод формування агрегованих показників якості управління прокатним станом на базі багатокритеріальної оцінки факторів виробництва.

#### **Література**

1. Финстерманн Г. и др. Особенности современного оборудования и технологии бесконечной холодной прокатки // Сталь, №1. - 2004. - С.43-46.

2. Борисов О.О. Автоматичне управління безперервним прокатним станом як багатозв'язним об'єктом // Вісник національного технічного університету «ХПІ», випуск 55. - Харків: НТУ «ХПІ», - 2005. - С. 99-105.

3. Долженков Ф.Б. Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (о некоторых противоречиях современной теории прокатки) // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. №5. - 2003 г. - С.41-45.

4. Мокрий Г.В., Борисов О.О. Розробка алгоритмів верхнього рівня управління в системах автоматичного регулювання процесу листопрокатки // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 88. - Донецьк: ДонНТУ, - 2005. - С.30-37.

5. Кучеряев Б.П., Крахт В.Б. Оценка технологических параметров листовой прокатки // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. №3. - 2005. - С.32-38.