

О.Ю. Потап, В.М. Куваєв, О.О. Бойко,

М.О. Рибальченко, В.І. Шibaкинський, М.О. Потап

МІНІМІЗАЦІЯ МІЖКЛІТЬОВОГО НАТЯГУ НА БЕЗПЕРЕРВНИХ СТАНАХ ЗА ЯКІРНИМИ СТРУМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРОКАТНИХ КЛІТЕЙ

Анотація. Досліджено дієвість методу мінімізації натягу сортового прокату за інформацією про якірні струми головних електроприводів, який базується на гіпотезі про незмінність відношення якірного струму приводу наступної кліті до якірного струму приводу попередньої кліті в режимі вільної прокатки та передбачає прогнозування струму вільної прокатки в прокатних електроприводах за інформацією про струм вільної прокатки в електроприводах попередніх клітей. Дослідження базувалось на комплексній моделі процесу безперервної сортової прокатки у чотирьох чистових клітях дрібносортового стана з індивідуальними електроприводами, оснащеними системами підлеглого керування швидкості.

Шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання доведено, що застосування під час прокатки оперативного переходу від регулювання натягу шляхом коригування завданої частоти обертання електроприводу наступної кліті до безпосереднього регулювання якірного струму у ній в режимі стеження запобігає виникненню динамічних струмів і їхньому впливу на якість регулювання натягу.

Ключові слова: безперервна сортова прокатка, натяг прокату, струм вільної прокатки, регулювання, комп'ютерне імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Головною вимогою до сортового прокату, що висувається його споживачами, є точність геометричних розмірів перетину.

Переважає більшість сортового прокату виробляється на безперервних прокатних станах, особливістю яких є одночасна прокатка заготовки у валках кількох (від 4-х до 15-ти) прокатних клітей. Загально визнано, що основним технологічним збуренням, яке негативно впливає на розміри перетину прокату, є натяг, що виникає в прокаті через неузгодженість швидкостей входу металу до валків наступної і виходу з валків попередньої кліті. Найбільшу чутливість до змін натягу проявляє горизонтальний розмір (ширина) прокат-

© Потап О.Ю., Куваєв В.М., Бойко О.О.,

Рибальченко М.О., Шibaкинський В.І., Потап М.О., 2023

ного профілю. Встановлено, що стабілізація питомого натягу на рівні до 10 Н/мм² звужує коливання ширини прокату до прийняттого рівня [1, 2]. Проте, забезпечення такої стабілізації на практиці стикається з великими технічними труднощами через неможливість прямого вимірювання натягу в сортовому прокаті і відсутність відповідних вимірювачів. Відтак зусилля численних науковців і розробників систем автоматизації впродовж майже 50 років були спрямовані на винайдення непрямих методів регулювання натягу.

Найширшого розповсюдження набули системи автоматичного регулювання натягу (САРН) за інформацією про прогин прокату у проміжках між прокатними клітями [3]. Такі системи, незважаючи на низку притаманних їм недоліків, ефективно вирішують задачу мінімізації натягу при прокатці дрібних сортових профілів в останніх міжклітьових проміжках безперервних дрібносортових станів. На жаль, вони не можуть бути застосовані при прокатці більш масивних профілів та профілів, що мають відчутну згинальну жорсткість, через замалий прогин, зміни якого впродовж прокатки неможливо виміряти. Така ж проблема виникає, якщо малою є відстань між суміжними прокатними клітями.

Отже, винайдення і обґрунтування ефективних методів вимірювання і мінімізації натягу при безперервній сортовій прокатці за відсутності відчутного прогину металу між суміжними прокатними клітями є актуальною проблемою, що потребує нестандартного вирішення.

Інший перспективний підхід до непрямого регулювання натягу пов'язаний з отриманням інформації про натяг зі змін якірного струму прокатних двигунів [4]. Ідея мінімізації натягу за інформацією про якірні струми прокатних двигунів базується на впливі натягу на момент прокатки, а відтак і на момент, що створює електропривод валків. При цьому про спричинені змінами натягу зміни моменту прокатки міркують по змінах якірного струму відповідного прокатного двигуна. Проте, питання однозначної ідентифікації натягу за якірним струмом стикається з низкою суттєвих технічних труднощів і досі не може вважатись вирішеним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій дозволяє виділити два підходи до вирішення проблеми регулювання натягу на сортопрокатних станах з використанням інформації про якірні струми електроприводів.

За першим підходом визнається неможливість коректного визначення натягу впродовж тривалого часу прокатки і пропонується здійснювати регулювання впродовж обмеженого часу лише при прокатці початкової частини роз-

кату [1, 5]. Сутність цього підходу полягає у фіксації (запам'ятовуванні) якірного струму приводу першої за ходом прокатки кліті певного міжклітьового проміжку перед надходженням прокату до наступної кліті, порівнянні поточного якірного струму приводу першої кліті із зафіксованим струмом вільної прокатки, який розглядається як уставка, та подальшому регулюванні якірного струму першої кліті шляхом впливу на частоту обертання приводу наступної кліті. Тобто, якщо якірний струм приводу попередньої кліті після входження заготовки до наступної кліті зазнав змін через виникнення натягу, здійснюють коригування частоти обертання приводу наступної кліті аж до усунення натягу, про що свідчитиме повернення якірного струму приводу попередньої кліті до зафіксованого значення струму вільної прокатки.

Відносна простота описаного підходу нівелюються низькою точністю стабілізації натягу через дію технологічних збурень. Дійсно, в реальних умовах зміни моменту прокатки (якірного струму приводу) залежатимуть не тільки від зміни натягу, але й від змін температури прокату, що надходить до кліті, висотного розміру підкату тощо. Тобто зафіксований струм вільної прокатки, що мав місце при прокатці початкової ділянки заготовки, відповідає температурі і висоті саме цієї ділянки заготовки, а отже його стабілізація аж ніяк не гарантує стабілізації натягу по всій довжині заготовки.

Втім САРН, що використовують інформацію про якірні струми прокатних двигунів, все ж таки застосовуються на практиці, хоча і в дещо «урізаному» вигляді [5]. При цьому виходять з того, що стрибкоподібне зміна якірного струму в двигуні попередньої кліті, що спостерігається в момент входження прокату до валків наступної кліті, скоріш за все, спричинена саме натягом, що виник у цей момент, а ймовірність різкої зміни інших технологічних збурень саме в цей момент є замалою. В такому випадку можна на короткий час дозволити регулювання якірного струму двигуна попередньої кліті, а після відновлення в ньому струму вільної прокатки припинити процес регулювання. Іншими словами, регулювання натягу дозволяється тільки тоді, коли є впевненість, що умови прокатки в попередній кліті не встигли помітно змінитися і зареєстроване значення якірного струму відповідає струму вільної прокатки.

Отже, САРН з обмеженням часу регулювання здійснює короткочасне «підстроювання» швидкісного режиму під час проходження переднього кінця розкату крізь стан. При цьому прокатка більшої частини заготовки здійснюється без регулювання.

Прибічники другого підходу, до регулювання натягу за якірними струмами прокатних електроприводів, до яких, зокрема, належать НДІАчормет (Україна), Інститут чорної металургії (Україна), GEP Industrie-Systeme GmbH (Німеччина) тощо, намагаються поширити процес мінімізації натягу на всю довжину заготовки [6, 7]. Цей підхід базується на припущенні, що в режимі вільної прокатки якірний струм приводу наступної кліті є подібним до якірного струму попередньої кліті, тобто відношення якірного струму приводу наступної кліті до якірного струму приводу попередньої кліті в режимі вільної прокатки залишається незмінним. При цьому пропонується після усунення натягу на передньому кінці розкату обчислити і запам'ятати відношення

$$k = \frac{I_{i+1}(t)}{I_i(t - \tau)} \quad (1)$$

якірного струму електроприводу наступної кліті $I_{i+1}(t)$ до якірного струму електроприводу попередньої кліті $I_i(t - \tau)$, що мав місце при прокатці тієї ж самої ділянки прокату. Це дозволяє в подальшому визначати бажане (задане) значення $I_{i+1}^*(t)$ струму електроприводу наступної кліті за формулою

$$I_{i+1}^*(t) = k I_i(t - \tau), \quad (2)$$

де τ – час переміщення прокату від i -тої до $(i+1)$ -ої кліті і підтримувати його на заданому рівні за допомогою системи, що стежить.

Очевидно, що можливість практичної реалізації описаного підходу до мінімізації натягу на усій довжині прокату і його ефективність цілковито залежать від достовірності гіпотези, на якій він базується. З огляду на принципову неможливість здійснити її доведення експериментальним шляхом єдиним ефективним методом розв'язання зазначеної проблеми є імітаційне комп'ютерне моделювання.

Певною технічною проблемою на шляху реалізації другого підходу виступає виникнення динамічних струмів в якірних ланцюгах під час коригування частоти обертання валків. Динамічна складова суттєво спотворює струм $I_i(t - \tau)$, і перешкоджає визначенню завдання $I_{i+1}^*(t)$ за формулою (1) впродовж здійснення зазначеного коригування, унеможливаючи дотримання режиму вільної прокатки на всій довжині прокату. Перспективні пропозиції з вирішення зазначеної проблеми містяться в роботі [8], де авторами береться до уваги, що головні електроприводи сучасних безперервних сортопрокатних станів оснащені двоконтурними автоматизованими системами підлеглого ре-

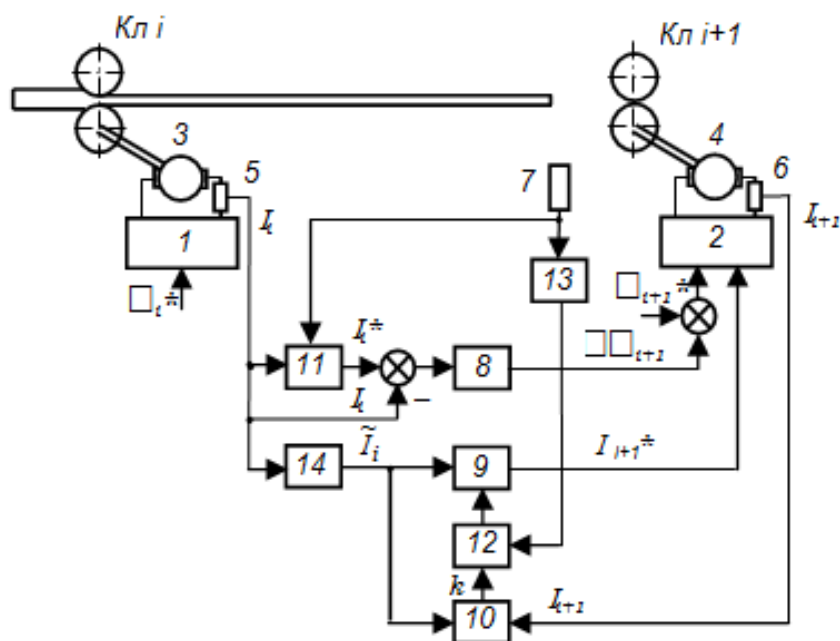
гулювання частоти (СПРЧ) з внутрішнім контуром регулювання струму якоря та зовнішнім – регулювання частоти обертання.

У запропонованій в [8] системі (рис. 1):

- в момент спрацьовування датчика 8, що безпосередньо передуює входженню прокату до наступної кліти, запам'ятовують якірний струм електроприводу 3 попередньої кліти;

- після входження прокату до валків наступної кліти усувають розбіжність ΔI між поточним I_1 та зафіксованим I_1^* значеннями якорного струму електроприводу попередньої кліти, коригуючи завдання ω_2^* частоти обертання електроприводу 4 наступної кліти на величину $\Delta\omega_2^*$;

- після усунення зазначеної розбіжності ΔI визначають і фіксують відношення k за формулою (1), визначають бажане значення I_2^* струму електроприводу наступної кліти за формулою (2) та подають його в якості завдання на вхід контуру регулювання струму ПСРЧ2 з одночасним відключенням регулятора частоти.



- 1 та 2 –автоматичні системи підлеглого регулювання частоти (СПРЧ) обертання прокатних двигунів 3 та 4; 5 та 6 – вимірювачі струму; 7 – датчик наявності прокату; 8 – регулятор натягу; 9 та 10 – блоки множення та ділення; 11 та 12 – блоки пам'яті; 13 – блок часової затримки; 14 – блок чистого запізнювання

Рисунок 1 – Функціональна схема системи автоматичної мінімізації натягу прокату в одному з проміжків безперервного сортового стана

Теоретично за такої роботи системи динамічний струм взагалі не повинен спостерігатись як у приводі попередньої кліті при регулюванні натягу на передньому кінці прокату, так і в приводі наступної кліті під час регулювання натягу впродовж прокатки основної частини прокату. Проте, можливість практичної реалізації системи потребує додаткових досліджень.

Метою статті є дослідження дієвості методу мінімізації натягу сортового прокату за інформацією про якірні струми головних електроприводів, який базується на гіпотезі про незмінність відношення якірного струму приводу наступної кліті до якірного струму приводу попередньої кліті в режимі вільної прокатки та доведення ефективності коригування швидкісного режиму безперервної прокатки шляхом безпосереднього регулювання якірних струмів

Опис методики проведення дослідження. Розробка нових алгоритмів для систем автоматичного управління багатозв'язним процесом виробництва сортового прокату на безперервних станах неминуче стикається з необхідністю експериментальної перевірки їхньої ефективності та порівняльного аналізу з системами аналогічного призначення за точністю, швидкодією, частотними характеристиками тощо. Проте, організація промислового експерименту на діючому обладнанні представляє собою надзвичайно складний в організаційному плані та занадто витратний захід, пов'язаний з високою імовірністю аварій. До того ж для розробників принципово важливо отримати позитивну відповідь на питання про дієвість системи та визначити орієнтовні показники якості ще до початку проектування [1, 3]. З огляду на це чи не єдиним ефективним методом розв'язання зазначеної проблеми є імітаційне комп'ютерне моделювання роботи систем.

Виходячи з цього в роботі обґрунтовано:

- структуру моделі прокатки у чистовій групі клітей безперервного сортопрокатного стану,
- математичний опис процесу прокатки в окремих прокатних клітях та модель формування натягу у міжклітьових проміжках;
- моделі електроприводів прокатних клітей;
- модель власне САПР, що убудована до моделі технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів.

Структура моделі процесу прокатки та САРН.¹ Запропонована структура моделі процесу однокиткової безперервної прокатки наведена на рис. 2. Модель містить низку типових блоків, що моделюють геометричні, кінематичні та енергосилові параметри прокатки в клітках (блоки **KL**), стан металу в міжквіттьових проміжках (блоки **PR**), роботу головних електроприводів прокатних клітей (блоки **EP**) та власне САРН (блоки **SARN**), а також імітують параметри заготівки (блок **IZ**).

Вхідними змінними кожного блоку **KL_i**, що моделює процес деформації металу в кліті, є геометричні розміри (ширина b_{0i} та висота h_{0i}) підкату, передній $\sigma_{i,i+1}$ та задній $\sigma_{i-1,i}$ натяг, а також частота n_i обертання прокатного двигуна та міжвалковий зазор z_i . До вихідних змінних блоків **KL_i** відносяться геометричні розміри (ширина b_{1i} та висота h_{1i}) на виході з кліті, швидкість металу на вході V_{0i} та виході V_{1i} , а також момент M_i прокатки.

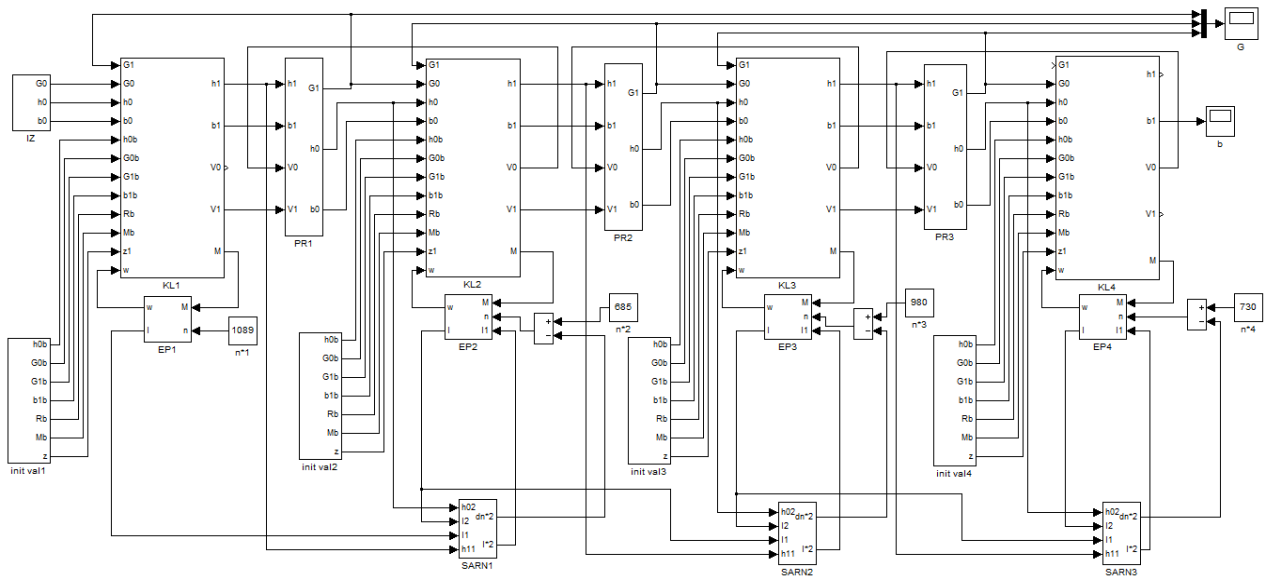


Рисунок 2 - Структура моделі процесу безперервної сортової прокатки в пакеті MATLAB Simulink

Розрахунок натягів в моделі здійснюється в блоках **PR_{i,i+1}**, що моделюють стан металу в проміжках між клітками. Вхідними змінними цих блоків є швид-

¹ У налаштуванні моделі та проведенні на ній експериментальних досліджень брав участь магістр С.В. Біневич

кість прокату на виході з попередньої V_{li} та на вході до наступної V_{oi+1} кліті, а також геометричні розміри прокату b_{li} та h_{li} на виході з попередньої кліті. На вихід же блоків $\mathbf{PR}_{i,i+1}$ видається питомий натяг $\sigma_{i,i+1}$ та геометричні розміри b_{oi+1} і h_{oi+1} прокату на вході до наступної кліті. При цьому значення геометричних розмірів прокату на вході в наступну кліть повторюють значення на виході з попередньої з транспортним запізненням, що відповідає часу переміщення металу через міжклітьовий проміжок.

В блоках \mathbf{EP}_i моделюється робота головних електроприводів прокатних клітей. На виході зазначених блоків формується поточне значення частоти обертання прокатного двигуна, а вхідними змінними виступають задані значення n_i^* частоти обертання та момент опору на валу двигуна, що являє собою момент M_i прокатки в даній кліті.

На виходах блоків \mathbf{SARN}_i згідно з раніше наведеним алгоритмом формуються доданки до уставок частоти обертання та уставки якірного струму відповідних електроприводів.

Математичний опис процесів в зоні деформації. В практиці моделювання процесів, що відбуваються в осередку деформації при безперервній гарячій прокатці, набули популярності два типи моделей. В моделях першого типу виходять з припущення, що зміни технологічних параметрів прокатки відбуваються в межах незначних відхилень від базових значень за лінійним законом [9]. При цьому рівняннях, що використовуються для визначення таких параметрів, записують у лінійних прирощеннях з відповідними постійними коефіцієнтами. На жаль результати застосування таких моделей не можна вважати достовірними при значних відхиленнях параметрів через відповідність застосовуваних коефіцієнтів лише для фіксованого режиму налаштування процесу.

Основу моделей другого типу складають рівняння, що базуються на формулах, відомих з теорії поздовжньої прокатки [10, 11]. Вони певною мірою вільні від недоліків моделей першого типу, завдяки чому дозволяють глибше оцінити отримані результати і викликають у дослідників більшу довіру.

Привабливість моделі другого типу через простоту інтерпретації результатів моделювання зумовила використання в даній роботі моделі процесу деформації металу у кліті безпервного дрібно сортного стана з роботи [11].

Математичний опис процесів в міжклітьовому проміжку. Згідно з дослідженнями [1], натяг в міжклітьовому проміжку визначається відносною не-

узгодженістю швидкостей кінцевих перерізів прокату $\Delta v_{i,i+1} = \frac{(V_{0,i+1} - V_{1,i})}{V_{1,i}}$ та пов'язаний з нею виразом

$$\sigma_{i,i+1}(t) = E \Delta v_{i,i+1}(t) [1 - \exp(-V_{0,i+1} t / L_0)],$$

де E - модуль пружності матеріалу прокату, L_0 – відстань між клітями.

Якщо розглядати $\sigma_{i,i+1}(t)$ та $\Delta v_{i,i+1}(t)$ як вихідну та вхідну величини динамічної ланки, що характеризує поведінку прокату в міжклітьовому проміжку, то відношення їхніх перетворень за Лапласом визначить функцію передачі $W_{i,i+1}(p)$

$$W_{i,i+1}(p) = \frac{\sigma_{i,i+1}(p)}{\Delta v_{i,i+1}(p)} = \frac{K_{i,i+1}}{T_{i,i+1} p + 1} \quad (6)$$

де $K_{i,i+1} = E$ – коефіцієнт підсилення, а $T_{i,i+1} = L_0 / V_{0,i+1}$ – постійна часу аперіодичної ланки. Отже модель формування натягу у міжклітьовому проміжку має вигляд, що наведений на рис. 3.

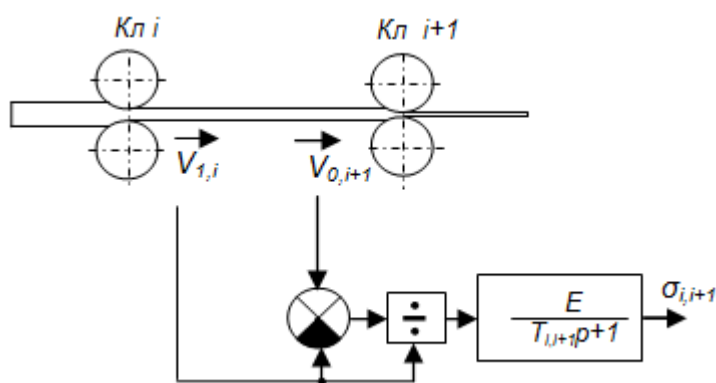


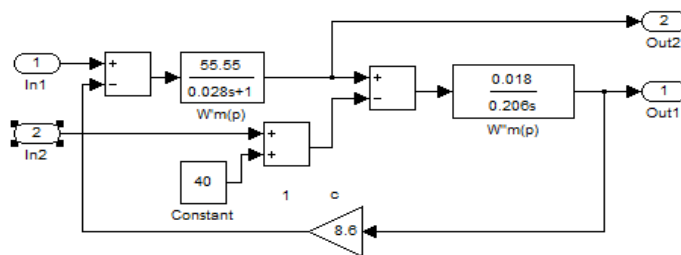
Рисунок 3 – Модель натягу у міжклітьовому проміжку

Модель електроприводу прокатних клітей. Тип та параметри регуляторів струму та частоти для електроприводів горизонтальних і вертикальних чистових клітей, що встановлені, зокрема, на дрібносортовних станах 250 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" і мають потужність 580 КВт та 200 КВт відповідно, були визначені за відомою інженерною методикою, що описана в роботі [1] (див. табл. 1).

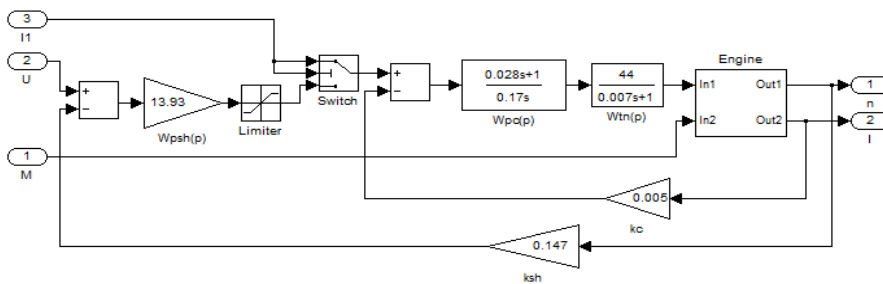
Схема моделі електроприводу, що реалізована засобами MATLAB-Simulink, наведена на рис. 4. Наявність у схемі перемикача Switch забезпечує підключення до входу струмового контуру заданого значення струму, що сформований САРН

Розрахункові параметри ПСРЧ для електроприводів безперервного дрібносортового стану

Параметри ПСРЧ	Привод кліті	
	горизонтальної	вертикальної
Функція передачі тиристорного перетворювача	$\frac{44}{0,007 p + 1}$	
Функція передачі ПІ- регулятора струму	$\frac{0,028 p + 1}{0,17 p}$	$\frac{0,026 p + 1}{0,22 p}$
Коефіцієнт передачі ПІ-регулятора швидкості	13.93	87.46
Коефіцієнт передачі датчика струму, В/А	0.005	0.01
Коефіцієнт передачі датчика швидкості, В·с /рад	0.147	0.0955



а



б

Рисунок 4 – Схема моделі електродвигуна прокатної кліті (а) та двоконтурної СПРЧ (б) в пакеті MATLAB Simulink

Модель САРН. Схема блоку $SARN_i$, що моделює систему регулювання натягу в одному з міжклітьових проміжків наведена на рис. 5.

Значення якірного струму попередньої кліті I_i^* запам'ятовується в блоці пам'яті $ZU1$ по закінченні заданої у блоці $T1$ часової затримки від моменту ви-

явлення прокату на виході першої кліті ($h_{11} > 0$). Це зафіксоване у блоці **ZU1** значення струму вільної прокатки порівнюється в елементі порівняння **Comp1** із поточним значенням струму I_1 . Результат порівняння надходить на вхід регулятора натягу **PID** через перемикач **Switch1**. Перемикач відкривається вихідним сигналом блока **Comp2** на обмежений час, заданий у блоці чистого запізнення **T2**, що відповідає часу регулювання натягу. При цьому відлік часу регулювання розпочинається з моменту появи смуги на вході наступної кліті ($h_{02} > 0$). Керуючий вплив у вигляді коригуючої добавки dn_2 до завдання n_2^* частоти обертання привода наступної кліті надходить на вхід блоку, що моделює електропривод.

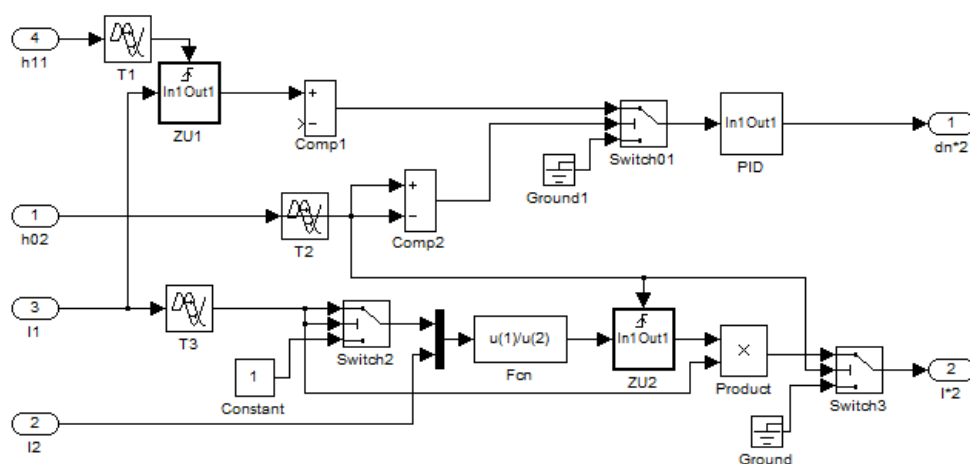


Рисунок 5 – Схема моделі САРН в пакеті MATLAB Simulink

У блоці **Fcn** за формулою (1) обчислюється коефіцієнт k , блок **ZU2** запам'ятовує цей коефіцієнт, а в блоці **Product** множення за формулою (2) обчислюється бажане поточне значення I_2^* якірного струму двигуна наступної кліті, що відповідає струму вільної прокатки в ній.

Блок **T3** транспортного запізнення забезпечує використання для розрахунку I_2^* того значення струму \tilde{i}_1 , що спостерігалось у приводі попередньої кліті при прокатці в ній тієї ж ділянки розкату.

Методика та результати моделювання. Моделювання здійснювали для умов прокатки круглого профілю діаметром 12 мм в останніх чотирьох чистових клітках дрібносортового стана 250-2 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг". Для спрощення моделювання було здійснено перехід від прокатки у калібрах до прокатки на гладких валках за методом відповідної смуги.

На виході блоку **IZ** імітації збурень (див. рис. 2) поточні значення висоти $h_{0b,1}$ і ширини $b_{0b,1}$ підкату на вході до кліті №1 формували як змінні, що лі-

нійно зростають у часі з інтенсивністю 0,02 мм/с від початкових значень 13,53 мм і 16,48 мм відповідно, та зазнають розподілені за нормальним законом випадкових відхилень з нульовим математичним очікуванням та середнім квадратичним відхиленням 0,02 мм. Такий чином імітували реальні змінення розмірів підкату, що спостерігаються на практиці в тому числі через вплив технологічних збурень.

На першому етапі моделювали процес безперервної прокатки у чотирьох клітках за відсутності САРН, маючи на меті перевірку адекватності створеної моделі.

Як відомо, адекватність моделей складних, багатозв'язних об'єктів, до яких належать безперервні прокатні стани, не може бути доведена класичними методами, зокрема, через надмірну складність і витратність постановки промислового експерименту та неможливість відтворення при моделюванні умов, що мали місце під час експерименту, для коректного зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними [1].

Тому адекватність моделі довели зіставленням якісних і кількісних ефектів взаємного впливу різних модельованих параметрів з аналогічними ефектами, наявність яких однозначно встановлена на практиці і підтверджується досвідом промислової експлуатації об'єкта автоматизації. Зокрема, аналіз отриманих при моделюванні результатів показав, що значення геометричних (ширина), кінематичних (швидкість прокатки) і енергосилових (момент прокатки) параметрів перебували у прийнятних межах, а ефекти їх взаємного впливу та впливу на них переднього і заднього натягу, що спостерігались, цілком узгоджуються з існуючими уявленнями про закономірності модельованого процесу. Це дозволяє вважати, що створена динамічна модель чистової групи клітей безперервного дрібносортового стана адекватно описує процес прокатки та може бути використана для апробації створеної САРН.

Після вирішення питання щодо адекватності моделі вона була налаштована на прокатку з великими натягами. Для цього внесли розузгодження до частоти обертання електроприводів. Як впливає з наведених на рис. 6 експериментальних осцилограм, натяг в кожному з трьох міжклітьових проміжків (рис. 6,а) перевищує припустиме значення 10 Н/мм², сягаючи 20-25 Н/мм². При цьому ширина прокату на виході з останньої кліті (рис. 6,б), яка за завданням має становити 11.5 мм, змінюється в діапазоні 10.5 - 11.0 мм, тобто виходить далеко за межі поля допуску.

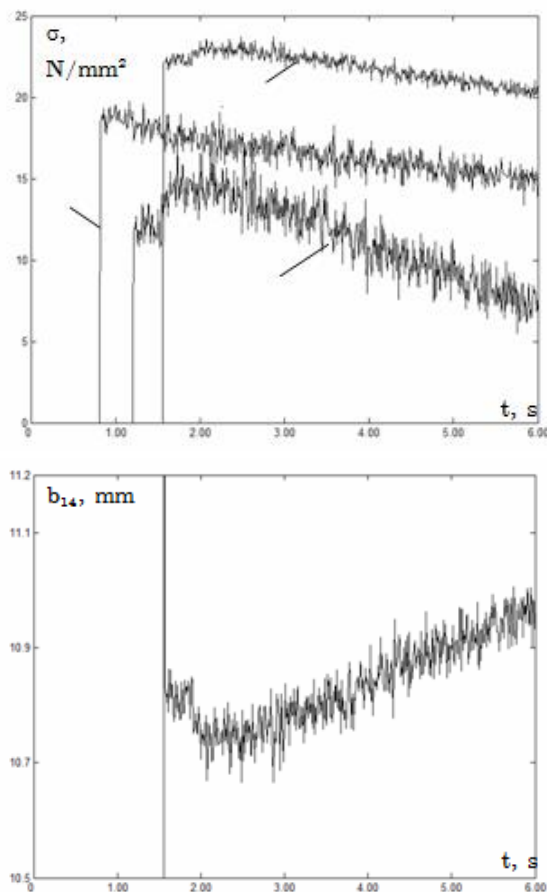


Рисунок 6 – Результати моделювання процесу прокатки за відсутності САРН

На другому етапі роботу створеної САРН досліджували на моделі, що була налаштована на прокатку з великими натягами. Наведені на рис. 7,а експериментальні осцилограми натягів свідчать, що після входження розкату до 2-ої ($t= 0.77$ с), 3-ої ($t= 1.15$ с) та 4-ої ($t= 1.49$ с) клітей в кожному зпроміжків виникає великий натяг (від 18 Н/мм^2 до 28 Н/мм^2). Процес регулювання натягу на передньому кінці розкату, що триває $0,3$ с, знижує його до прийняттого рівня $5-8 \text{ Н/мм}^2$. Після цього САРН формує за формулою (2) бажане значення (уставку) якісного струму для електропривода кожної наступної кліті.

Аналіз струмових осцилограм одного з електроприводів (рис. 8) доводить високу якість роботи регулятора струму і підтверджує ефективність коригування частоти уведенням керуючого впливу безпосередньо до струмового контуру системи підлеглого регулювання частоти привода.

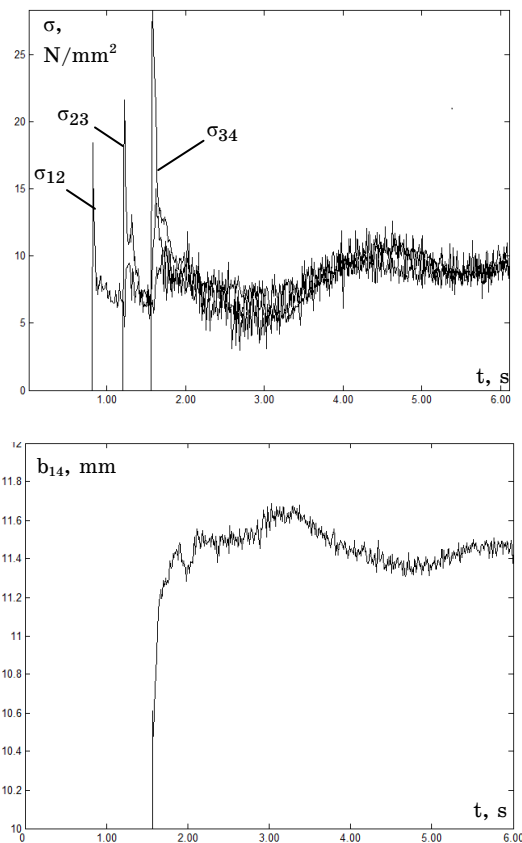


Рисунок 7 – Результати моделювання процесу прокатки в умовах функціонування САРН

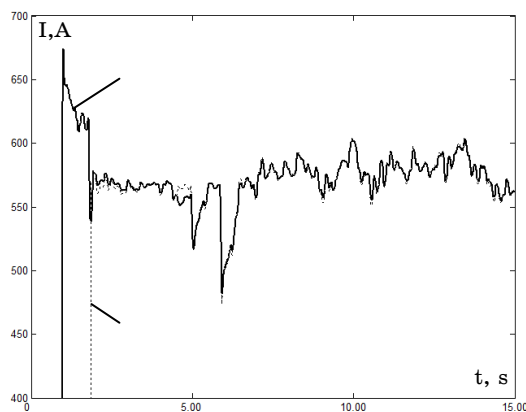


Рисунок 8 – Осцилограми сформованої САРН уставки та поточного якірного струму електродвигуна 3-ої кліті під час регулювання натягу

Результати комп'ютерного експерименту (рис.7,а) свідчать, що САРН впродовж усього процесу прокатки підтримує натяг у всіх міжклітьових промі-

жках на мінімальному рівні (близько 10 Н/мм²). Ширина прокату на виході зі стана (рис. 7,б) на усій довжині розкату перебуває в межах поля допуску (11.4 - 11.55 мм), що також вказує на високу ефективність системи.

Разом с тим необхідно визнати, що ефективна робота досліджуваної САРН потребує попереднього ретельного налаштування параметрів регулятора натягу (блок 8 на рис. 1 та блок PID на рис. 5), який забезпечує усунення натягу на передньому кінці розкату. Через обмежений час його роботи (адже процес регулювання має завершитись до входження прокату до наступної кліті проміжку) швидкодія стає критичним показником системи. Проведені авторами дослідження свідчать, що процедура налаштування значно спрощується, якщо прокатка ведеться на менших швидкостях, що має місце при прокатці профілів з більшого розміру.

Висновки. 1. В умовах безперервної прокатки сортових профілів з відсутнім або занадто малим прогином металу між суміжними прокатними клітями найбільш перспективним є регулювання натягу за інформацією про якірні струми головних електроприводів.

2. Запропоновано новий спосіб мінімізації натягу на усій довжині розкату, що базується на гіпотезі про подібність якірних струмів у суміжних клітках в режимі вільної прокатки.

3. З огляду на принципову неможливість апробації запропонованого способу методами промислового експерименту, перевірка його роботоспроможності потребує проведення комп'ютерного імітаційного моделювання.

4. Створена комп'ютерна модель дозволяє здійснювати адекватне імітаційне моделювання роботи САРН в умовах сортової прокатки у безперервній групі клітей з точністю, що є достатньою для висновків щодо ефективності її роботи.

5. Результатами дослідження системи шляхом комп'ютерного моделювання доведена ефективність її роботи, зокрема, зменшення питомого натягу в усіх міжкліткових проміжках чистової групи клітей до прийняттого рівня 10 Н/мм² та суттєве звуження діапазону змінення ширини готового прокату.

6. Подальші розвідки доцільно спрямувати на опрацювання інженерної методики налаштування параметрів регулятора натягу, що забезпечує усунення натягу на передньому кінці розкату, за критерієм максимальної швидкодії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография/ А.С. Бешта, В.Н. Куваев, О.Е. Потап, А.П. Егоров. Днепропетровск: Журфонд, 2014. 283 с.
2. Kuzmenko M., Active control system of mill products tension at the outlet of roughing train in continuous light-section mill, M. Kuzmenko, M. Rybalchenko, O. Boyko, D. Beshta/ Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, Scientific and technical journal, 2018. №5 (167). P. 122 – 129.
3. Система АСРП – история создания и внедрения / Ю.П.Карпинский, В.Н. Куваев, О.Н. Кукушкин, В.А. Чигринский // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр-ов Института черной металлургии НАН Украины им. З.И. Некрасова; вып.17. 2008. С. 301-310.
4. Куваев В.Н Идентификация межклетьевых усилий при непрерывной прокатке по статическому моменту нагрузки электроприводов клетей // Науковий вісник Національного гірничого університету. №7-8. С.77-81.
5. Автоматичне управління режимом прокатки з натягом на основі зміни струму якоря двигунів приводу валків/ О.П. Егоров, В.Б. Зворикін, О.І. Михальов, М.Ю. Кузьменко// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 5 (112). Дніпро, 2017. С.108 -118.
6. Авт. свид. СССР № 1397110. Устройство стабилизации натяжения проката на непрерывном стане / НИИАчермет; Авт.: А.П. Егоров, В.С. Егоров, М.П. Пустыльник и др. МПК В21В 37/00. Заявка №4097500/23-02. Опубл. в БИ № 19, 1988.
7. Патент України № 26896 Спосіб визначення дійсних значень зусиль розтягання матеріалу, що прокатується в багатоклітьовому стані безперервної прокатки/GER Industrie-Systeme GmbH, МПК В21В 38/06, Опубл. 29.12.1999. Бюл. № 8.
8. Патент України № 124398. Спосіб автоматичної мінімізації натягу прокату на безперервному сортовому стані/ НМетАУ/ О.Ю. Потап, М.О. Рибальченко, С.О. Біневич. МПК В21В 37/52. Заявка № а201910384. Опубл. 08.09.2021. Бюл. № 36.
9. Исследование системы компенсации межклетевых усилий в черновой группе прокатного стана методом математического моделирования / А.Г. Шубин, А.Н. Гостев, Р.Р.Храмшин и др. // Теория и практика автоматизированного электропривода. ЭСик. №4(29). 2015.
10. Моделирование многосвязных систем управления скоростным режимом прокатки на непрерывном мелкосортном стане// В.Б. Зворыкин, А.П. Егоров, 38

А.И. Михалев, М.Ю. Кузьменко / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 5 (106). Дніпро, 2016. С. 36-44.

11. Динамическая модель двухниточной прокатки в черновой группе клетей мелкосортного стана / А.С. Бешта, В.Н. Куваев, А.П. Егоров, О.Е. Потап и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 119-122.

REFERENCES

1. A.S. Beshta, V.N. Kuvaev, O.E. Potap, A.P. Egorov (2014) “Automation of technological processes on light-section rolling mills”: monograph/. Dnepropetrovsk: Zhurfond - 283 p.

2. Active control system of mill products tension at the outlet of roughing train in continuous light-section mill, M. Kuzmenko, M. Rybalchenko, O. Boyko, D. Beshta/ *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Scientific and technical journal, 2018. №5 (167). P. 122 – 129.

3. System ASRS – the history of creation and implementation / [Yu.P. Karpinsky, V.N. Kuvaev, ON Kukushkin, V.A. Chigrinsky] // «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». *Sat. Sci. Of the Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine*. Z.I. Nekrasov; Issue.17. 2008. P.301 - 310.

4. Kuvaev V.N. Identification of interstand efforts at continuous rolling on static loading moment of stand’s electric drives// *Naukovyy visnyk Natsional’noho hirnychoho universytetu*. P.77-81.

5. Automatic control of the rolling regime with tension based on the change in armature current of the roll drive mo-tors/ A. Egorov, V. Zvorykin, A. Mikhalyov, M. Kuzmenko// *System technologies*. N 5(112). Dnipro, 2017. P.108 - 118.

6. The patent 1397110 USSR, IPC B21B 37/00. Device for stabilizing rolled tension on a continuous mill. SHEE “NSU”.- №4097500/23-02. Publ. 23.05.1988. Bull. Number 19 (1988).

7. The patent 26896 Ukraine, IPC B21B 38/06. The method of determining the actual values of the tensile forces of the material rolled in the multi-cell state of continuous rolling. Publ. 29.12.1999. Bull. Number 8 (1999).

8. The patent 124398 Ukraine, IPC (2014.01) B21B 37/52. The method of automatic minimization of rolled tension on a continuous bar mill, SHEE “NSU”. - № a201910384. Publ. 08.09.2021. Bull. Number 36 (2019).

9. A.G.Shubin, A.N.Gostev, R.R. Khamshin, K.E. Odintsov (2015) “System of interstand tension compensation in roughing train of rolling mill research using mathematical modeling method”, *Teoriya i praktika avtomatizirovannogo elektroprivoda*. №4 (29)

10. Modeling multiply connected control system of high-speed rolling mode to continuous light-section mill/ V.B. Zvorykin, A.P. Egorov, A.I. Mikhalyov, M.U. Kuzmenko // System technologies. N 5(106). Dnipro, 2016. P.36 - 44.
11. Dynamic model of two-strand rolling in the roughing train of the light-section mill/ A. Beshta, A. Egorov, V. Kuvaev, O. Potap et al.// Metallurgical and Mining Industry. 2015. №2. P. 119-122.

Received 04.12.2023.

Accepted 08.12.2023.

***Minimization of interstand tension on continuous grade rolling mills
by armature currents of electric drives of roll mill stands***

In the conditions of continuous rolling of graded profiles with no or too little metal deflection between adjacent rolling cages, the most promising is tension regulation based on information about the armature currents of the main electric drives.

The effectiveness of the method of minimizing the tension of graded rolled products based on information about the armature currents of the main electric drives was investigated. The method is based on the hypothesis of the constant ratio of the armature current of the drive of the next cage to the armature current of the drive of the previous cage in the free rolling mode. The method involves predicting the free-rolling current in rolling electric drives based on information about the free-rolling current in the electric drives of previous cages. The study is based on a complex model of the process of continuous bar rolling in four finishing cages of a small-grade mill with individual electric drives equipped with subordinate speed control systems.

Given the fundamental impossibility of approbation of the proposed method by the methods of an industrial experiment, verification of its operability requires computer simulation modeling.

The created computer model allows for adequate simulation of the operation of the control system in the conditions of rolling in a continuous group of cages with an accuracy that is sufficient for conclusions about the effectiveness of its operation.

According to the results of the study of the control system by means of computer simulation, the effectiveness of its work was proven, in particular, the reduction of the specific tension in all intercell spaces of the finishing group of roll stands to an acceptable level of 10 N/mm² and a significant narrowing of the range of changes in the width of the finished rolled product.

Keywords: continuous bar rolling, minimization of rolling tension, prediction of current of the free rolling, current regulation, computer simulation modeling.

Потап Олег Юхимович – к.т.н, професор, кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Куваєв Володимир Миколайович – д.т.н, професор, кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Бойко Олег Олександрович – к.т.н, доцент, кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Рибальченко Марія Олександрівна – к.т.н., завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Шибакінський Володимир Іванович – к.т.н., доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Потап Михайло Олегович – магістр, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Potap Oleg - professor, department of automation of production processes, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

Kuvaiev Volodymyr – professor, department of software of computer systems, Dnipro University of Technology.

Boyko Oleg – associate professor, department of cyberphysical and information-measuring systems? Dnipro University of Technology.

Rybalchenko Maria –head of department of automation of production processes, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

Shybakinskyi Volodymyr – associate professor, department of automation of production processes, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

Potap Mykhailo – master Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.