

О.Ю. Потап, М.Д. Зінченко, М.А. Рибальченко, М.О. Потап
**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ
СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ
ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ**

Анотація. Створено комп'ютерну модель автоматизованої системи компенсації ексцентриситету валків (АСКЕ), робота якої базується на активному пошуковому алгоритмі визначення параметрів ексцентриситету. Результати проведеного імітаційного моделювання підтвердили ефективність АСКЕ та її спроможність одночасно компенсувати ексцентриситет опорних та робочих валків з високою точністю.

Ключові слова. Ексцентриситет, автоматизована система, комп'ютерна модель, вузькосмуговий фільтр Бесселя, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Формування товщини листового прокату під час прокатки має низку особливостей, які пов'язані зі впливом різних технологічних факторів. Лише компенсація цього впливу може забезпечити стабілізацію товщини з необхідною точністю. З огляду на складність компенсації найбільш «неприємним» є вплив ексцентриситету прокатних валків, який виникає через неточності їхнього виготовлення. Неконтрольовані гармонічні коливання зазору між валками, що виникають через наявність ексцентриситету призводять до відповідних змін товщини прокату, створюючи загрозу виникнення браку.

Довгий час роботи зі зменшення впливу ексцентриситету валків на точність прокату стримувались низькою швидкістю електромеханічних натискних пристроїв, які використовувались на прокатних клітках. Дослідження методів компенсації ексцентриситету отримали суттєвого розвитку з появою гідравлічних натискних пристроїв, яким властива на порядок вища за електромеханічні пристрої швидкодія [1-3]. Проте остаточного вирішення задача так і не дістала й досі зберігає свою актуальність.

Аналіз патентної активності щодо розробки методів компенсації ексцентриситету та створення відповідних систем автоматизації (див. рис. 1.), що спостерігалась у світі з 1960 року по теперішній час, дозволив виявити близько 80-ти оригінальних технічних рішень, які були створені у колишньому СРСР, США, Німеччині, Великій Британії, Франції, Японії тощо. Як впливає з рис. 1, найбільша активність винахідників припадає на період з 1970р. по 1990 р.

Проте, суттєве зниження кількості патентів після 1990 року свідчить скоріш не про вирішення зазначеної технічної проблеми, а про її складність і вичерпання можливостей для її вирішення, що містились у залучених на той час підходах.

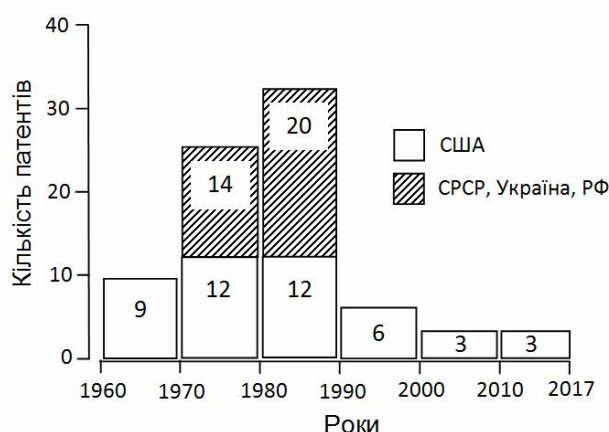


Рисунок 1 – Патентна активність
в галузі компенсації ексцентриситету

Анализ публикаций за темою дослідження. Розгляд за суттю відомих технічних рішень щодо компенсації ексцентриситету прокатних валків на станах гарячої і холодної прокатки свідчить про перспективність підходу, який передбачає виділення змінних складових зусилля прокатки та/або товщини прокату, що обумовлені ексцентриситетом валків, та використання отриманої інформації для корекції міжвалкового зазору. Цей підхід (рис. 2) передбачає здійснення за допомогою системи 1 управління гідронатискним пристроєм примусових гармонічних коливань $\Delta S(t)$ міжвалкового зазору у протифазі до неконтрольованих коливань зазору, спричинених ексцентриситетом валків. При цьому уставка на примусові коливання формується генератором 2, а їхні параметри: амплітуда ΔS_e та фаза ϕ , визначаються у блоці 3 за різними алгоритмами, які, власне, і

відрізняють відповідні патенти. Зокрема, в роботі [4] було опрацьовано алгоритм активного пошуку, який передбачає уведення «пробних» примусових гармонічних коливань міжвалкового зазору. В технічному рішенні [5] цей алгоритм було деталізовано і реалізовано в автоматизованій системі компенсації ексцентриситету (АСКЕ), яка:

1) вимірює частоту ω обертання опорних валків, зусилля P прокатки та товщину h смуги на виході прокатної кліті;

2) виділяє змінні складові зусилля прокатки та товщини смуги, які мають частоту, що дорівнює частоті обертання опорних валків;

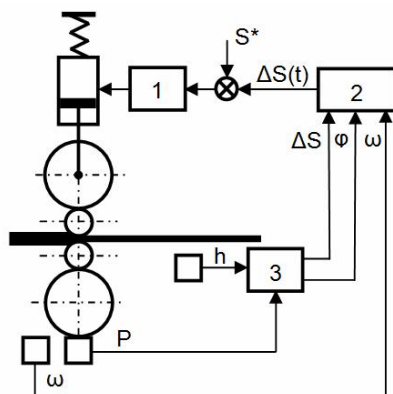


Рисунок 2 – Узагальнена схема компенсації ексцентриситету

3) при прокатці початкової ділянки смуги визначає амплітуди виділених змінних складових зусилля прокатки ΔP_e та товщини смуги Δh_e ;

4) по визначенні зазначених у п. 3 амплітуд обчислює амплітуду ΔS_e неконтрольованого змінення міжвалкового зазору через ексцентриситет валків за формулою

$$\Delta S_e = \Delta h_e + \frac{\Delta P_e}{M_K}, \quad (1)$$

де M_K – модуль жорсткості кліті;

5) здійснює примусове гармонічне змінення міжвалкового зазору з частотою ω , амплітудою ΔS_e та довільною фазою ϕ ;

6) після уведення за п. 5 примусових гармонічних коливань міжвалкового зазору вимірює амплітуду $\Delta h_{\max}$ змінної складової товщини на відповідній ділянці смуги і обчислює зсув фази $\Delta \phi$ за формулою

$$\Delta\varphi = \pi - 2 \arccos\left(\frac{\Delta h_{max}}{2\Delta h_e}\right); \quad (2)$$

7) змінює фазу φ примусового гармонічного змінення міжвалкового зазору на величину $\Delta\varphi$ обчисленого за п. 6 зсуву фази.

Для одночасної компенсації ексцентриситету робочих валків АСКЕ діє в аналогічний спосіб, здійснюючи виділення змінних складових зусилля прокатки та товщини смуги, які мають частоту, що дорівнює частоті обертання робочих валків.

Мета роботи. Метою дослідження є доведення шляхом імітаційного моделювання на комп'ютерній моделі практичної можливості запропонованої АСКЕ бути реалізованою та її спроможності одночасно компенсувати ексцентриситет опорних та робочих валків, а також визначення ефективності АСКЕ як показника зменшення спричинених ексцентриситетом валків відхилень товщини прокату.

Модель процесу прокатки та САКЕ. Створена комп'ютерна модель, яка дозволяє здійснювати адекватне імітаційне моделювання процесу з точністю, що є достатньою для висновків щодо ефективності роботи системи. Її можна розглядати як сукупність пов'язаних функціонально завершених блоків, які імітують власне ексцентриситет, процес прокатки у чотиривалковій кліті, вузькосмугові фільтри, що виділяють змінні складові технологічних параметрів, та окремі функціональні вузли АСКЕ (рис. 3).

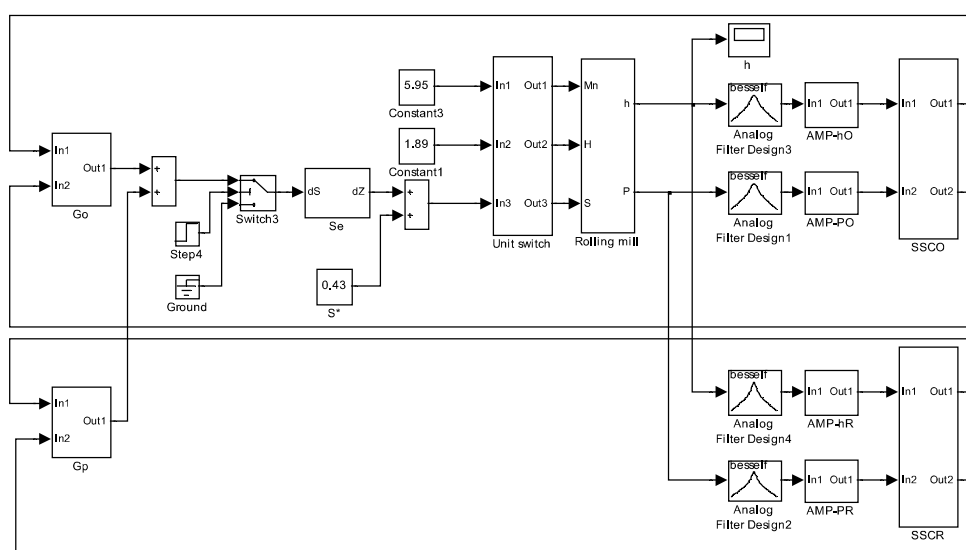


Рисунок 3 – Структурна схема моделі АСКЕ

Центральне місце в моделі посідає блок Rolling mill моделювання процесів, що протікають у прокатній кліті. На входи цього блоку подаються поточні значення технологічних змінних: товщини підкату $H(t)$, жорсткості смуги $MP(t)$ та міжвалкового зазору $S_0(t)$, а на його виходи видаються поточні значення зусилля прокатки $P(t)$ та вихідної товщини прокату $h(t)$.

Зусилля прокатки розраховується за формулою

$$P(t) = \frac{M_P M_K}{(M_P + M_K)} [H(t) - S_0(t)], \quad (3)$$

Товщина прокату легко визначається за рівнянням Сімса-Головина

$$h(t) = S_0(t) + \frac{P(t)}{M_K} \quad (4)$$

Поточні значення міжвалкового зазору з урахуванням ексцентриситету генеруються у блоці Se та надсилаються разом із сигналами товщини підкату $H(t)$ та жорсткості смуги $MP(t)$ на входи блоку Rolling mill крізь блок комутації Unit switch, що імітує завантаження заготовки до прокатної кліті.

Поточні значення зусилля прокатки $P(t)$ та товщини $h(t)$ з виходу блоку Rolling mill надходять до чотирьох вузькосмугових аналогових фільтрів Analog Filter Design, які виділяють змінні складові цих сигналів для подальшої обробки у чотирьох блоках визначення амплітуд AMP.

Кожний з цих блоків містить два тригери Triggered, що виконують функцію запам'ятовування вхідного сигналу в момент появи сигналу на керуючому вході (рис. 4,а). Ідея визначення амплітуди гармонічного сигналу полягає у запам'ятовуванні його максимального та мінімального значень та подальшого визначення різниці між ними (рис. 4,б).

Ознакою того, що сигнал набув екстремального значення є відповідність нулю його похідної. Отже для визначення моменту часу, що відповідає екстремуму застосовано блок диференціювання Dervativ. Сигнал з виходу цього блоку поступає на керуючі входи тригерів, перший з яких налаштований на спрацьовування за наявності переднього фронту (перехід гармонічного сигналу через мінімальне значення), а другий – на спрацьовування за наявності

заднього фронту (перехід гармонічного сигналу через максимальне значення).

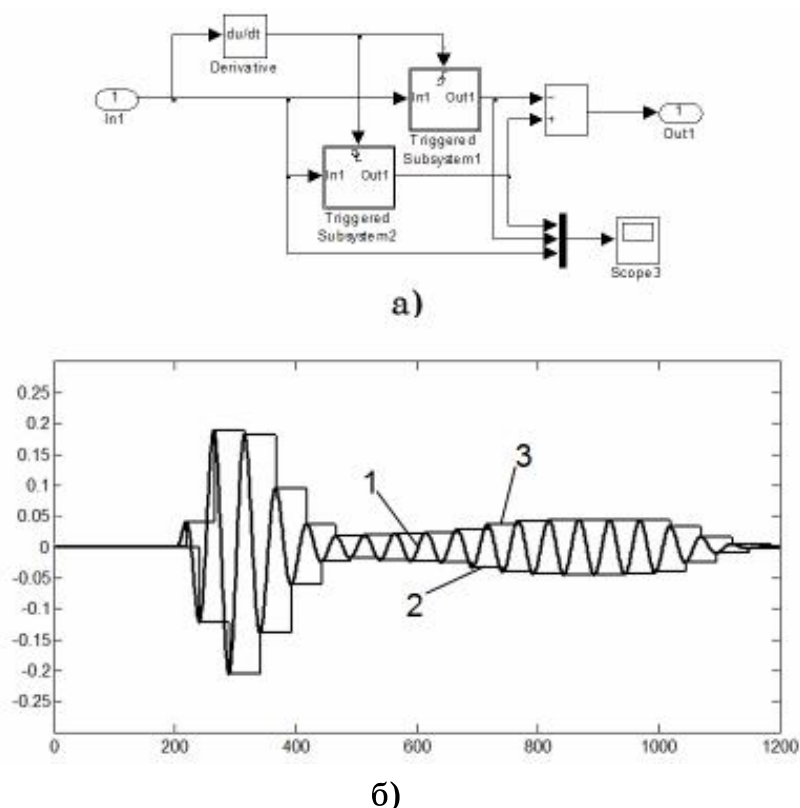


Рисунок 4 – Схема (а) та осцилограма роботи (б) блоку AMP визначення амплітуд: 1- гармонічний сигнал на вході блоку; 2 – мінімальне та 3- максимальне визначені значення сигналу

Обчислення параметрів примусових коливань зазору відбувається у блоках, що моделюють роботу підсистеми SSCR компенсації ексцентриситету робочих та підсистеми SSCO компенсації ексцентриситету опорних валків.

Обчислені параметри примусових коливань зазору з виходів блоків SSCO та SSCR надходять до блоків генерації примусових коливань G_p та G_o (див. рис. 3) для компенсації ексцентриситету робочих та опорних валків відповідно.

Згенеровані примусові коливання додаються у блоці Se до коливань зазору, спричинених власне ексцентриситетом, після чого поступають на відповідний вхід блоку Rolling mill моделювання процесів у прокатній кліті.

Вибір типу та параметрів вузькосмугових фільтрів. Для виділення з сигналів зусилля прокатки та товщини прокату змінних складових, що мають частоту, яка відповідає частоті обертання опор-

них та робочих валків у складі АСКЕ використовували відповідні вузькосмугові фільтри.

Вибір оптимального типу фільтрів та їхніх параметрів здійснювали шляхом моделювання процесу фільтрації суміші чотирьох синусоїдальних сигналів, амплітуди та частоти яких відповідали аналогічним параметрам ексцентриситету опорних та робочих валків. За результатами проведеного дослідження найкращу точність та швидкодію продемонстрували фільтри Бесселя третього порядку (рис. 5). Для цього типу фільтрів відфільтровані сигнали на частоті опорних (крива 2) та робочих (крива 4) валків практично ідеально співпадають з відповідними змінними складовими (крива 1 та крива 3), що у змішаному вигляді подавались на вхід фільтру. Відмінність амплітуди відфільтрованого сигналу від вихідного початкового не перевищує 0,001 мм. Усталення сигналу на виході фільтру відбувається за 2-2,5 с.

Методика та результати моделювання

Моделювання виконувалось для умов холодної прокатки смуги товщиною $h = 1,47$ мм з підкату товщиною $H = 1,89$ мм на реверсивному стані 800 ПАТ «Запоріжсталь». Технологічні параметри та параметри обладнання кліті визначались за даними роботи [6]: діаметр опорних валків – 800 мм; діаметр робочих валків – 400 мм; ексцентриситети опорних валків – 0,04 мм та 0,05 мм; ексцентриситети робочих валків – 0,02 мм та 0,03 мм; жорсткість кліті – 2,4 МН/мм; швидкість прокатки – 5 м/с; частота обертання опорних валків – 12,5 с⁻¹; частота обертання робочих валків – 25 с⁻¹; зусилля прокатки – 2,5 МН; жорсткість смуги – 5,95 МН/мм.

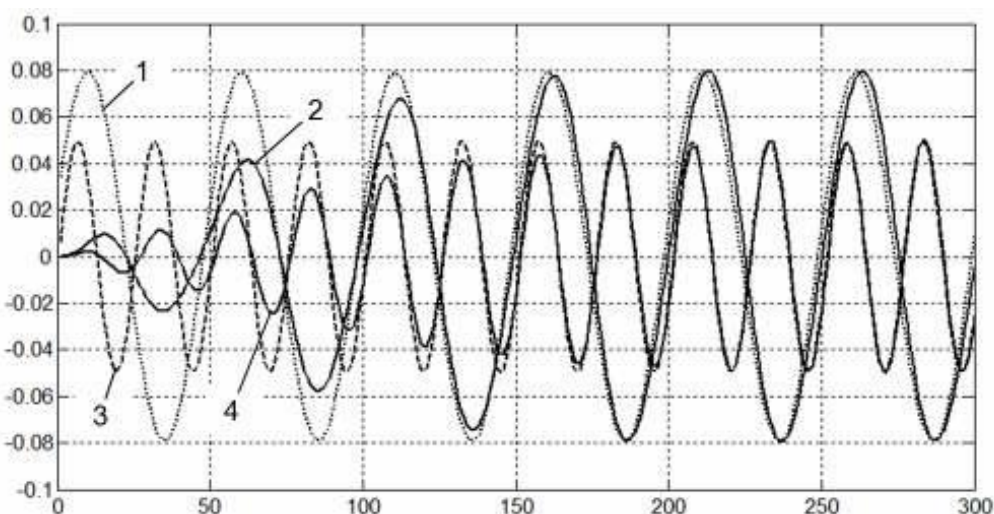


Рисунок 5 – До вибору фільтрів

Моделювання здійснювали у два етапи. На першому етапі досліджували прокатку без втручання АСКЕ.

На рис. 6 наведені осцилограми змінення міжвалкового зазору через ексцентриситет опорних та робочих валків (крива S_0 рис. 6,а) та товщини прокату (крива h на рис. 6,а) за відсутності компенсації ексцентриситету. Як випливає з цих осцилограм коливання зазору носять характер биття у діапазоні $\pm 0,124$ мм, а спричинена ними різнотовщинність Δh становить $\pm 0,06$ мм, що свідчить про наявність ефекту згладжування прокатної кліті.

На другому етапі дослідження здійснювали моделювання процесу в умовах функціонування АСКЕ. Результати моделювання наведені на рис. 6,б.

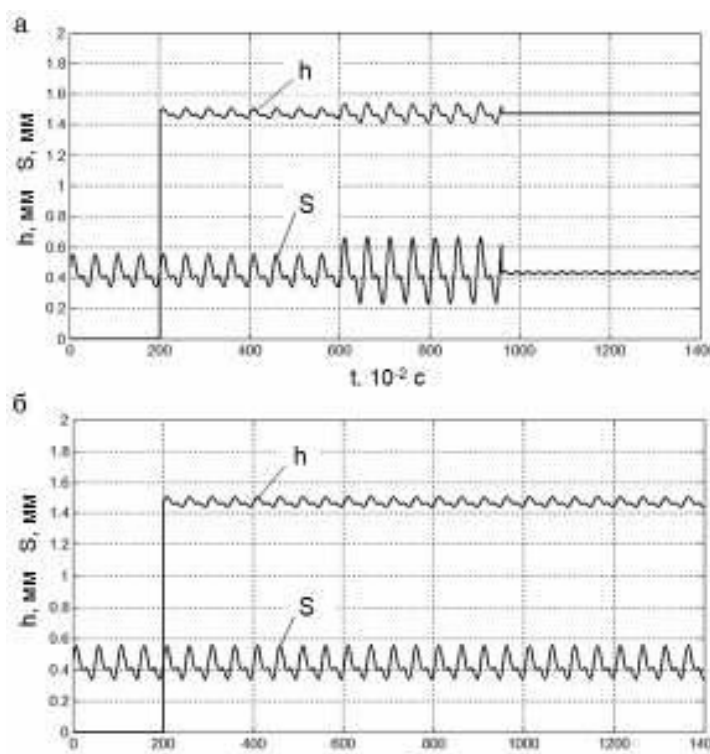


Рисунок 6 – Результати моделювання процесу за відсутності АСКЕ (а) та в умовах її роботи (б)

Процес прокатки починається на другій секунді моделювання, після чого впродовж 4-х секунд прокатка відбувається без впливу АСКЕ. При цьому товщина смуги змінюється через ексцентриситет у тих самих межах, що й під час попереднього моделювання: від $h = 1,469$ мм до $h = 1,472$ мм. Різнотовщинність становить $\Delta h = 0,003$ мм.

На шостій секунді моделювання АСКЕ розпочинає коригування міжвалкового зазору з визначеною амплітудою до довільною фазою. На цьому етапі моделювання фаза примусових коливань зазору майже співпадає з фазою ексцентриситету, що призводить до збільшення різновтовщинності до $\Delta h = 0,125$ мм.

На 9,6 секунді моделювання система коригує фазу примусових коливань, після чого різновтовщинність зменшується до значення $\Delta h = 0,003$ мм. Таким чином, використання створеної системи дозволяє зменшити різновтовщинність прокату, спричинену ексцентриситетом опорних і робочих валків майже у 20 разів з 0,06 мм до 0,003 мм. Така точність дозволяє говорити про майже повну компенсацію системою впливу ексцентриситету.

Висновки. Створена комп'ютерна модель АСКЕ дозволяє здійснювати адекватне імітаційне моделювання процесу прокатки з точністю, що є достатньою для висновків щодо ефективності роботи системи. Результати моделювання свідчать про здатність АСКЕ одночасно компенсувати вплив ексцентриситету опорних та робочих валків на товщину прокату.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фомин Г.Г. Механизация и автоматизация станов горячей прокатки / Г.Г. Фомин, А.В.Дубейковский, П.С.Гринчук. – М.: Металлургия, 1979 – 232 с.
2. Филатов А.С. Автоматические системы стабилизации толщины полосы / А.С. Филатов, А.П. Зайцев, А.А. Смирнов. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
3. Борисов А.А. Моделирование эксцентриситета валков прокатной клетки и оценка способов его уменьшения САУ. [Електронний ресурс] // Наукові праці ДонНТУ. – 2011. – Вип. 20 (182). С. 6–11. – Режим доступу до журн.: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream>.
4. Потап О.Е. Компенсация эксцентриситета валков при холодной прокатке листа / О.Е. Потап, А.П. Егоров, В.Г. Кисляков // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т.5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: “Системні технології”. – 2002. – С. 269 – 272.
5. Заявка на патент України. Спосіб компенсації впливу ексцентриситету прокатних валків на товщину смуги / О. Ю. Потап, С. В. Бейцун, М. Д. Зінченко та ін., МПК В21В 37/66. Заявка № а201703611 від 13.04.2017.
6. Меерович И.М. Повышение точности листового проката / И.М. Меерович, А.И. Герцев, В.С. Горелик. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.