

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ФОРМОЮ ШТАБИ ПРОКАТУ ЗА ГІБРИДНИМ КРИТЕРІЄМ НА ОСНОВІ БЕЗКОНТАКТНИХ ВИКОНАВЧИХ ПРИСТРОЇВ

М. Я. Островерхов, к.т.н., доц.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

просп. Перемоги, 37, 03506, м. Київ, Україна

E-mail: ostroverkhov@fea.kpi.ua

Представлена система автоматичного керування формою штаби прокату на основі безконтактних виконавчих пристроїв. Система забезпечує астатичне керування форми в умовах параметричних і координатних збурень без застосування будь-яких додаткових систем компенсації, адаптації чи ідентифікації.

Ключові слова: форма прокату, система автоматичного керування, безконтактні виконавчі пристрої.

Вступ. Найбільш актуальною проблемою листопркатного виробництва є підвищення форми штаби прокату, для керування якою на прокатних станах останніх поколінь застосовується механічний вплив на осередок деформації металу у кліті за рахунок різного виду систем примусового вигину, осьового зміщення, перехреснення та зміни профілю бочки валків кліті [1, 2].

Аналіз попередніх досліджень. Таке використання валків, які об'єднують у собі виконання декількох технологічних операцій (керування товщиною, профілем, формою тощо), суттєво ускладнює конструкцію кліті, знижує її надійність та вдвоєтроє зменшує термін служби валків, призводячи до їх інтенсивного зносу. В таких умовах, коли різниця відносних витяжок по ширині штаби всього в 0,01 % призводить до появи дефектів форми, а різниця в 0,2..0,5 % починає суттєво впливати на профіль штаби, виникає проблема подальшого покращення форми, вирішення якої розглянутими механічними засобами при інтенсивному зносі валків кліті, як головного робочого інструменту технологічного процесу прокатки, пов'язано зі значними технічними труднощами та витратами.

Зважаючи на це, актуальним є вирішення проблеми методами керування на основі немеханічної електромагнітної дії безпосередньо на штабу в ході її прокатки [3, 4]. Таке винесення виконавчих пристроїв систем керування за межі кліті та їх конструктивне виконання у вигляді безконтактних виконавчих пристроїв (БВП), що не зношуються, дає можливість впровадити системи на діючих прокатних станах попередніх поколінь та відкриває перспективу подальшого підвищення точності керування. Для ліквідації типових порушень форми достатньо встановити під штабою три БВП. При глибокому керуванні форми кількість БВП збільшується.

Мета роботи. Підвищенні якості керування формою штаби прокату за допомогою системи автоматичного керування на основі безконтактних виконавчих пристроїв, що реалізує гібридний критерій форми. Досягнення мети потребує вирішення задач: розробка математичної моделі об'єкту керування, синтез робастних законів керування формою штаби, дослідження якості керування формою штаби прокату.

Матеріал і результати дослідження. Математична модель процесу формування форми прокату при електромагнітній дії на штабу трьома безконтактними

виконавчими пристроями розроблена на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду при приведенні рухомих мас до швидкості штаби з урахуванням пружної деформації металу. Відповідна система рівнянь (1) в операторній формі ($p \rightarrow d/dt$) містить наступні параметри: $m_1, m_2, m_{11}, m_{12}, m_{13}$ – маси електропривода валків, моталки та трьох ділянок штаби, зв'язаних з трьома БВП; $V_1, V_2, V_{11}, V_{12}, V_{13}$ – лінійні швидкості валків, рулону моталки, ділянок штаби на лівій кромці, в центрі і на правій кромці.

$$\left. \begin{aligned}
 m_1 p V_1 &= F_1 + F_{11}^y + F_{12}^y + F_{13}^y - F_{c1} - F_0; \\
 m_2 p V_2 &= F_2 - F_{21}^y - F_{22}^y - F_{23}^y - F_{c2}; \\
 m_{11} p V_{11} &= F_{11} + F_{21}^y - F_{11}^y; \\
 m_{12} p V_{12} &= F_{12} + F_{22}^y - F_{12}^y; \\
 m_{13} p V_{13} &= F_{13} + F_{23}^y - F_{13}^y; \\
 F_{11}^y &= \left(\frac{c_{11}}{p} + \mu_{11} \right) [V_{11} - V_{u1} (1 + \varepsilon_{11})]; \\
 F_{12}^y &= \left(\frac{c_{12}}{p} + \mu_{12} \right) [V_{12} - V_{u2} (1 + \varepsilon_{12})]; \\
 F_{13}^y &= \left(\frac{c_{13}}{p} + \mu_{13} \right) [V_{13} - V_{u3} (1 + \varepsilon_{13})]; \\
 F_{21}^y &= \left(\frac{c_{21}}{p} + \mu_{21} \right) [V_2 - V_{11} (1 + \varepsilon_{21})]; \\
 F_{22}^y &= \left(\frac{c_{22}}{p} + \mu_{22} \right) [V_2 - V_{12} (1 + \varepsilon_{22})]; \\
 F_{23}^y &= \left(\frac{c_{23}}{p} + \mu_{23} \right) [V_2 - V_{13} (1 + \varepsilon_{23})]; \\
 \varepsilon_{11} &= \frac{F_{11}^y - F_{01}}{c_{11} x_1}; \quad V_{u1} = V_1 (1 + s_{01}); \\
 \varepsilon_{12} &= \frac{F_{12}^y - F_{02}}{c_{12} x_1}; \quad V_{u2} = V_1 (1 + s_{02}); \\
 \varepsilon_{13} &= \frac{F_{13}^y - F_{03}}{c_{13} x_1}; \quad V_{u3} = V_1 (1 + s_{03}); \\
 \varepsilon_{21} &= \frac{F_{21}^y}{c_{21} x_2}; \\
 \varepsilon_{22} &= \frac{F_{22}^y}{c_{22} x_2}; \\
 \varepsilon_{23} &= \frac{F_{23}^y}{c_{23} x_2}.
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Еквівалентні жорсткості та коефіцієнти демпфірування, а також відносні подовження ділянок штаби між валками, БВП і моталкою позначено $c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{21}, c_{22}, c_{23}$ та $\mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{21}, \mu_{22}, \mu_{23}$, а також $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{23}$. $V_{ш1}, V_{ш2}, V_{ш3}, S_{01}, S_{02}, S_{03}$ – лінійні швидкості ділянок штаби та випередження металу на виході з валків на лівій кромці, в центрі і на правій кромці; $F_1, F_2, F_{11}, F_{12}, F_{13}$ – зусилля електродвигуна валків, моталки та трьох БВП; F_{c1}, F_{c2} – статичні зусилля електродвигунів валків та моталки. $F_{11}^y, F_{12}^y, F_{13}^y$ та $F_{21}^y, F_{22}^y, F_{23}^y$ – пружно-в'язкі зусилля ділянок штаби між валками і БВП та між БВП і моталкою відповідно; $F_0, F_{01}, F_{02}, F_{03}$ – сумарний натяг штаби та натяги на лівій кромці, в центрі і на правій кромці перед валками; x_1, x_2 – відстань між валками і БВП та між БВП і моталкою.

Керування формою при реалізації гібридного критерію здійснюється шляхом зміни швидкостей V_{11}, V_{12}, V_{13} та пружних зусиль $F_{11}^y, F_{12}^y, F_{13}^y$ ділянок штаби на виході з кліти шляхом створення у прокаті за допомогою БВП повздовжніх керуючих зусиль F_{11}, F_{12}, F_{13} , які формуються індивідуальними системами векторного керування [5]. Як видно з (1), об'єкт керування є багатовимірним, нелінійним та взаємозв'язаним. У залежності від сортаменту прокату змінюються коефіцієнти жорсткості та демпфірування, а також маси ділянок штаби. Все це обумовлює синтез робастних законів керування на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій [6–8]. Суттєвою перевагою цього методу є те, що для визначення закону керування непотрібно вирішувати оптимізаційну задачу в традиційному розумінні, бо він записується безпосередньо по диференційному рівнянню об'єкту керування та диференційному рівнянню, яким задається бажана якість керування. Отримані при цьому закони керування забезпечують динамічну декомпозицію взаємозв'язаної системи та надають їй слабку чутливість до зміни параметрів об'єкту керування, що обумовлює їх практичну реалізацію.

Система керування є триканальною відповідно до кількості БВП. Кожен канал має підпорядковану структуру із внутрішнім контуром швидкості металу та зовнішнім контуром пружності штаби.

У внутрішньому контурі керування швидкістю V_{11} згідно (1) діють координатні збурення у вигляді пружно-в'язких зусиль F_{11}^y та F_{21}^y , швидкості виходу металу з валків кліти $V_{ш1}$ та переднього натягу штаби F_{01} . Розрахунковий порядок контуру керування дорівнює двом. Якість керування заданої швидкості V_{11}^* , у тому числі астатизм другого порядку за керуючою дією, встановлюється за допомогою бажаного диференційного рівняння замкнутого контуру керування швидкості:

$$\ddot{z}_{11} + \alpha_1 \dot{z}_{11} + \alpha_0 z_{11} = \alpha_1 \dot{V}_{11}^* + \alpha_0 V_{11}^*. \quad (2)$$

Параметри рівняння (2) задаються такими, щоб збурений рух замкнутої системи був асимптотично стійким, що для даної системи другого порядку, відповідно до критерію Гурвиця, виконується, якщо $\alpha_0 > 0, \alpha_1 > 0$. Зв'язок між значеннями цих коефіцієнтів та показниками якості керування, такими, як час регулювання, вид перехідного процесу, перерегулювання,

легко встановлюється за допомогою відомих кореневих чи частотних методів. Ступінь наближення реального процесу керування до бажаного оцінюється функціоналом, що характеризує нормовану за масою енергію прискорення:

$$G(u) = \frac{1}{2} [\ddot{z}_{11}(t) - \dot{V}_{11}(t, u)]^2. \quad (3)$$

При знаходженні керуючої функції $u = u(V_{11}, \dot{V}_{11})$ класичними методами за умови абсолютного мінімуму функціонала

$$\min_u G(u) = 0 \quad (4)$$

отримується традиційний закон керування компенсаційного типу, для реалізації якого необхідна точна інформація про структуру та параметри об'єкту. Відхилення параметрів об'єкту від розрахункових призводить до суттєвого погіршення якості керування.

Цей недолік усувається, якщо відмовитися від точного виконання умови (4), а обмежитися вимогою, щоб значення функціонала (3) належало околиці екстремуму-мінімуму, що забезпечує допустиму за технічними умовами динамічну похибку $|z_{11}(t) - V_{11}(t)| \leq \varepsilon$. Для цього мінімізація функціонала здійснюється за градієнтним законом першого порядку

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda \frac{dG(u)}{du}, \quad (5)$$

де λ – константа.

Відповідно до вказаних вимог за методикою [8] синтезовано закон керування швидкістю V_{11} , що описується системою (6):

$$u_{11}(t) = k_{11}^V [\dot{z}_{11} - \dot{V}_{11}]; \quad (6)$$

$$\dot{z}_{11} = \alpha_0 \int (V_{11}^* - V_{11}) dt + \alpha_1 (V_{11}^* - V_{11}),$$

де k_{11}^V – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості.

Аналогічно синтезуються закони керування швидкостями V_{12} та V_{13} інших ділянок штаби. Швидкодія контурів швидкостей, яка задається коефіцієнтами $\alpha_0 > 0, \alpha_1 > 0$, повинна бути в 3..5 разів більшою за швидкодію зовнішніх контурів пружних зусиль для зменшення впливу на їх динаміку.

У зовнішньому контурі керування пружним зусиллям F_{11}^y відповідно до (1) діють координатні збурення у вигляді зусилля F_{21}^y , переднього натягу F_{01} та швидкості виходу металу з валків $V_{ш1}$. Розрахунковий порядок системи також дорівнює двом. Диференційне рівняння, яким задається бажана якість керування пружним зусиллям, має третій порядок

$$\ddot{y} + \gamma_2 \dot{y} + \gamma_1 y + \gamma_0 y = \gamma_2 \ddot{F}_{11}^{y*} + \gamma_1 \dot{F}_{11}^{y*} + \gamma_0 F_{11}^{y*}, \quad (7)$$

де F_{11}^{y*} – задане зусилля.

Асимптотична стійкість замкнутого контуру забезпечується, якщо $\gamma_0 > 0, \gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$ та $\gamma_1 \gamma_2 > \gamma_0$.

Ступінь наближення реального процесу керування в контурі пружного зусилля до бажаного, заданого рівнянням (7), оцінюється функціоналом:

$$G(V_{11}^*) = \frac{1}{2} [\ddot{y}_{11}(t) - \ddot{F}_{11}^{y*}(t, V_{11}^*)]^2. \quad (8)$$

Синтезований за даною методикою закон керування зусиллям описується системою (9):

$$V_{11}^*(t) = k_{11}^F [\dot{y}_{11} - \dot{F}_{11}^y];$$

$$\dot{y}_{11} = \int (\gamma_0 f_0 + \gamma_1 (F_{11}^{y*} - F_{11}^y)) dt + \gamma_2 (F_{11}^{y*} - F_{11}^y); \quad (9)$$

$$f_0 = \int (F_{11}^{y*} - F_{11}^y) dt,$$

де k_{11}^F – коефіцієнт підсилення регулятора зусилля.

Аналогічно синтезуються закони керування пружними зусиллями F_{12}^y, F_{13}^y .

Як видно з (6) та (9), параметри регуляторів не містять параметрів об'єктів керування, що характерно для класичних законів керування. Це забезпечує слабку чутливість до параметричних і координатних збурень, обумовлюючи динамічну декомпозицію системи.

Дослідження системи керування формою проведено шляхом моделювання на прикладі стану 2000 прокатки алюмінієвих штаб товщиною 2 мм, шириною 1,8 м та швидкістю 10 м/с з наступними параметрами регуляторів пружних зусиль: $\gamma_0=80000$, $\gamma_1=18000$, $\gamma_2=8000$, $k_{11}^F=1000$ та регуляторів швидкостей ділянок штаби $\alpha_0=80000$; $\alpha_1=16000$, $k_{11}^V=1000$ при дії лінійнонаростаючих та періодичних збурень. Лінійнонаростаюче збурення пружних натягів з інтенсивністю 4000 Н за секунду в центрі штаби та мінус 2000 Н на кромках діє на рівномірно розподілені по ширині штаби натяги в 12000 Н. Унаслідок такого збурення виникає суттєве порушення форми штаби у вигляді хвилястості кромки амплітудою біля 25 мм. На рис. 1 показана амплітуда хвиль штаби при роботі запропонованої системи керування в ході відпрацювання цього збурення. Як видно з рисунка, максимальна хвиля становить всього 0,009 мм, що в тисячі разів менше допустимих норм. При цьому максимальна похибка керування швидкості становить 7×10^{-10} м/с (рис. 2), а пружного зусилля $6,7 \times 10^{-5}$ Н (рис. 3). На рис. 4 представлено характер зміни форми штаби в ході відпрацювання періодичного збурення у вигляді гармонічних функцій частотою 0,4 Гц з амплітудою у центрі штаби 4000 Н та 2000 Н на кромках, що діють протифазно.

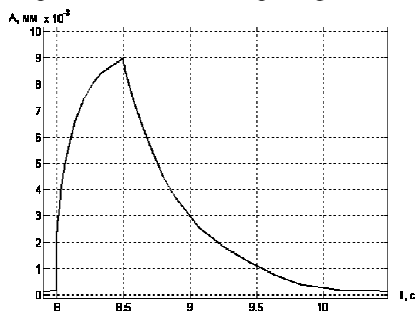


Рисунок 1 – Амплітуда хвиль штаби при дії лінійнонаростаючих збурень

Як видно з рисунка, максимальна амплітуда хвиль становить всього 0,01 мм, проте періодичний характер зміни форми штаби залишається. При цьому максимальна похибка керування швидкості становить $0,84 \times 10^{-9}$ м/с (рис. 5), а пружного зусилля – $0,82 \times 10^{-4}$ Н (рис. 6).

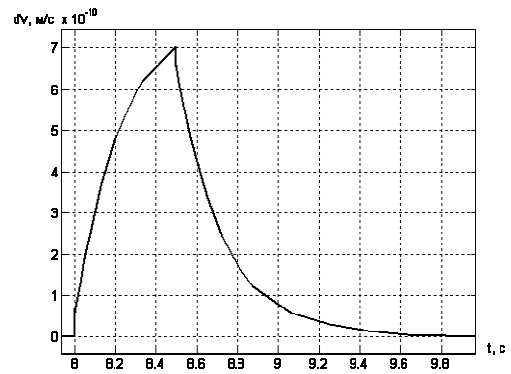


Рисунок 2 – Похибка швидкості при дії лінійнонаростаючих збурень

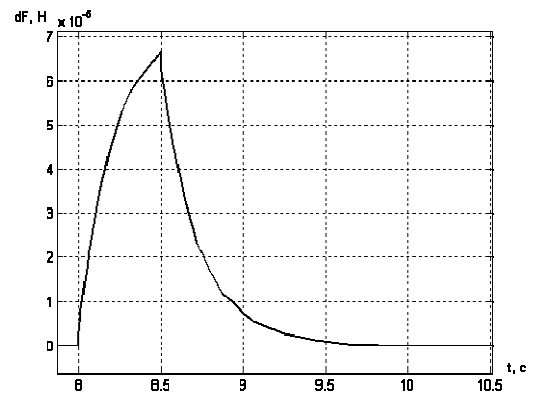


Рисунок 3 – Похибка пружних зусиль при дії лінійнонаростаючих збурень

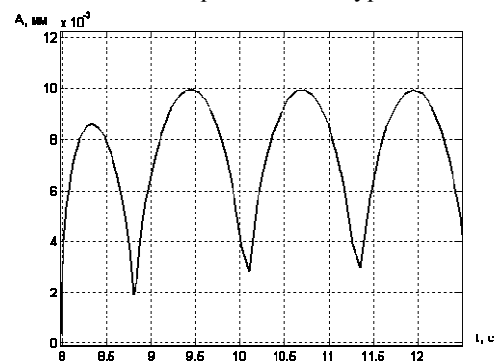


Рисунок 4 – Амплітуда хвиль штаби при дії періодичних збурень

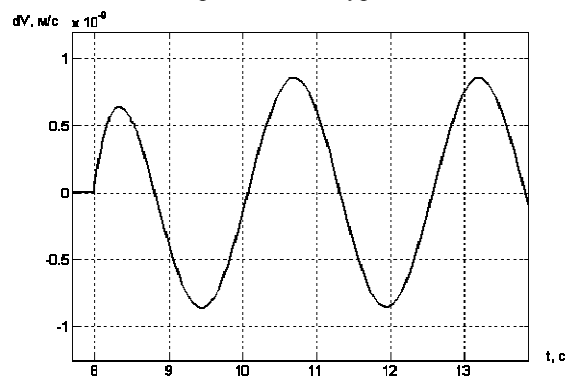


Рисунок 5 – Похибка швидкості при дії періодичних збурень

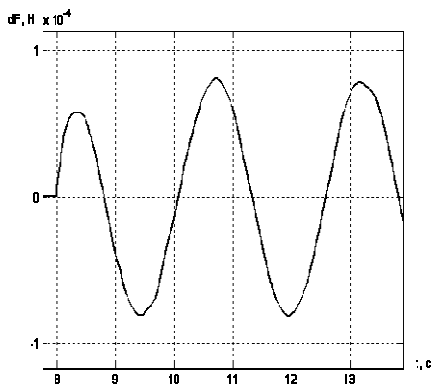


Рисунок 6 – Похибка пружних зусиль при дії періодичних збурень

Висновки. Представлена система автоматичного керування забезпечує астатичне керування формою штаби шляхом електромагнітної дії на штабу за допомогою безконтактних виконавчих пристроїв за межами кліти. Розроблені закони керування на основі концепції зворотних задач динаміки при мінімізації локальних функціоналів забезпечують динамічну декомпозицію багатовимірної, нелінійної та взаємозв'язаної системи автоматичного керування формою штаби прокату та надає їй властивість слабкої чутливості до зміни сортаменту прокату.

Результати дослідження показують, що представлена гібридна система керування формою штаби забезпечує амплітуду хвиль штаби на декілька порядків меншу за допустимі норми. Для реалізації розроблених законів керування формою необхідно вимірювати розподіл швидкостей металу та пружних зусиль по ширині штаби на виході з прокатної кліти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Современная система контроля плоскостности для повышения качества полосы на стане горячей про-

катки № 1 в Бенкси / Б.Мингви, Ж.Чунхуи, Д.Рамелот и др. // Черные металлы. – июнь 2005. – С. 60–65.

2. Синтез систем управління параметрами штаби при холодному прокатуванні / Е.В. Тимошенко, О.О. Самецький. – К.: НВК “КІА”, 1999. – 264 с.

3. Пат. 14504 Україна, МПК В21 В39/00. Спосіб керування натягом по ширині штаби / Попович М.Г., Островерхов М.Я. – Опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.

4. Пат. 14508 Україна, МПК В21 В37/00. Пристрій для керування планшетністю штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я. – Опубл. 15.05.2006, Бюл. № .

5. М.Г.Попович, М.Я.Островерхов. Система векторного керування зусиллям у штабі прокату на основі безконтактного виконавчого пристрою / Вісник НТУ „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – № 30. – С. 394–396.

6. Крутько П.Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов // Изв. РАН. ТисУ. – 2005. – № 2. – С. 120–140.

7. Черноусько Ф.Л. Декомпозиция и субоптимальное управления в динамических системах // ПММ. – 1990. – Т. 54. – Вып. 6. – С. 883–893.

8. Островерхов М.Я. Метод синтеза регуляторов электромеханических систем на основе концепции зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії / Вісник НТУ “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – № 30. – С. 105–110.

Стаття надійшла 30.06.2011р.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Чорним О.П.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ПОЛОСЫ ПРОКАТА ПО ГИБРИДНОМУ КРИТЕРИУ НА БАЗЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Н. Я. Островерхов., к.т.н., доц.

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт
просп. Победы, 37, 03506, г. Киев, Украина
E-mail: ostroverkhov@fea.kpi.ua*

Представлена система автоматического управления формой проката на базе бесконтактных исполнительных устройств. Система обеспечивает астатическое управление формой в условиях параметрических и координатных возмущений без применения каких-либо дополнительных систем компенсации, адаптации или идентификации.

Ключевые слова: форма проката, система автоматического управления, бесконтактные исполнительные устройства.

CONTROL SYSTEM OF THE FORM OF THE STRIP OF HIRE BY HYBRID CRITERION ON THE BASIS OF CONTACTLESS EXECUTIVE DEVICES

*M. Ostroverkhov., Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
National Technical University of Ukraine “KPI”, Kyiv
prosp. Peremohy, 37, 03506, Kyiv, Ukraine
E-mail: ostroverkhov@fea.kpi.ua*

The automatic-control system by the form of hire on the basis of contactless executive devices is presented. The system provides astatic control of the form in conditions of parametric and coordinate perturbations without application of any additional systems of compensation, adaptation or identification.

Key words: form of hire, automatic-control system, contactless executive devices.