

УДК 681.513.7: 621.771.2

**О. Ю. Потап**, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0001-8643-0228**А. В. Іванічик**, студент*Український державний університет науки і технологій*

## ТОЧНІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ ТОВЩИНИ ПРОКАТУ В УМОВАХ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ЗБУРЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ШВИДКОДІЇ НАТИСКНИХ ПРИСТРОЇВ

**Анотація.** Ефективність AGC-систем регулювання товщини листового прокату на безперервних станах, де товщина підкату містить високочастотну складову, спричинену ексцентриситетом валків попередньої кліті, залежить від швидкодії гідравлічних натискних пристроїв (ГНП). Здійснене аналітичне обґрунтування функцій передачі AGC-системи за ексцентриситетом валків та за товщиною підкату з урахуванням реальної швидкодії ГНП. Аналітично визначені частотні характеристики AGC-системи. Доведено, що за наявної швидкодії ГНП в інтервалі притаманних холодній прокатці смуг частот обертання опорних валків ( $\omega = 5 - 15 \text{ с}^{-1}$ ) амплітудно-частотна характеристика AGC-системи є майже лінійною і залежно від сталої часу  $T$  ГНП та відношення модуля жорсткості прокату  $M_{II}$  до модуля жорсткості прокатної кліті  $M_K$  змінюється в широких межах від  $A(5)=0,05$  (при  $\omega=5\text{с}^{-1}$ ;  $T=0,01 \text{ с}$ ;  $M_{II}/M_K=1$ ) до  $A(15)=0,48$  (при  $\omega=15\text{с}^{-1}$ ;  $T=0,01 \text{ с}$ ;  $M_{II}/M_K=4$ ). При цьому різнотовщинність на виході кліті відповідає вимогам до тонкого холоднокатаного прокату високої точності. Доведено, що в умовах регулювання товщини прокату за AGC-алгоритмом амплітуда спричинених ексцентриситетом валків коливань товщини прокату є меншою за амплітуду спричинених ексцентриситетом коливань міжвалкового зазору й зменшується зі зростанням частоти обертання валків та сталої часу ГНП за близьким до лінійного законом. Така лінійність створює підстави для застосування адаптивних алгоритмів визначення дійсної амплітуди коливань міжвалкового зазору в автоматизованих системах компенсації ексцентриситету валків.

**Ключові слова:** Регулювання товщини прокату, AGC-алгоритм, ексцентриситет валків, гідравлічний натискний пристрій, функція передачі.

**Посилання для цитування:** Потап О. Ю., Іванічик А. В. Точність регулювання товщини прокату в умовах високочастотних збурень з урахуванням швидкодії натискних пристроїв. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. Вип. 36. 2022. С. 299-307. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-299-307.

**Постановка проблеми.** Комплексна автоматизація сучасних безперервних листових станів передбачає наявність у кожній чистовій кліті системи регулювання товщини за AGC-алгоритмом. Вважається, що застосування AGC-алгоритму забезпечує повну компенсацію технологічних збурень, що привносяться підкатом, зокрема, його різнотовщинністю. Доведення цього положення [1] здійснюється, як

правило, у припущенні про безінерційність натискних пристроїв. З огляду на достатньо високу швидкість натискних пристроїв (особливо гідравлічних) таке припущення є цілком виправданим, якщо йдеться про низькочастотні збурення, якими зазвичай і бувають зміни температури та товщини підкату. Проте, на безперервних станах товщина підкату на вході кожної з чистових клітей містить високочастотну складову, спричинену ексцентриситетом валків попередньої кліті, адже, як відомо, AGC-системи не тільки не усувають вплив ексцентриситету на товщину прокату, а навіть підсилюють його [2].

Очевидно, за наявності високочастотних коливань товщини підкату доведення ефективності AGC-алгоритму потребує урахування швидкодії натискних пристроїв. Таке доведення є актуальним ще й з огляду на те, що низка перспективних технічних рішень щодо автоматичної компенсації впливу ексцентриситету прокатних валків на товщину листового прокату базується саме на можливості повної компенсації збурень за товщиною підкату AGC-системою [3 - 5], адже її застосування призводить до так званого режиму "абсолютно жорсткої кліті" з повним перенесенням ексцентриситету на товщину прокату на виході з валків, що дозволяє вимірювати амплітуду ексцентриситету, безпосередньо вимірюючи товщину прокату. Принциповим є також питання про вплив реальної швидкодії натискних пристроїв на ефективність власне компенсації ексцентриситету.

**Аналіз публікацій за темою дослідження.** Експериментальне дослідження впливу швидкодії гідравлічних натискних пристроїв (ГНП) на ефективність AGC-системи здійснювалось у роботі [2] шляхом комп'ютерного моделювання. Автори запропонували в якості чисельного показника такого впливу використовувати відношення  $\alpha = \Delta h / \Delta S_e$  амплітуди  $\Delta h$  коливань товщини прокату до амплітуди  $\Delta S_e$  спричинених ексцентриситетом коливань міжвалкового зазору. За результатами моделювання було виявлено близьку до лінійної залежність параметра  $\alpha$  від частоти обертання валків та від сталої часу ГНУ, але без теоретичного обґрунтування цього результату його практичне застосування обмежується технологічними параметрами процесу, що моделювався.

**Метою роботи** є теоретичне дослідження:

- 1) ефективності AGC-алгоритму при високочастотних збуреннях з боку товщини підкату в умовах реальної швидкодії натискних пристроїв;
- 2) впливу швидкодії натискних пристроїв на точність компенсації ексцентриситету валків.

**Дослідження ефективності AGC-алгоритму.** Для з'ясування впливу швидкодії натискних пристроїв на якість компенсації високочастотних коливань товщини підкату, що спричинені ексцентриситетом валків попередньої кліті, визначимо функцію передачі AGC-системи, вважаючи вихідною (керованою) величиною відхилення  $\Delta h$  товщини прокату, а

вхідною – відхилення  $\Delta H$  товщини підкату.

Відповідна структурна схема AGC-системи, що враховує динамічні властивості ГНП і нехтує динамікою процесів пружної деформації кліті та пластичної деформації прокату через неспівставно менші постійні часу, наведена на рис. 1.

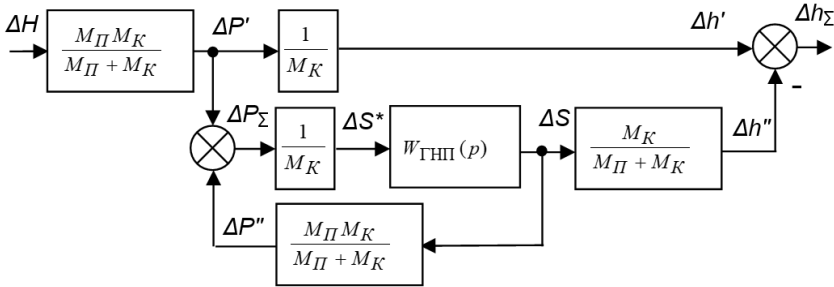


Рисунок 1 – Структурна схема AGC-системи за збуренням за товщиною підкату.

Вона побудована на базі відомої розрахункової схеми (рис. 2, а), яка ілюструє принцип дії AGC-системи для випадку, коли збурення полягає, наприклад, у зміні товщини підкату [2].

Після зростання товщини підкату на величину  $\Delta H$  від значення  $H$  до  $H'$  крива пластичності прокату (крива 1 на рис. 2,а) займає нове положення (крива 2 на рис. 2,а), а початкова робоча точка  $A$  процесу прокатки, що знаходилась на перетині кривої пластичності з лінією пружної деформації кліті (лінія 3 на рис. 2,а), пересувається у точку  $B$ . Відхилення  $\Delta h'$  товщини прокату від початкового значення  $h$  усувається AGC-системою шляхом корекції вихідного міжвалкового зазору  $S$  на величину  $\Delta S$ , після чого робочою точкою процесу стає точка  $C$  на перетині кривої 2 пластичності і лінії 4 пружної деформації кліті (наведена пунктиром). Керуючий вплив  $\Delta S^*$  визначається у такій системі за формулою

$$\Delta S^* = -\frac{\Delta P'}{M_K}, \quad (1)$$

де  $\Delta P' = \frac{M_\Pi M_K}{M_\Pi + M_K} \Delta H$  – відхилення поточного зусилля  $P'$  прокатки від базового (первинного) значення  $P$ ,  $M_K$  – модуль жорсткості кліті (відповідає тангенсу кута нахилу лінії пружної деформації кліті на рис. 2,а), а  $M_\Pi$  – модуль жорсткості прокату (відповідає тангенсу кута нахилу кривої пластичності на рис. 2,а).

В результаті відпрацювання керуючого впливу  $\Delta S^*$  гідравлічним натискним пристроєм з функцією передачі  $W_{\text{ГНП}}(p)$  відхилення товщини прокату зменшується на величину

$$\Delta h'' = -\frac{M_K}{M_{II} + M_K} \Delta S \quad (2)$$

до значення  $\Delta h_{\Sigma} = \Delta h' - \Delta h''$ , а сила прокатки зростає на величину

$$\Delta P'' = \frac{M_{II} M_K}{M_{II} + M_K} \Delta S, \quad (3)$$

спричиняючи подальшу корекцію міжвалкового зазору.

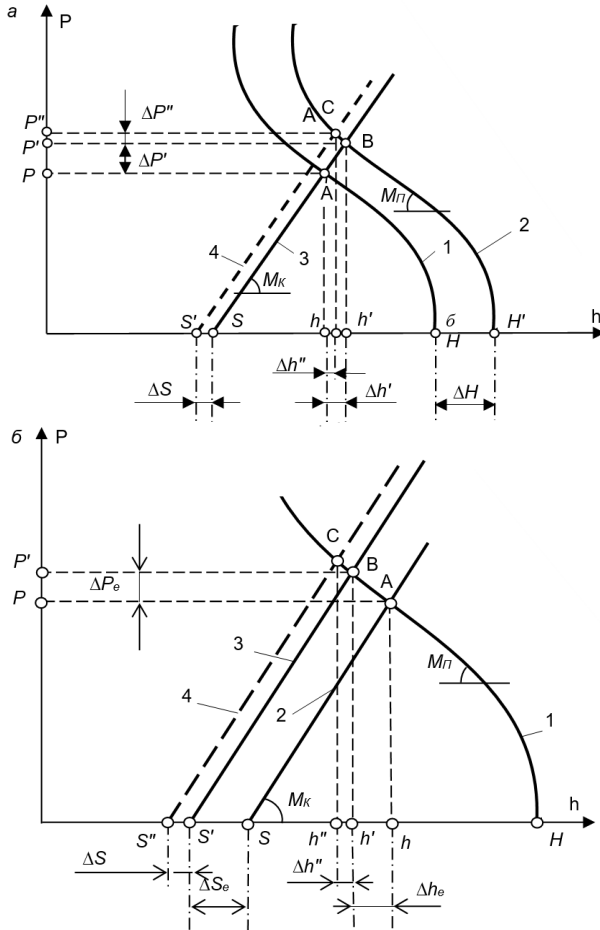


Рисунок 2 – Розрахункова схема регулювання товщини прокату за AGC-алгоритмом в умовах збурення за товщиною підкату (а) та за ексцентриситетом валків (б).

Елементарні перетворення дозволяють представити структурну схему AGC-системи у більш зручному вигляді (рис. 3), який наочно демонструє вплив динаміки натискних пристроїв на якість регулювання.

В умовах використання ідеального за точністю та безінерційного

натискного пристрою, функція передачі якого  $W_{ГНП}(p)=1$ , маємо ідеальну за точністю систему регулювання товщини з  $\Delta h_{\Sigma}=0$ . В реальних умовах на точність регулювання впливатиме у першу чергу швидкодія ГНП.

Якщо, виходячи з вигляду перехідної характеристики ГНП [6], у першому наближенні представити його аперіодичною ланкою першого порядку з функцією передачі

$$W_{ГНП}(p) = \frac{1}{Tp + 1},$$

функція передачі АГС-системи  $W^{\Delta H}(p)$  за каналом  $\Delta H$  (див. рис. 3) матиме вигляд близький до інерційно-диференційної ланки

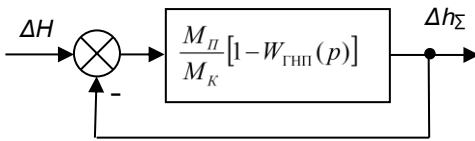


Рисунок 3 – Перетворена структурна схема АГС-регулювання за товщиною підкату.

$$W^{\Delta H}(p) = \frac{\frac{M_{\Pi}}{M_K} T_p}{1 + \left(1 + \frac{M_{\Pi}}{M_K}\right) T_p}, \quad (4)$$

з амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ)

$$A(\omega) = \frac{\frac{M_{\Pi}}{M_K} T_{\omega}}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2 \left(1 + \frac{M_{\Pi}}{M_K}\right)^2}}. \quad (5)$$

В інтервалі найпоширеніших частот обертання опорних валків ( $\omega=5-15 \text{ c}^{-1}$ ) АЧХ є майже лінійною і залежно від сталої часу  $T$  ГНП та відношення  $M_{\Pi}/M_K$  змінюється в широких межах від  $A(5)=0,05$  (при  $\omega=5 \text{ c}^{-1}$ ,  $T=0,01 \text{ c}$ ;  $M_{\Pi}/M_K=1$ ) до  $A(15)=0,48$  (при  $\omega=15 \text{ c}^{-1}$ ,  $T=0,015 \text{ c}$ ;  $M_{\Pi}/M_K=4$ ).

Отже АГС-система за певних умов може або майже повністю усувати високочастотну різнотовщинність підкату, зменшуючи її у 20 разів, або лише частково компенсувати це збурення. В останньому випадку, що за параметрами близький до холодної прокатки тонких смуг, різнотовщинність на виході кліті не перевищує  $\Delta h \approx 0,024 \text{ мм}$ , що відповідає вимогам до прокату високій точності.

**Дослідження впливу швидкодії ГНП на роботу АГС-алгоритму в умовах дії ексцентриситету валків.** Реакцію АГС-системи на ексцентриситет валків залежно від швидкодії ГНП проаналізуємо, спираючись на функцію передачі АГС-системи за збуренням

$$W^{AS}(p) = \frac{\Delta h(p)}{\Delta S_e(p)},$$

вважаючи таким високочастотні коливання міжвалкового зазору  $\Delta S_e$ . Розрахункова схема, що ілюструє функціонування AGC-системи у випадку, коли збурення полягає у спричиненому ексцентриситетом змінні міжвалкового зазору, наведена на рис. 2,б.

Зменшення зазору на величину  $\Delta S_e$  від значення  $S$  до  $S'$  зсуває лінію пружної деформації кліті (лінія 2 на рис. 2,б) у нове положення (лінія 3 на рис. 2,б), а початкову робочу точку  $A$  процесу прокатки – у точку  $B$ . При цьому відхилення  $\Delta h_e$  товщини прокату від початкового значення  $h$  визначається подібно до виразу (2) як

$$\Delta h_e = -\frac{M_K}{M_{II} + M_K} \Delta S_e, \quad (6)$$

а зменшення сили прокатки  $\Delta P_e$  становить

$$\Delta P_e = M_{II} \Delta h_e. \quad (7)$$

З урахуванням від'ємного знаку  $\Delta h_e < 0$  на цю зміну сили прокатки AGC-система відреагує видачею завдання на додаткове зменшення зазору

$$\Delta S = \frac{M_{II} \Delta h_e}{M_K}, \quad (8)$$

яке й відпрацьовуватиметься ГНП.

Структурна схема описаного AGC-регулювання наведена на рис. 4.

Функція передачі AGC-системи  $W^{AS}$  за каналом  $\Delta S_e$  має вигляд

$$W^{AS}(p) = \frac{M_K}{M_K + M_{II}(1 - W_{ГНП})}, \quad (9)$$

що в умовах використання ідеального за точністю та безінерційного натискного пристрою ( $W_{ГНП}(p)=1$ ) відповідає режиму абсолютно жорсткої кліті, коли  $W^{AS}(p)=1$  та  $\Delta h_e = \Delta S_e$ , тобто ексцентриситет валків цілковито переноситься на прокат.

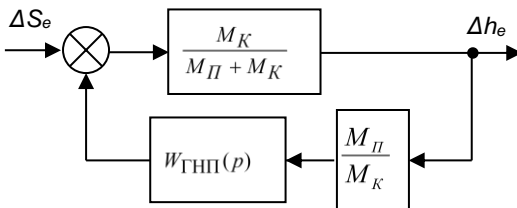


Рисунок 4 –  
Структурна схема  
AGC-регулювання за  
ексцентриситетом  
валків.

Якщо у першому наближенні представити ГНУ аперіодичною ланкою першого порядку з функцією передачі

$$W_{ГНП}(p) = \frac{1}{Tp + 1},$$

функція передачі AGC-системи матиме вигляд

$$W^{AS}(p) = \frac{Tp}{Tp \frac{M_{\Pi} + M_{\kappa}}{M_{\kappa}} + 1} \quad (10)$$

АЧХ такої системи

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{T^2 \omega^2 + 1}{T^2 \omega^2 \left( \frac{M_{\Pi} + M_{\kappa}}{M_{\kappa}} \right)^2 + 1}} \quad (11)$$

по суті виражає в аналітичній формі залежність запропонованого в роботі [2] показника ефективності AGC-системи як від частоти  $\omega$  обертання валків, так й від сталої часу  $T$  ГНП.

На рис. 5 наведені побудовані за (11) графіки цієї залежності, які підтверджують майже лінійний її характер на ділянках, що відповідають розумним (з огляду на практично спостережені) діапазнам зміни  $\omega$  [ $5 \div 20 \text{ c}^{-1}$ ] та  $T$  [ $0,005 \div 0,02 \text{ c}$ ]. Така лінійність створює підстави для застосування адаптивних алгоритмів визначення фактичної амплітуди коливань міжвалкового зазору шляхом екстраполяції результатів вимірювання товщини прокату на виході безперервного стана.

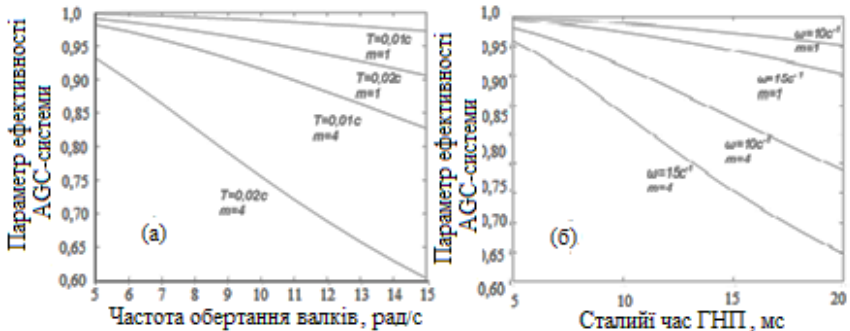


Рисунок 5 – Залежність параметра ефективності AGC-системи від частоти обертання валків (а) та сталої часу ГНП (б).

## Висновки

1. За наявної швидкодії гідравлічних натискних пристроїв AGC-алгоритм забезпечує високу ефективність регулювання товщини прокату в умовах дії височастотних збурень за товщиною підкату. Зокрема, для умов безперервної холодної прокатки тонких смуг різнотовщинність не перевищує 0,024 мм, що відповідає вимогам до прокату високій точності

2. В умовах регулювання товщини прокату за AGC-алгоритмом амплітуда спричинених ексцентриситетом валків коливань товщини прокату є меншою за амплітуду спричинених ексцентриситетом коливань міжвалкового зазору й зменшується зі зростанням частоти обертання валків

та сталої часу ГНП за близьким до лінійного законом.

### Перелік посилань

1. Фомин Г. Г., Дубейковский А. В., Гринчук П. С. Механизация и автоматизация станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1979. 232 с.
2. Потап О. Ю., Зінченко М. Д., Михайловський М. В., Півень В. О. Дослідження впливу швидкодії натискних пристроїв на точність автоматичного регулювання товщини листового прокату. *Теорія і практика металургії*. 2019. №4. С. 5-14. DOI: 10.34185/tpm.4.2019.01
3. Спосіб регулювання товщини смуги з компенсацією ексцентриситету прокатних валків: Пат. 118065 Україна, МКІ 7 В21В/37/66 / О. Ю. Потап, М. Д. Зінченко; № а201711653; заявл. 29.11.2017; опубл. 25.04.2019, Бюл. №18. 14 с.
4. Спосіб автоматичного регулювання товщини смуги з компенсацією ексцентриситету прокатних валків: Пат. 122616 Україна, МКІ 7 В21В37/66 / О. Ю. Потап, М. Д. Зінченко, М. О. Потап та ін. № а201901596; заявл. 18.02.2019; опубл. 10.12.2020, Бюл. №23. 10с.
5. Потап О. Ю., Зінченко М. Д., Рибальченко М. О., Потап М. О. Комп'ютерне моделювання автоматизованої системи компенсації ексцентриситету прокатних валків. *Системні технології*, 2018, Вип. 2 (115). С. 75-83.
6. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1975, 336 с.

### References

1. Fomin G. G., Dubeykovsky A. V., Grinchuk P. S. Mekhanyzatsiia i avtomatyziatsiia stanov goryachei prokatky [Mechanization and automation of hot rolling mills]. М.: Metalurhiia, 1979, 232 p.
2. Potap O. Yu., Zinchenko M. D., Mikhailovskyi N. V., Piven V. O. Doslidzennia vplyvu shvidkodyy natysknyh prystroyiv na tochnyst avtomatychnoho regulyuvannia tovchyny lystovoho prokatu [Research on the impact of the vertical adjustment device rapidity on the accuracy of the automatic thickness control of the rolled plate]. *Teoriia i praktika metallurhyy [Theory and Practice of Metallurgy]*, 2019, 4, P. 5-14. DOI: 10.34185/tpm.4.2019.01.
3. Potap O. Yu., Zinchenko M. D. Sposyby regulyuvannia tovchyny smugy z kompensatsiyeu ekstsentrysyetu prokatnykh valkov [The method of adjusting the strip thickness with compensation of the eccentricity of rolling rolls]. UA Patent No 118065, 2019, 14 p.
4. Potap O. Yu., Zinchenko M. D., Potap M. O. Sposyby avtomatychnoho regulyuvannia tovchyny smugy z kompensatsiyeu ekstsentrysyetu prokatnykh valkov [The method of automatic adjustment of the strip thickness with compensation of the eccentricity of rolling rolls] UA Patent No 122616, 2020, 10 p.
5. Potap O. Yu., Zinchenko M. D., Rybalchenko M. O., Potap M. O. Kompyuterne modelyuvannia avtomatyzovanoi systemy kompensatsyy ekstsentrysyetu prokatnykh valkov [Computer modeling of the automated system for compensating the eccentricity of the rolls]. *Systemny tekhnologyy [System technologies]*, 2018, 2(115), P. 75-83.
6. Druzhynyn N. N. Nepreryvniie stany kak obiyekt avtomatyziatsyy [The continuous mills as an object of automation]. М.: Metalurhiia, 1975, 336 p.



O. Yu. Potap, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0001-8643-0228  
 A. V. Ivanichyk, Student

*Ukrainian State University of Science and Technologies*

**THE ACCURACY OF ROLLING THICKNESS ADJUSTMENT  
 IN CONDITIONS OF HIGH-FREQUENCY DISTURBANCES TAKING  
 INTO ACCOUNT THE SPEED OF ROLL SETTING DEVICES**

**Summary.** In the continuous mills, where the strip thickness at the entrance contains a high-frequency component caused by the eccentricity of the rolls of the previous cage, the effectiveness of AGC-systems for regulating the thickness of the rolled product depends on the speed of operation of hydraulic roll setting devices (HRSD). Analytical substantiation of the transfer functions of the AGC-system by the eccentricity of the rolls and by the thickness of the undercut, taking into account the real speed of the HRSD has been carried out. The frequency characteristics of the AGC-system are analytically determined. It has been proven that with the available speed of the HPD in the interval of rotation frequencies of the support rolls inherent in cold rolling ( $\omega = 5 - 15 \text{ s}^{-1}$ ), the amplitude-frequency characteristic (AFC) of the AGC-system is almost linear. AFC depending on the time constant  $T$  of the HRSD and the ratio of the modulus of rigidity of the rolling strip  $M_{II}$  to the modulus of rigidity of the rolling stand  $M_K$  varies within wide limits from  $A(5)=0.05$  (at  $\omega = 5\text{s}^{-1}$ ;  $T=0.01 \text{ s}$ ;  $M_{II}/M_K = 1$ ) to  $A(15)=0.48$  (at  $\omega = 15 \text{ s}^{-1}$ ;  $T = 0.01 \text{ s}$ ;  $M_{II}/M_K = 4$ ). At the same time, the thickness variation at the outlet of the cage meets the requirements for thin cold-rolled products of high precision. It has been proved that under the conditions of regulation of the thickness of the rolling strip according to the AGC-algorithm the amplitude of the oscillations of the rolled thickness caused by the eccentricity of the rolls is smaller than the amplitude of the oscillations of the roll gap caused by the eccentricity and decreases with an increase in the rotation frequency of the rolls and the time constant of the HRSD according to a close to linear law. Such linearity creates the basis for the application of adaptive algorithms for determining the actual amplitude of fluctuations of the roll gap in automated systems for compensating the eccentricity of the rolls.

**Key words:** Roll thickness control, AGC-algorithm, roll eccentricity, hydraulic roll setting device, transfer function.

**For citation:** Potap O. Yu., Ivanichyk A. V. Tochnist rehuliuвання товщини прокату в умовах високочастотних збурень з урахуванням швидкодії натяскних пристроїв [The accuracy of rolling thickness adjustment in conditions of high-frequency disturbances taking into account the speed of roll setting devices]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. Collection 36. 2022. P. 299-307. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-299-307.

*Стаття надійшла до редакції збірника 27.10.2022 р.  
 Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*