

УДК 669.18:66-935

<https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.01>

Потап О.Ю., Зінченко М.Д., Михайловський М.В., Півень В.О.

Дослідження впливу швидкодії натискних пристроїв на точність автоматичного регулювання товщини листового прокату

Potap O., Zinchenko M., Mikhailovsky N., Piven V.

Research on the impact of the vertical adjustment device rapidity on the accuracy of the automatic thickness control of the rolled plate

Метою роботи є виявлення закономірностей впливу швидкодії гідравлічних натискних пристроїв на точність регулювання товщини AGC-системами.

Теоретично доведено, що використання AGC-алгоритму дозволяє повністю компенсувати збурення, які вносяться в процес прокатки з боку підкату (змінення товщини та температури підкату). Доведено також, що AGC-система за умови використання безінерційних натискних пристроїв забезпечує повне відтворення на товщині прокату коливань міжвалкового зазору, які спричинені ексцентриситетом валків. Запропоновано використати відношення амплітуди коливань товщини прокату до амплітуди ексцентриситету як показник впливу швидкодії натискних пристроїв на якість роботи AGC-системи.

За результатами комп'ютерного експерименту на створеній моделі проаналізовано вплив швидкодії гідравлічних натискних пристроїв на точність регулювання товщини в умовах дії технологічних збурень за товщиною підкату та ексцентриситетом валків. Виявлено близьку до лінійної залежність між показниками швидкодії та залишковою різнотовщинністю, що дозволяє в подальшому суттєво спростити урахування реальної швидкодії натискних пристроїв для підвищення точності систем регулювання товщини прокату.

Ключові слова. Автоматичне регулювання товщини прокату, алгоритм управління, швидкодія натискних пристроїв, комп'ютерне моделювання.

The purpose of the work is to identify the patterns of influence of the speed of hydraulic pressure devices on the accuracy of adjustment of thickness AGC-systems.

It is theoretically proved that the use of the AGC-algorithm allows to completely compensate for the perturbations that are introduced into the rolling process from the outside (changing the thickness and temperature of the strip). It is also proved that the AGC-system, provided the use of inertialess pressure devices, provides full reproduction of the rolling of oscillations of the roll gap, which is caused by the eccentricity of the rolls. It is proposed to use the ratio of the amplitude of the rolling thickness to the amplitude of the eccentricity as an indicator of the influence of the speed of the pressure devices on the quality of the AGC-system.

According to the results of a computer experiment, the influence of the performance of hydraulic pressure devices on the accuracy of thickness adjustment under the conditions of technological perturbations by the initial stock and the eccentricity of the rolls is analyzed on the created model. The relationship between the speed of the pressure device and the uneven gauge was close to linear. This will make it possible in the future to significantly simplify the accounting for the real speed of pressure devices in order to increase the accuracy of rolled thickness control systems

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. На сучасних листових прокатних станах для забезпечення необхідної точності вертикального розміру прокату найчастіше застосовуються системи автоматичного регулювання товщини (САРТ), в яких коригування міжвалкового зазору ΔS здійснюється за рівнянням

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

де ΔP – відхилення поточної сили прокатки від вихідного значення, а M_K – модуль жорсткості прокатної кліті [1]. В роботах вітчизняних дослідників ці системи називають САРТ за рівнянням Головіна-Симса, тоді як в англомовних джерелах вони фігурують як Automatic Gauge Control (AGC) Systems. Зазвичай для доведення правоможності AGC-алгоритму (1) обмежуються розглядом відомого рівняння Головіна-Симса, в якому після запису у прирістах

$$\Delta h = \Delta S + \frac{\Delta P}{M_K}, \quad (2)$$

дорівнюють нулю приріст Δh .

Проте, такий підхід є занадто спрощеним, оскільки не враховує позитивного зворотного зв'язку, що виникає між параметрами ΔP та ΔS під час регулювання. То ж, ефективність алгоритму (1) потребує більш ретельного доведення. До того ж на точність такої компенсації значною мірою впливатиме швидкодія натискних пристроїв кліті, що змінюватимуть міжвалковий зазор згідно з алгоритмом (1). Урахування зазначеного впливу є важливим для забезпечення ефективної роботи САРТ та систем автоматичної компенсації ексцентриситету валків і потребує якісного та кількісного аналізу.

Численні дослідження динаміки гідравлічних натискних пристроїв прокатних клітей, починаючи з 1970-80-х років, стосувались, як правило, їхньої спроможності компенсувати низькочастотні відхилення товщини та температури підкату, що утво-

роють переважну більшість технологічних збурень при виробництві листового прокату. У той же час особливості прояву обмеженої швидкодії гідронатисних пристроїв при наявності високочастотних коливань товщини підкату, що спричинені, наприклад, ексцентриситетом попередніх клітей, залишилися поза увагою дослідників.

Низкою авторів розглядалися вимоги до гідронатисних пристроїв як виконавчих механізмів систем автоматичної компенсації ексцентриситету валків (САКЕ) [2 - 5]. Наведені в цих роботах результати досліджень перехідних процесів у зазначених пристроях свідчать про припустимість їхнього математичного опису як ланок першого порядку з постійними часу 0,01-0,03 с. З огляду на досягнуту швидкість пересування валків у 2 – 4 мм/с авторами робиться, зазвичай, загальний висновок щодо можливості усунення високочастотних збурень за допомогою таких пристроїв. Проте, ефективність САКЕ значною мірою визначається алгоритмом функціонування і може виявитись обмеженою навіть за достатньо високих показників швидкодії натисних механізмів [6, 7]. Тому для якісного урахування особливостей функціонування натисних пристроїв певної швидкодії у складі САПТ важливо чітко розуміти механізм їхнього впливу на динаміку регулювання товщини.

Мета роботи полягає у дослідженні шляхом імітаційного моделювання на комп'ютерній моделі і виявленні закономірностей впливу швидкодії

Чергове коригування зазору

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

приведе до чергового прирощення сили $\Delta P''' = P''' - P'' = \frac{M_K M_{II}}{M_K + M_{II}} \Delta S''$,

а те – до чергового коригування зазору

$$\Delta S''' = S'' - S''' = \frac{\Delta P'''}{M_K} = \left(\frac{M_{II}}{M_K + M_{II}} \right)^2 \Delta S' \quad (4)$$

і т.д.

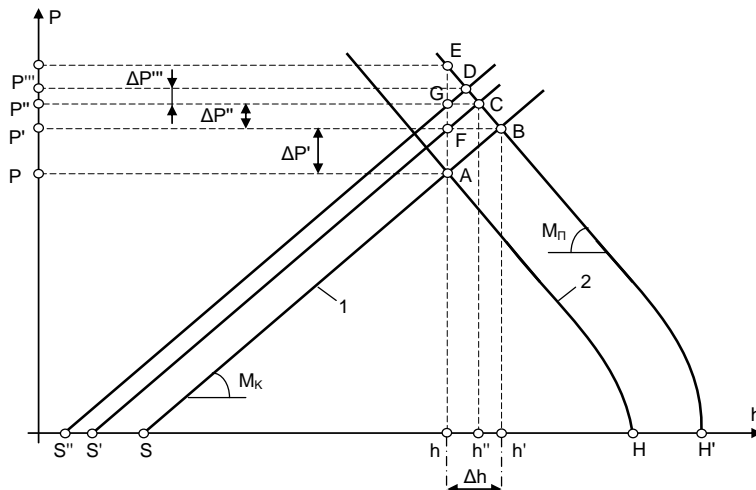


Рисунок 1 – До обґрунтування алгоритму регулювання товщини

гідравлічних натисних пристроїв на точність регулювання товщини системами "Automatic Gauge Control".

Матеріали і результати дослідження. Звернімось до розрахункової схеми процесу прокатки (рис. 1) з вихідною робочою точкою А, яка утворюється на перетині пружної лінії 1 клітей та кривої 2 пластичності і визначає товщину h прокату на виході клітей та відповідну силу P прокатки. Уявімо появу в процесі прокатки технологічного збурення, наприклад, через стрибкоподібну зміну товщини підкату від значення H до H' . Це призведе до переходу процесу до точки В з відповідною змінною силою прокатки $\Delta P' = P' - P$ та товщини прокату $\Delta h' = h' - h$.

В умовах роботи САПТ за алгоритмом (1) відбудеться коригування міжвалкового зазору S на

величину $\Delta S' = S - S' = \frac{\Delta P'}{M_K}$, після чого нова

робоча точка С відповідатиме новому приростанню сили $\Delta P'' = P'' - P'$, яке з геометричних співвідношень трикутника ΔCBF становитиме

$$\Delta P'' = \frac{M_K M_{II}}{M_K + M_{II}} \Delta S',$$

де M_{II} – модуль жорсткості прокату.

Легко бачити, що покровкові коригування зазору (1), (3), (4) і т.д. являють собою спадну геометричну прогресію з початковим членом $b_1 = \Delta S' = \frac{\Delta P'}{M_K}$

і знаменником $q = \frac{M_{II}}{M_K + M_{II}}$. Отже, в результаті

реагування САРТ на стрибкоподібне збурення міжвалковий зазор буде скоригований на суму членів такої прогресії і загальне коригування дорівнюватиме величині

$$\Delta S = \frac{\Delta P'(M_K + M_{II})}{M_K^2} \quad (5)$$

З огляду на зв'язок товщини прокату зі зміною зазору співвідношенням

$$\Delta h = \frac{M_K}{M_K + M_{II}} \Delta S \quad (6)$$

після підстановки (5) до (6) вийдемо, що по завершенні процесу регулювання остаточне коригування товщини прокату відносно значення h' становитиме $\Delta h = \frac{\Delta P'}{M_K} i$, як впливає з рис.1, призведе до повної компенсації початкового відхилення товщини.

Отже, можна вважати доведеним, що використання AGC-алгоритму дозволяє повністю компенсувати збурення, що вносяться в процес прокатки з боку підкату (змінення товщини та температури підкату). Проте, цей спосіб не забезпечує компенсації збурення за ексцентриситетом валків, що ілюструється розрахунковою схемою, яка наведена на рис. 2.

У випадку змінення через ексцентриситет валків міжвалкового зазору S на величину ΔS_e у бік, наприклад, зменшення лінія пружної деформації кліті пересунеться з положення 2 до положення 3, а початкова робоча точка А процесу прокатки – у точку В. При цьому, як виходить зі схеми на рис. 2, сила прокатки збільшиться на величину

$$\Delta P_e = \Delta S_e \frac{M_{II} M_K}{M_{II} + M_K}, \quad (7)$$

а товщина прокату зменшиться на величину

$$\Delta h_e = \Delta S_e \frac{M_K}{M_{II} + M_K}. \quad (8)$$

Ця ситуація буде помилково інтерпретована AGC-системою як наслідок впливу збурення: наприклад, збільшення товщини підкату, що призвело до пересування кривої 1 у нове положення – 4 (пунктирна лінія на рис. 2), а робочої точки А – у точку С. Тобто AGC-система замість того, щоб усувати спричинене ексцентриситетом відхилення товщини Δh_e , усуватиме фіктивне відхилення $\Delta \hat{h}$.

При цьому визначений системою за формулою (1) керуючий вплив буде спрямований на подальше зменшення зазору. Аналогічним чином у випадку збільшення зазору через ексцентриситет валків визначений системою керуючий вплив буде спрямований на подальше збільшення зазору. Отже використання AGC-алгоритму не тільки не усуватиме негативний вплив ексцентриситету на товщину прокату, а навпаки – підсилюватиме його. При цьому результатом роботи AGC-системи буде повне перенесення ексцентриситету на прокат

$$\Delta h = \Delta S_e. \quad (9)$$

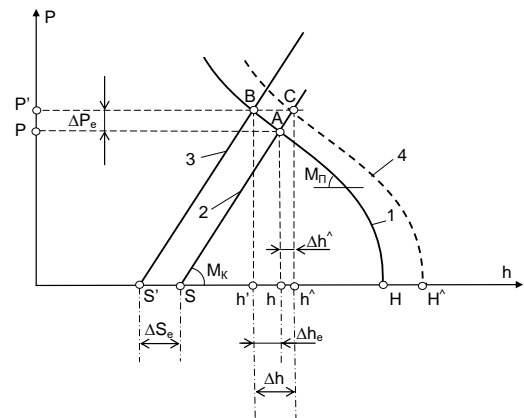


Рисунок 2 – Реагування САРТ, що реалізує AGC-алгоритм, на ексцентриситет валків

Дійсно, до спричиненого ексцентриситетом відхилення товщини Δh_e системою буде додано відхилення $\Delta \hat{h}$. Відтак сумарне відхилення Δh становитиме (див. рис. 2)

Зауважимо, що висновок (9) було отримано без урахування реальної швидкості пересування вал-

ків, або, точніше, за припущення про миттєве відпрацювання AGC-системою завдання на зміну міжвалкового зазору. На практиці ж валки пересуватимуться з певною кінцевою швидкістю і, розглядаючи гідронатискний привод як лінійну ланку, можна при функціонуванні AGC-системи впевнено очікувати замість рівності (9) нерівність $\Delta h < \Delta S_e$.

$$\begin{aligned} \Delta h &= \Delta h_e + \Delta \hat{h} = \Delta S_e \frac{M_K}{M_{II} + M_K} + \frac{\Delta P_e}{M_K} = \\ &= \Delta S_e \frac{M_K}{M_{II} + M_K} + \Delta S_e \frac{M_{II}}{M_{II} + M_K} = \Delta S_e. \end{aligned} \quad (10)$$

Для повільніших натискних пристроїв, або за зростання частоти обертання валків зазначена нерівність підсилуватиметься. Очевидно, що найбільш зручним показником впливу швидкодії натискних пристроїв на якість роботи AGC-системи можна вважати відношення

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta S_e}$$

Через громіздкі аналітичні викладки дослідити показник α зручніше засобами комп'ютерного моделювання.

Схема опрацьованої моделі, створеної у пакеті MATLAB-Simulink, наведена на рис. 3.

Модель побудована з низки функціональних блоків, які імітують роботу окремих складових об'єкту автоматизації та системи. Зокрема, блок **Rolling mill** моделює процеси, що протікають у прокатній кліті. На входи цього блоку подаються поточні значення технологічних змінних: товщини підкату $H(t)$, жорсткості смуги $M_{II}(t)$ та міжвалкового зазору $S_0(t)$, а на його виходи видаються поточні значення сили прокатки $P(t)$ та вихідної товщини прокату $h(t)$

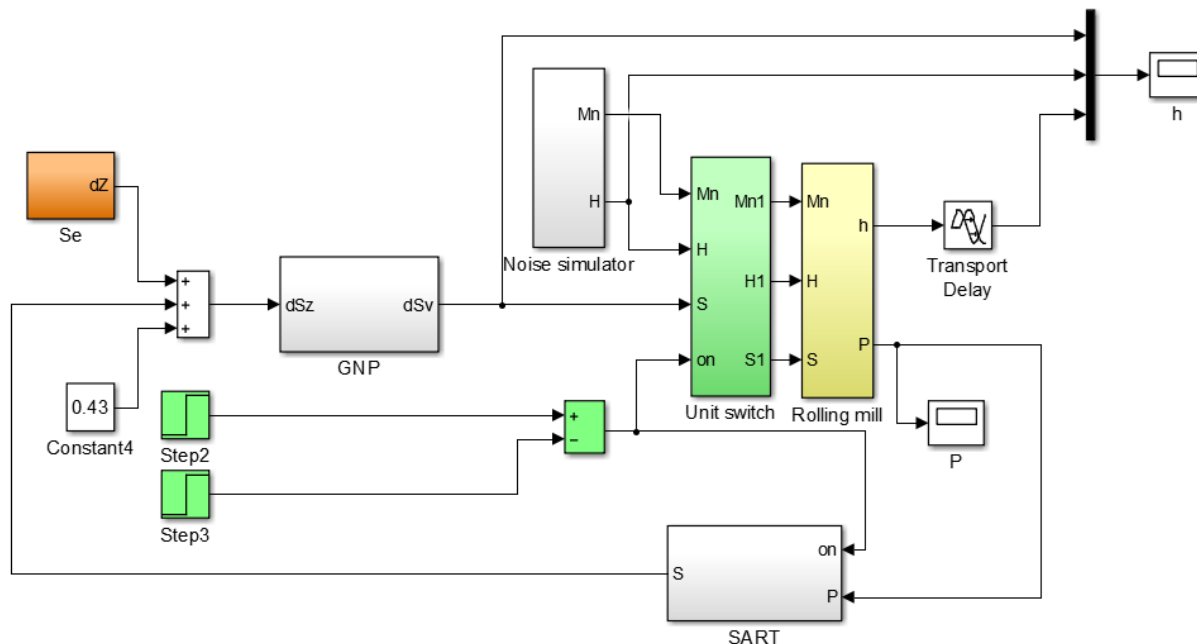


Рисунок 3 – Схема моделі функціонування AGC-системи в пакеті MATLAB-Simulink
Сила прокатки розраховується за формулою

$$P(t) = \frac{M_{II}M_K}{M_{II} + M_K} [H(t) - S_0(t)] \quad (11)$$

що впливає з очевидних геометричних співвідношень (див. рис. 1).

Товщина прокату легко визначається за рівнянням Головина-Симса

$$h(t) = S_0(t) + \frac{P(t)}{M_K} \quad (12)$$

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

Робота гідравлічного натискного пристрою з огляду на дані робіт [1-3] імітується ланкою першого порядку (блок **GNP**) з функцією передачі

$$W(p) = \frac{1}{Tp + 1}, \quad (13)$$

де T - постійна часу.

Блок **SART** реалізує AGC-алгоритм, отримуючи інформацію про поточне значення сили P прокатки від блоку **Rolling mill** і надсилаючи сигнал ΔS коригування зазору до блоку **GNP** крізь суматор, де він додається до вихідного зазору та доданку ексцентриситету.

Моделювання виконувалось для умов холодної прокатки смуги товщиною $h=1,47$ мм з підкату товщиною $H=1,89$ мм та модулем жорсткості $M_{II}=5,95$ МН/мм у кліті з модулем жорсткості $M_K=2,4$ МН/мм та ексцентриситетом валків $\Delta S_e=0,08$ мм при розрахунковій силі прокатки $P=2,5$ МН.

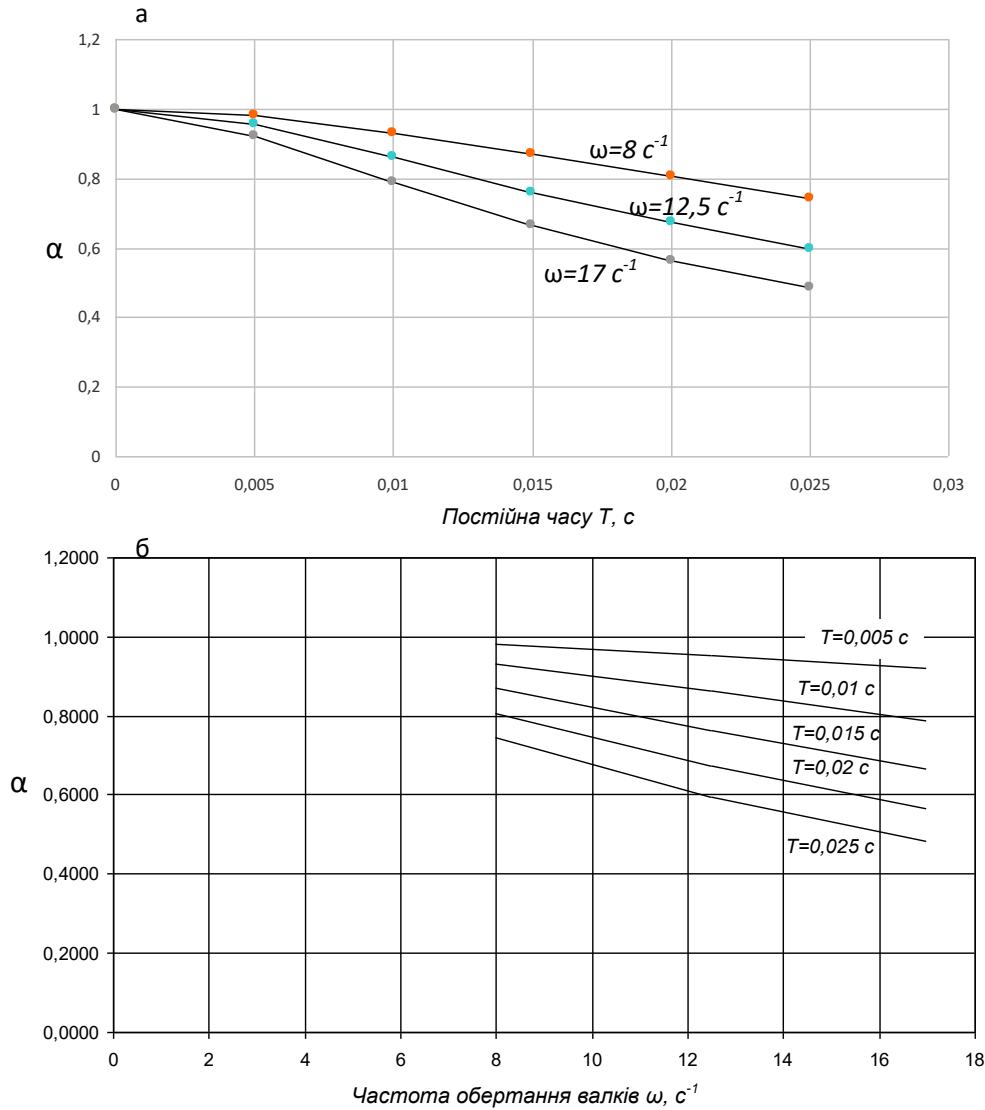


Рисунок 4 – Вплив постійної часу гідронатисного пристрою (а) та частоти обертання валків (б) на точність АГС-системи

Комп'ютерний експеримент проводили відтворюючи прокатку за різної частоти обертання валків та для натискних пристроїв різної швидкодії. Частоту валків змінювали в діапазоні $\omega = 8,0 - 17,0 \text{ c}^{-1}$, а постійну часу гідроприводу – в діапазоні $T = 0,005 - 0,025 \text{ c}$.

Висновки. Отримані за результатами дослідження графіки змінення показника α (див. рис. 4) свідчать про близьку до лінійної залежність цього параметра як від частоти обертання валків, так і від постійної часу гідронатисного

механізму. При цьому чутливість показника α до зазначених параметрів значно перевищує розраховані значення, що впливають з аналізу амплітудно-частотної характеристики спільно розглянутих гідроприводу та прокатної кліті. Найявна лінійність дозволяє суттєво спростити процедуру урахування реальної швидкодії натискних пристроїв для підвищення точності компенсації ексцентриситету в системах регулювання товщини прокату.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОПИС

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. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
3. Филатов А.С. Автоматические системы стабилизации толщины полосы/ А.С. Филатов, А.П. Зайцев, А.А. Смирнов. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
4. Годфрей Г. Гидравлические системы автоматического регулирования толщины и измерения плоскостности на полосопрокатных станах горячей и холодной прокатки. – Davy-McKee (Sheffield) Ltd, 1989. – 21 с.
5. Елисеев С. А. О влиянии скорости перемещения нажимных винтов на эффективность работы САПР для стана 2500 ММК// Автоматизация прокатных станов. – М.: Металлургия, 1976. - С. 42. -43.

6. Потап О. Ю. Комп'ютерне моделювання автоматизованої системи компенсації ексцентриситету прокатних валків / О. Ю. Потап, М. Д. Зінченко, М. О. Рибальченко та ін. // Системні технології. – Вип. 2 (115). – Дніпро, 2018. – С. 75-83.
7. Патент України № 119112. Спосіб регулювання товщини смуги з компенсацією ексцентриситету прокатних валків/ О.Ю. Потап, М.Д. Зінченко – МПК В21В 37/66. Заявка № а201711653, Опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8.

Reference

1. Fomin G.G. Mehanizaciya i avtomatizaciya stanov goryachej prokatki / G.G. Fomin, A.V. Dubejkov-skij, P.S. Grinchuk. – M.: Metallurgiya, 1979. – 232 s.
2. Druzhinin N.N. Nепreryvnye stany kak obekt avtomatizacii. – M.: Metallurgiya, 1975. – 336 s.
3. Filatov A.S. Avtomaticheskie sistemy stabilizacii tolshiny polosy/ A.S. Filatov, A.P. Zaj-cev, A.A. Smirnov. – M.: Metallurgiya, 1982. – 128 s.
4. Godfrej G. Gidravlicheskie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya товshini i izmereniya plos-kostnosti na polosoprokatnih stanah goryachej i holodnoj prokatki. – Davy-McKee (Sheffield) Ltd, 1989. – 21 s.
5. Eliseev S. A. O vliyanii skorosti peremesheniya nazhimnyh vintov na effektivnost raboty SART dlya stana 2500 MMK// Avtomatizaciya prokatnyh stanov. – M.: Metallurgiya, 1976. - S. 42. -43.
6. Potap O. Yu. Komp'yutерne modelyuvannya avtomatizovanoyi sistemi kompensaciyi ексцентриситету прокатних валків / О. Ю. Потап, М. Д. Зінченко, М. О. Рибальченко та ін. // Системні технології. – Вип. 2 (115). – Дніпро, 2018. – С. 75-83.
7. Patent Ukrayini № 119112. Sposib regulyvannya товshini smugi z kompensaciyeyu ексцентриситету прокатних валків/ О.Ю. Потап, М.Д. Зінченко – МПК V21V 37/66. Zayavka № а201711653, Opubl. 25.04.2019, Byul. № 8.

Стаття поступила: 04.06.2019