

УДК 621.771.23-413

М.Г. ІЄВЛЄВ*

УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСНИМИ РЕЖИМАМИ ПРОКАТКИ НА ТОВСТОЛИСТОВИХ СТАНАХ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Управління швидкісними режимами на товстолистових станах (ТЛС) – один із факторів, що визначають ефективність процесу прокатки. Вибір управління швидкістю впливає на продуктивність стану, геометричні розміри прокату (поздовжню різновтовщинність), дотримання заданого температурного режиму, що визначають механічні властивості прокату, та ін. У статті розглянуті обмеження при виборі швидкісних управлінь, які можна розділити на дві групи: обмеження за можливостями прокатних двигунів і технологічні обмеження. Перші визначаються допустимим навантаженням двигуна за умовами надійної комутації струму на колекторі і максимально допустимою швидкістю обертання двигуна. Розглянуті також технологічні обмеження швидкісних управлінь. Швидкість захоплення обмежена по максимуму за умови захоплення металу без перекосу, ударів і динамічних перевантажень по крутному моменту у шпинделях і забезпечення сталого захоплення без пробуксовок, а також по можливості запобігання аварійних ситуацій. Усталена (максимальна) швидкість прокатки може обмежуватися по максимуму умовами стійкості розкату, умовою запобігання налипання металу на валки. Швидкість викиду металу з валків зазвичай вибирається такої величини, щоб пауза, зумовлена гальмуванням листа на рольганзі і подальшим поверненням його до прокатної кліти, не перевищувала часу роботи натискного механізму. У ряді випадків швидкість викиду може визначатися іншими технологічними операціями. Максимальне прискорення головного приводу горизонтальної кліти обмежено за умовами пробуксовки робочого валка щодо опорного. Розглянуто раціональні швидкісні графіки прокатки на товстолистових станах. Вони представляють собою найбільш загальний вигляд швидкісних графіків прокатки на ТЛС. Викладені вище рішення по управлінню швидкісними режимами прокатки можуть бути використані при розробці АСУ ТП товстолистових станів.

Ключові слова: товстолистовий стан, швидкісні режими, раціональні швидкісні графіки, АСУ ТП.

Abstract. Control of speed modes on heavy-plate mills is one of the factors that determine the efficiency of the rolling process. The choice of speed controls influences the mill productivity, geometric dimensions of the rolled product (longitudinal thickness variations) and compliance with the set temperature mode which determine the mechanical properties of the rolled product, etc. The article considers the limitations in the choice of speed controls which can be divided into two groups: limitations of the capabilities of rolling engines and technological limitations. The first group is determined by the allowable engine under the conditions of reliable current switching on the collector and the maximum allowable engine speed. Technological limitations of speed controls are considered in the paper as well. The speed of grasp is limited to the maximum under the condition of metal grasp without skew, blows and dynamic torque overloads in spindles and maintenance of constant grasp without slipping, as well as the possibility of prevention of emergencies. Steady (maximum) rolling speed can be limited to the maximum by the conditions of rolling stability and prevention of sticking of metal to the rolls. The rate of metal release from the rolls is usually chosen in the way so that the pause stipulated by the braking of the sheet on the roller conveyor and its subsequent return to the rolling mill would not exceed the operating time of the pressure mechanism. In some cases, the release rate can be determined by other technological operations. The maximum acceleration of the main drive of the horizontal mill is limited by the conditions of slipping of the working roll towards the support roll. The paper also considers rational speed graphs of rolling on heavy-plate mills. They are the most common type of high-speed rolling graphs on heavy-plate mills. The listed above solutions for the control of high-speed rolling modes can be used in the development of APCS of heavy-plate mills rolling.

Keywords: heavy-plate mill, speed modes, rational speed graphs, APCS of heavy-plate mills rolling.

1. Вступ

Управління швидкісними режимами на товстолистових станах (ТЛС) – один із факторів, що визначають ефективність процесу прокатки. Вибір управління швидкістю впливає на продуктивність стану, геометричні розміри прокату (поздовжню різновтовщинність), дотримання заданого температурного режиму, що визначають механічні властивості прокату, та ін. [1–4].

Метою статті є опис раціональних швидкісних режимів прокатки на товстолистових станах та принципів їх вибору з урахуванням обмежень по параметрах прокатних двигунів і технологічного процесу, а також за умовами мінімізації часу циклу прокатки.

2. Обмеження при виборі швидкісних управлінь

Обмеження при виборі швидкісних управлінь можна розділити на дві групи: обмеження по можливостях прокатних двигунів і технологічні обмеження. Перші визначаються допустимим навантаженням двигуна за умовами надійної комутації струму на колекторі і максимально допустимою швидкістю обертання двигуна. Причому при збільшенні швидкості обертання двигуна ослабленням його магнітного потоку допустимий момент двигуна зменшується:

$$aK + M_{cm} \leq \frac{M_{\max} \eta}{v^2}, \quad (1)$$

де $K = \frac{GD^2}{375}$, GD^2 – маховий момент двигуна, M_{cm} – статичний момент, a – прискорення двигуна, $a = dn/dt$, $M_{\max} = 2,5M_{ном}$, η – коефіцієнт корисної дії приводу, v – відношення поточного значення швидкості обертання двигуна n до номінальної n_n ($v = \frac{n}{n_n}$ при $\frac{n}{n_n} > 1$ і $v = 1$ при $\frac{n}{n_n} \leq 1$).

Електромашинобудівні заводи наводять у паспортних даних двигунів значення кратності допустимого перевантаження по струму при номінальній і максимальній швидкості, що відповідає такій лінійній залежності в діапазоні вище основної швидкості [5]:

$$i_i \leq K_1 - K_2 v_i \quad (2)$$

або
$$i_{cmi} + i_{dini} \leq K_1 - K_2 v_i, \quad (3)$$

де $i_{cmi} = \frac{I_{cmi}}{I_n}$, $i_{dini} = \frac{I_{dini}}{I_n}$, $i_i = \frac{I_i}{I_n}$, $v_i = \frac{V_i}{V_n}$, I_{cmi} , I_{dini} , I_n , I_i – відповідно статичний, динамічний, номінальний і повний струм прокатного двигуна, V_n – номінальна швидкість прокатки, K_1, K_2 – коефіцієнти.

У діапазоні до основної швидкості перевантажувальна здатність двигуна постійна. Швидкість прокатки V впливає на зусилля P і момент прокатки M . Аналіз впливу зміни швидкості прокатки на P і M у діапазоні швидкостей (усталених), що мають місце на товстолистових станах (від 2 м/с до 4 м/с), показує, що в разі використання в розрахунках постійного значення усталеної швидкості 3 м/с (середньої швидкості) помилки у визначенні зусилля і моменту прокатки не перевищують 3% і впливом зміни V на P і M можна знехтувати. Впливом V на інші складові статичного моменту (момент тертя в підшип-

никах і момент холостого ходу) також можна знехтувати, тому $M_{cmi} = f(h_{i-1}, \Delta h_i)$, де h_{i-1} – товщина розкату перед пропуском у кліті, Δh_i – обтиски у пропусках.

Із співвідношення (1) випливає, що швидкісні управління мають обмеження, функціонально пов'язані зі значеннями управлінь Δh_i ; обмеження швидкості по можливостях двигуна здійснюються регулятором навантаження в системі управління електроприводами прокатних валків. Швидкісні управління обмежені також по мінімуму. Ці обмеження визначаються можливостями системи управління приводом.

Розглянемо технологічні обмеження швидкісних управлінь. Швидкість захоплення обмежена по максимуму за умови захоплення металу без перекосу, ударів і динамічних перевантажень по моменту у шпинделях і забезпечення сталого захоплення без пробуксовок, а також по можливості запобігання аварійних ситуацій у горизонтальній кліті при загині розкату вниз або розкритті кінців (при прокатці розкатів з алюмінієвих сплавів).

Усталена (максимальна) швидкість прокатки може обмежуватися по максимуму умовами стійкості розкату, а в перших пропусках у горизонтальній кліті під час прокатки алюмінієвих сплавів, особливо при великих обтисках, умовою запобігання налипання металу на валки. Однак ці обмеження не мають аналітичного визначення і враховуються, виходячи з дослідних даних.

Швидкість викиду металу з валків зазвичай вибирається такої величини, щоб пауза, зумовлена гальмуванням листа на рольганзі і подальшим поверненням його до прокатної кліті, не перевищувала часу роботи натискного механізму. У ряді випадків швидкість викиду може визначатися іншими технологічними операціями, наприклад, передачею розкату в іншу кліть (при поперемінній прокатці в горизонтальній і вертикальній клітях) або в зону дії лінійок маніпуляторів. Викид металу з чистої кліті доцільно здійснювати на максимальній швидкості для зменшення підстуджування кінців розкату.

Максимальне прискорення головного приводу горизонтальної кліті обмежено за умови пробуксовки робочого валка щодо опорного. Для отримання якісної поверхні листів з алюмінію і його сплавів необхідно виключити прослизання металу по рольгангах, для чого у процесі прокатки забезпечується синхронізація лінійних швидкостей і прискорень розкату, робочих валків прокатної кліті і рольгангів, а в паузах між пропусками – прискорення, при якому відсутнє прослизання металу по рольгангу. Згідно з [5], у цьому випадку $a \leq 1,3 \text{ м/с}^2$.

3. Раціональні швидкісні графіки прокатки

З урахуванням сказаного вище розглянемо раціональні швидкісні графіки прокатки на товстолистових станах. У літературі щодо прокатки досить докладно описані швидкісні режими прокатки на обтискних і товстолистових станах при прокатці сталевих листів [6, 7]. Нижче розглянуті швидкісні графіки, що враховують умови поперемінної прокатки в горизонтальній і вертикальній клітях і необхідність синхронізації швидкостей металу, валків і роликів рольганга для отримання якісної поверхні розкату. Вони представляють собою найбільш загальний вигляд швидкісних графіків прокатки на ТЛС. Час пропуску металу у кліті t_{np} становить $t_{np} = t_m + t_n$, де t_m – машинний час, t_n – час паузи, протягом якого встановлюється новий розчин валків, головний привід реверсують від швидкості викиду до швидкості захоплення, а розкат гальмується на рольганзі і повертається у кліть.

У виразах, що описують швидкісні графіки прокатки, використовується швидкість розкату в осередку деформації металу, що дорівнює лінійній швидкості робочих валків, а в період пауз – швидкість розкату, що дорівнює лінійній швидкості роликів рольганга. Для спрощення зазначених виразів прийнято, що довжина розкату після пропуску L_i дорівнює

шляху S_i , пройденого валками у цьому пропуску. Насправді L_i і S_i відрізняються через випередження металу валків на виході з валків, яке становить 3–6%.

Формування раціональних швидкісних графіків у процесі розгону і гальмування приводів, а також регулювання швидкостей при зміні навантаження здійснюються системами управління електроприводами, які забезпечують сталість заданих уставок прискорень і швидкостей у межах обмежень по електричних параметрах електродвигунів. У режимах з ослабленням поля струм може досягати гранично допустимої величини і при подальшому ослабленні поля система управління електроприводами обмежує прискорення, що відповідає рівності у виразі (3). Висловимо в (3) i_{cmi} і i_{duni} через m_{cmi} і прискорення a . Використовуючи вирази

$$M_{cmi} = I_{cmi} C_m \Phi_n \frac{V_n}{V_i}, M_{duni} = Ka_i = I_{duni} C_m \Phi_n \frac{V_n}{V_i}$$

і переходячи в (3) до рівності, отримуємо

$$v_i \left(m_{cmi} + \frac{K}{M_n} \cdot \frac{dV_i}{dt} + K_2 \right) = K_1, \quad (4)$$

де C_m – постійна, Φ_n – номінальний потік двигуна, $m_{cmi} = \frac{M_{cmi}}{M_n}$, $m_{duni} = \frac{M_{duni}}{M_n} = \frac{Ka}{M_n}$,

$$a' = \frac{a}{V_n}.$$

Моменту завершення розгону приводу (тобто при $a = \frac{dV_i}{dt} = V_n \frac{dv_i}{dt} = 0$) відповідає максимально можлива усталена швидкість, яка, з урахуванням (4), складе

$$v_{yi} = \frac{K_1}{m_{cmi} + K_2} \quad (5)$$

або $v_{yi} = v_{max}$, якщо v_{yi} , обчислена за (5), перевищує v_{max} . Перетворимо диференціальне рівняння (4) до вигляду

$$\frac{KV_n}{M_n} \cdot \frac{v_i dv_i}{K_1 - v_i (K_2 + m_{cmi})} = dt, \quad (6)$$

звідки час розгону металу в валках при змінному прискоренні

$$t_p = -\frac{KV_n}{M_n} \left[\frac{v_i}{K_2 + m_{cmi}} + \frac{K_1}{(K_2 + m_{cmi})^2} \ln |K_1 - v_i (K_2 + m_{cmi})| \right] \quad (7)$$

і довжина смуги, прокатана за час t_p ,

$$L_p = \int_{v_p'}^{v''} v_i dt = \frac{KV_n}{M_n} \int_{v_p'}^{v''} \frac{v_i^2 dv_i}{K_1 - v_i (K_2 + m_{cmi})} =$$

$$= \frac{KV_n}{M_n} \left[\frac{K_1 v_i}{(K_2 + m_{cmi})^2} + \frac{v_i^2}{2(K_2 + m_{cmi})} + \frac{K_1^2}{(K_3 + m_{cmi})^3} \ln |K_1 - v_i (K_2 + m_{cmi})| \right]. \quad (8)$$

У виразах (7) і (8) v_i змінюється від v'_p до v'' , де $v'_p = \frac{K_1}{m_{cmi} + \frac{Ka_0}{M_n} + K_2}$, a_0 – прискорення до основної швидкості, $v'' = 0,95$.

Перехідний процес вважається закінченим при $|v_i - v_{yi}| \leq 0,05v_{yi}$.

При гальмуванні приводу з металом у валках вираз (3) у відносних одиницях представляється в такий спосіб:

$$i_{cmi} - i_{dini} \leq K_1 - K_2 v_i. \quad (9)$$

Відповідно час гальмування головного приводу з металом у валках при змінному прискоренні складе

$$t_T = \frac{KV_n}{M_n} \left[\frac{V_i}{K_2 + m_{cmi}} + \frac{K_1}{(K_2 + m_{cmi})^2} \ln |v_i (K_2 + m_{cmi}) - K_1| \right] \quad (10)$$

і довжина смуги, прокатана за час t_T ,

$$L_T = \frac{KV_n}{M_n} \left[\frac{K_1 v_i}{(K_2 + m_{cmi})^2} + \frac{v_i^2}{2(K_2 + m_{cmi})} + \frac{K_1^2}{(K_2 + m_{cmi})^3} \ln |v_i (K_2 + m_{cmi}) - K_1| \right]. \quad (11)$$

У виразах (10) і (11) v_i змінюється від v'_T до v'' , де $v'_T = \frac{K_1}{m_{cmi} - \frac{Ka_0}{M_n} + K_2}$,

$v'' = 0,95v_{yi}$.

При розгляді швидкісних графіків прокатки на реверсивних станах, як правило, прискорення розгону і гальмування приймаються постійними, що істотно спрощує опис швидкісних режимів (у дійсності системи управління електроприводами прокатних станів забезпечують до основної швидкості двигуна постійне прискорення, а вище основної при досягненні струмом гранично допустимої величини – зниження прискорень). У подальшому викладі також прийнято допущення, що розгін і гальмування приводу в усьому діапазоні зміни швидкості здійснюються з постійним прискоренням.

Правомірність такого припущення перевірена і підтверджена для реальних діапазонів зміни величин, відповідних обладнанню та технології прокатки конкретного ТЛС, шляхом порівняння результатів розрахунку часу пропуску з використанням формул (7), (8), (10), (11) для швидкісного графіка зі змінним прискоренням у процесі розгону вище номінальної швидкості і за формулою

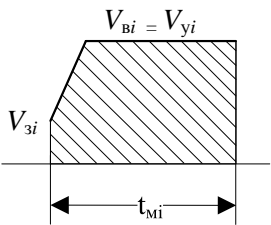
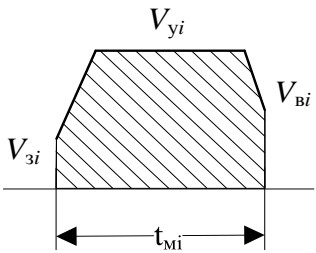
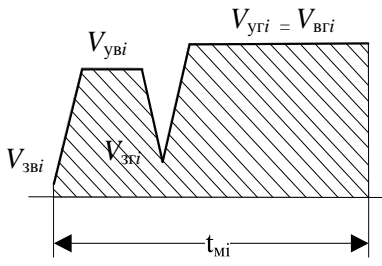
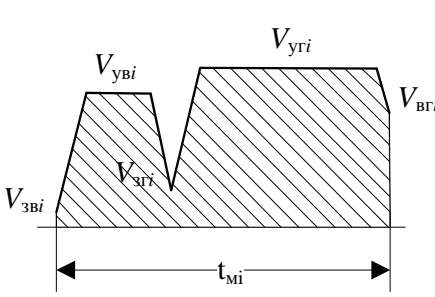
$$t_{npi} = \frac{v_{yi} - v_{zi}}{a'_0} + \frac{v_{yi} - v_{ei}}{a'_0} + \frac{L_i}{v_{yi} V_n} - \frac{v_{yi}^2 - v_{zi}^2}{2a'_0 v_{yi}} - \frac{v_{yi}^2 - v_{ei}^2}{2a'_0 v_{yi}} + t_n = \frac{v_{yi} - v_{zi} - v_{ei}}{a'_0} + \frac{L_i}{v_{yi} V_n} + \frac{v_{zi}^2 + v_{ei}^2}{2a'_0 v_{yi}} + t_n \quad (12)$$

для швидкісного графіка, де прискорення прийнято постійним у всьому діапазоні швидкостей. Похибка результатів обчислень по (12) щодо результатів, отриманих із використан-

ням формул (7), (8), (10), (11), становила менше 1% від тривалості пропуску, що цілком допустимо.

Відповідно до розглянутих вище обмежень швидкісних управлінь та особливостей обладнання і технології прокатки на ТЛС визначені швидкісні графіки прокатки, вид яких і вирази для визначення машинного часу і часу паузи, наведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Параметри швидкісних графіків. Машинний час прокатки

| Но- мер з/п | Умови реалізації | Вид швидкісного графіка | Машинний час прокатки, $t_{м, с}$ |
|-------------------|--|---|--|
| 1 | Прокатка в горизонтальній або вертикальній кліті |  | $t_{mi} = \frac{V_{Bi} - V_{zi}}{a} + \frac{L_i}{V_{Bi}} - \frac{V_{Bi}^2 - V_{zi}^2}{2aV_{Bi}} \quad (13)$ |
| 2 | Прокатка в горизонтальній або вертикальній кліті |  | $t_{mi} = \frac{V_{yi} - V_{zi}}{a} + \frac{V_{yi} - V_{Bi}}{a} + \frac{L_i}{V_{yi}} - \frac{V_{yi}^2 - V_{zi}^2}{2aV_{yi}} - \frac{V_{yi}^2 - V_{Bi}^2}{2aV_{yi}} \quad (14)$ |
| 3 | Одновременна прокатка у двох клітях |  | $t_{mi} = \frac{V_{yBi} - V_{zBi} - V_{z\Gamma i}}{a} + \frac{L_{\Gamma-B}}{V_{yBi}} + \frac{V_{zBi}^2 + V_{z\Gamma i}^2}{2aV_{yBi}} + \frac{V_{y\Gamma i} - V_{z\Gamma i}}{a} + \frac{L_i}{V_{y\Gamma i}} - \frac{V_{y\Gamma i}^2 - V_{z\Gamma i}^2}{2aV_{y\Gamma i}} \quad (15)$ |
| 4 | Одновременна прокатка у двох клітях |  | $t_{mi} = \frac{V_{yBi} - V_{zBi} - V_{z\Gamma i}}{a} + \frac{L_{\Gamma-B}}{V_{yBi}} + \frac{V_{zBi}^2 + V_{z\Gamma i}^2}{2aV_{yBi}} + \frac{V_{y\Gamma i} - V_{z\Gamma i}}{a} + \frac{L_i}{V_{y\Gamma i}} - \frac{V_{y\Gamma i}^2 - V_{z\Gamma i}^2}{2aV_{y\Gamma i}} - \frac{V_{y\Gamma i}^2 - V_{B\Gamma i}^2}{2aV_{y\Gamma i}} \quad (16)$ |

Цими графіками передбачена прокатка розкатів у горизонтальній кліті як окремо, так і одночасно в горизонтальній і вертикальних клітях. У табл. 1 і 2 наведено найбільш загальний вигляд швидкісних графіків. В окремих випадках можуть бути відсутні окремі ділянки гальмування і розгону, і трапецеїдальні графіки можуть перетворюватися у трикутні і прямокутні.

Таблиця 2 – Параметри швидкісних графіків. Час пауз

| Но- мер з/п | Умови реалізації | Вид швидкісного графіка | Час пауз, $t_{п, с}$ |
|-------------------|---|-------------------------|--|
| 1 | Між пропусками в одній кліті | | $t_{ni} = \frac{V_{Bi} + V_{pi} + V_{3i+1}}{a} + \frac{V_{Bi}^2 + V_{3i+1}^2}{2aV_{pi}} \quad (17)$ |
| 2 | Між пропусками в різних клітях | | $t_{ni} = \frac{V_{pi} - V_{Bi}}{a} + \frac{V_{pi} - V_{3i+1}}{a} + \frac{L_{Г-B} - V_i}{V_{pi}} - \frac{V_{pi}^2 - V_{Bi}^2}{2aV_{pi}} - \frac{V_{pi}^2 - V_{3i+1}^2}{2aV_{pi}} \quad (18)$ |
| 3 | Перед пропуском з одночас- ною про- каткою у двох клітях | | $t_{ni} = \frac{V_{pi} - V_{Bi} + V_{3i+1}}{a} + \frac{L_{Г-B}}{V_{pi}} + \frac{V_{Bi}^2 + V_{3i+1}^2}{2aV_{pi}} \quad (19)$ |

Довжина розкату після пропуску визначається за формулою

$$L_i = \frac{\lambda_i L_N}{\prod_{j=i}^N \lambda_j}, \quad (20)$$

де L_N – кінцева довжина розкату на етапі, λ_i – витяжка металу в i -му пропуску.

Відомо, що витяжка в вертикальних валках незначна, тому в виразах, які описують швидкісні графіки, прийнято, що довжина розкату в вертикальній кліті не змінюється. Швидкісні графіки 3–4 (табл. 1) з моменту захоплення металу в горизонтальній кліті відображають швидкість металу в зоні осередку деформації в горизонтальних валках. При цьому співвідношення швидкостей валків горизонтальної і вертикальної клітей буде визначатися з відомої умови рівності секундних обсягів металу [8]:

$$F_{Г} V'_{Г} = F_{В} V'_{В}, \quad (21)$$

де F_G і F_B – площі поперечного перерізу металу, що виходить із горизонтальних і вертикальних валків, V'_G і V'_B – швидкості виходу металу з горизонтальних і вертикальних валків.

Швидкості V'_G і V'_B виражаються через швидкості валків V_G і V_B у такий спосіб:

$$V'_G = V_G (1 + S_G), \quad (22)$$

$$V'_B = V_B, \quad (23)$$

де S_G – випередження металу при виході з горизонтальних валків.

Випередження металу в вертикальній кліті внаслідок малої витяжки практично відсутнє. Тоді з рівності (21) з урахуванням (22) і (23), нехтуючи розширенням розкату в горизонтальній кліті, отримуємо таке співвідношення швидкостей валків горизонтальної і вертикальної клітей:

$$\frac{V_G}{V_B} = \frac{H_B}{H_G} \cdot \frac{1}{1 + S_G} = \frac{\lambda_G}{1 + S_G}, \quad (24)$$

де H_G і H_B – товщина металу, що виходить із горизонтальної і вертикальної клітей, λ_G – витяжка в горизонтальній кліті.

Таким чином, описані раціональні швидкісні режими прокатки, які обумовлюють принципи вибору швидкісних управлінь таким чином, щоб мінімізувати машинний час і час паузи кожного із пропусків при дотриманні обмежень по можливостях прокатних двигунів і технологічних обмежень. Отримані формули (13)–(20), які пов'язують час пропуску з управліннями \bar{a} , \bar{V} , $\bar{\lambda}$ і дозволяють виразити час циклу прокатки заготовки через ці управління, а також число пропусків.

4. Висновки

Описано раціональні швидкісні режими прокатки на товстолистових станах, принципи їх вибору з урахуванням обмежень по параметрах прокатних двигунів і технологічного процесу, а також за умови мінімізації часу циклу прокатки. Викладені вище рішення по управлінню швидкісними режимами прокатки можуть бути використані при розробці АСУ ТП товстолистових станів.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г. Управление продольной разнотолщиной листов на реверсивных листовых станах горячей прокатки. *Автоматизация виробничих процесів*. 2000. № 2 (11). С. 65–74.
2. Иевлев Н.Г. Управление продольной разнотолщиной листов на толстолистовых станах. *Металл и литье Украины*. 2018. № 1–2. С. 7–10.
3. Грабовський Г.Г., Ієвлев М.Г. Управління механічними властивостями товстолистого прокату. *Математичні машини і системи*. 2021. № 3. С. 106–112.
4. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
5. Архангельский В.И. Системы реверсивных электроприводов. К.: Техніка, 1972. 327 с.
6. Баимов Н.И. Оптимизация процессов прокатки на алюминге. М.: Металлургия, 1974. 216 с.
7. Твардовский В.П. Рациональные скоростные графики прокатки на толстолистовом стане. *Автоматизация прокатных станів*. М.: Металлургия, 1976. С. 62–70.
8. Кузнецов Б.И., Опышко И.А., Богаенко И.Н. и др. Автоматизация управления листовыми прокатными станами. К.: Техніка, 1992. 231 с.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2021