

УДК 621.77.29

Н.В. Жукова, М.М. Михайлова

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра автоматики та телекомунікацій
E-mail: Zhnatka@mail.ru, etruscilla@rambler.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЧОРНОВОЇ ГРУПИ КЛІТЕЙ ДРІБНОСОРТОВОГО СТАНУ ВИРОБНИЦТВА КАТАНКИ

Анотація

Жукова Н.В., Михайлова М.М. Дослідження динамічних процесів системи автоматичного управління чорнкової групи клітей дрібносортового стану виробництва катанки. Розглянуто технологічний процес виробництва катанки, що поєднує радіальне лиття заготівлі з поперечно-гвинтовою прокаткою її в планетарних тривалкових гвинтових клітях, як об'єкт управління. Розроблено структурну схему системи управління електроприводами валків і корпусу планетарних клітей з малим періодичним рухом заготівлі навколо осі прокатки. Виконано аналіз перехідних характеристик розробленої системи.

Ключові слова: *поперечно-гвинтова прокатка, планетарна тривалкова кліть, електропривод валків, електропривод корпусу кліті, математична модель.*

Загальна постановка проблеми. В останні роки спостерігається тенденція розвитку металургійних міні-заводів, на яких реалізуються енергозбережні технології виробництва сталі та прокату. Енергозбереження у металургії полягає в суміщенні процесів безперервного лиття та безперервної прокатки від рідкого металу до кінцевого прокату [1]. У даній технологічній схемі тепло рідкого металу не губиться, а використовується у подальших переділах після безперервного лиття. Тому проектування та впровадження литейно-прокатних модулів у наш час є актуальним. Чим швидше метал доходить від рідкого стану до кінцевого прокату, тим краще економічні показники енергоємного металургійного виробництва. Таким чином, економія енергії стає найважливішим фактором будь-якого металургійного виробництва.

Розгляньмо поєднання двох переділів: безперервного радіального лиття та безперервної прокатки з найменшою кількістю операцій по переділу металу для технологічної схеми виробництва катанки в умовах Макіївського металургійного заводу. Безперервна прокатка найоптимальніша, якщо основний обтиск металу здійснюватиметься у прокатних клітях, де максимальний витяг відбувається за один прохід в одній кліті. Цій умові задовольняє планетарна гвинтова кліть (ПГК), яка заміщує вісім – десять клітей звичайної подовжньої прокатки та дозволяє безперервно стиковувати подальшу чистову обробку металу. Крім того, планетарну кліть можна використовувати у новій якості при суміщенні малих швидкостей безперервного розливу рідкого металу (2-6 м/хв) з безперервною прокаткою. Як показує практика, звичайні кліті подовжньої прокатки у цій якості використовувати неможна [2]. Навпаки, у кліті гвинтової прокатки можна зробити так, щоб інструмент рухався навколо металу швидше, ніж метал рухався подовжньо. Тому використання планетарних клітей гвинтової прокатки у чорновій групі для стиковки з модулем лиття та подальшою прокаткою заготівлі з високим ступенем деформації, а також розробка системи автоматичного управління електроприводами ПГК чорнкової групи, є актуальними.

Постановка задачі дослідження. Розглянемо можливий варіант технологічної схеми виробництва катанки на рис. 1.

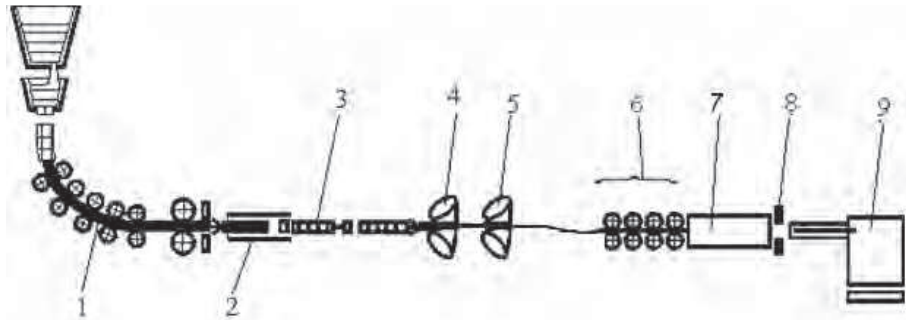


Рисунок 1 - Литейно-прокатний агрегат виробництва катанки:

1 - МБЛЗ; 2 - індукційний підігрівач; 3 - направляючі; 4 – перша планетарна кліть поперечно-гвинтової прокатки; 5 – друга планетарна кліть поперечно-гвинтової прокатки; 6 - чистова група клітей; 7 – виткостворювач; 8 – аварійні летючі ножиці; 9 – готові бунти з дротом

Електропривод ПГК містить два електродвигуни, які пов'язані через систему передач з валковим та корпусним механізмами. Перший двигун, він головний, використовується для обертання валків, цей двигун виконує основну роботу з деформації металу. Корпус кліті з розташованими у ньому валками приводиться у рух навколо осі прокатки додатковим двигуном. Частота обертання корпусу кліті регулюється по відношенню до частоти обертання робочих валків таким чином, щоб уникнути обертання металу.

Прокатка заготівлі без її обертання на виході кліті здійснюється при визначеному початковому співвідношенні частот приводу валків та приводу корпусу кліті. Оскільки неможливо точно спрогнозувати початкове співвідношення частот двох двигунів f/f' , при якому не метал не обертася б навколо осі прокатки, тому, поворот металу навколо осі завжди спостерігатиметься з деякою повзучою швидкістю, яку необхідно компенсувати. Зрозуміло, що кут повороту прокату має бути обмеженим, контролюється за допомогою енкадера з ідентифікацією знаку його повороту. У зв'язку з тим, що технологічні параметри деформації металу неоднорідні, тому раскат повертатиметься з неоднорідною швидкістю. З точки зору технології, неконтрольований рух заготівлі коло осі прокатки є неприпустимим. Кутовий рух металу має бути контрольованим та відповідати апріорі відомій періодичній функції, наприклад, синусоїдальній $\varphi_{3p}(t) = \varphi_0 \sin \omega_p t$ або лінійній у заданих межах. Тобто проблема може бути вирішена за допомогою організації активного регульованого рискання металу навколо осі прокатки. Для цього при початковому співвідношенні частот обертання двигунів корпусу та валків f/f' , швидкість обертання електродвигуна корпусу має періодично змінюватись на величину додаткової швидкості $\omega_{3p}(t) = \frac{d\varphi_{3p}(t)}{dt} = \varphi_0 \omega_p \cos \omega_p t$ з

амплітудою коливання $|\pm \varphi_0 \omega_p| = \left| \pm \varphi_0 \frac{2\pi}{T_p} \right| \geq 2\delta$, де φ_0 - кут рискання прокату, T_p - період

рискання, δ - абсолютна похибка регулювання швидкості керованого електроприводу, складає 3% від номінальної швидкості обертання корпусу. Таким чином, необхідно розробити систему управління електроприводами двох ПГК з метою отримання заданого обтиску металу з великим витягом та забезпечення можливості поєднання процесу гвинтової прокатки з попередніми та подальшими переділами металу подовжньої прокатки за рахунок

компенсації обертання прокату за допомогою організації активного регульованого ризику металу коло вісі прокатки.

Рішення задачі. Для отримання математичної моделі процесу прокатки заготовлі у планетарній гвинтовій клітці, необхідно провести розрахунки та аналіз режиму обтиску металу у двох планетарних клітках ПГП [3].

Отже, з метою економії енергії можна поєднати з безперервним розливом круглої заготовлі діаметром $\oplus 150\text{мм}$ дві планетарні гвинтові клітці з сумарним витягом

$$\mu = \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \left(\frac{150}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{50}{17}\right)^2 = 81. \text{ Ці клітці замінюють обтискову та дві проміжні групи}$$

клітей подовжньої прокатки, які складаються з 17 клітей згаданого дрібносортового стану 150,

де відбувається чорновий обтиск металу з загальним витягом $\mu = \left(\frac{\otimes 150\text{мм}}{\otimes 17\text{мм}}\right)^2 = 78$. після

безперервного розливання гаряча кругла заготовля $\oplus 150\text{ мм}$, проходячи через індукційний нагрів, де вирівнюється її температура, безперервно подається з середньою швидкістю

$$6 \frac{\text{м}}{\text{хв}} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

у першу планетарну клітці ПГП. Подовжня швидкість входу заготовлі у клітці узгоджується зі швидкістю розливу, при цьому швидкість обертання валків $f' = 0,319 \frac{\text{об}}{\text{с}}$

деформує метал з витягом $\mu = \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2 = \left(\frac{75}{25}\right)^2 = 9$. Сила прокатки $F = 1600\text{кН}$, середній

радіус валка $r'_{CP} = 182\text{мм} = 0,182\text{м}$, момент прокатки (навантаження) $M_H = 87,36\text{кН} \cdot \text{м}$,

момент навантаження, прикладений до металу, що деформується, від трьох валків $M_{H,M} = 62,35\text{кН} \cdot \text{м}$;

потужність прокатки на трьох валках при швидкості входу заготовлі у клітці V_0 дорівнює $P_{PP} = 524,5\text{кВт}$,

потужність, прикладена до приводу корпусу для зупинки обертання металу $P_{BP} = 431,9\text{кВт}$, частота обертання ротора $f = 1,1 \frac{\text{об}}{\text{с}}$.

На виході з першої клітці раскат діаметром $\oplus 50\text{мм}$ рухається зі швидкістю $V_1 = V_0 \cdot \mu = 0,1 \cdot 9 = 0,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і входить у другу планетарну клітці ПГП, яка повністю геометрично

подібна до першої у масштабі 1:3 [3]. Частота обертання валків $f' = 8,63 \frac{\text{об}}{\text{с}}$. Метал

деформується з витягом $\mu = \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2 = \left(\frac{25}{8,33}\right)^2 = 9$. Сила прокатки $F = 178\text{кН}$, середній радіус

валка $r'_{CP} = 0,0606\text{м}$, коефіцієнт тертя $f_{TP} = 0,3$, момент прокатки (навантаження)

$M_H = 3,24\text{кН} \cdot \text{м}$, момент навантаження, прикладений до металу, що деформується, від трьох

валків $M_{H,M} = 2,32\text{кН} \cdot \text{м}$; потужність прокатки на трьох валках дорівнює $P_{PP} = 526,87\text{кВт}$,

потужність, прикладена до приводу корпусу для зупинки обертання металу

$$P_{BP} = 433,97\text{кВт}, \text{ частота обертання корпусу } f = 29,76 \frac{\text{об}}{\text{с}}.$$

Математичну модель (1) для двох систем ($i = 1,2$) управління електроприводами планетарної трьохвалкової клітці надано у інтегро-диференційному вигляді.

$$\left\{ \begin{aligned}
 &U_{B_i}(t) = R_1 I_1(t) + L_1 \frac{dI_1(t)}{dt} + C_1 \omega_{B_i}(t) \\
 &J_1 \frac{d\omega_{B_i}(t)}{dt} = C_1 I_1(t) - M_{C1}(t) \\
 &U_{K_i}(t) = R_2 I_2(t) + L_2 \frac{dI_2(t)}{dt} + C_2 \omega_{K_i}(t) \\
 &J_2 \frac{d\omega_{K_i}(t)}{dt} = C_2 I_2(t) - M_{C2}(t) \\
 &U_{B_i}(t) = K_{ТП} \left[K_{П} \cdot \varepsilon_{B_i}(t) + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon_{B_i}(t) dt \right] \\
 &\varepsilon_{B_i}(t) = \alpha_{3B_i}(t) - \omega_{B_i}(t) \cdot K_{OC\omega_B} \\
 &U_{K_i}(t) = K_{ТП} \left[K_{П} \cdot \varepsilon_{K_i}(t) + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon_{K_i}(t) dt \right] \\
 &\varepsilon_{K_i}(t) = \alpha_{3K_i}(t) - \omega_{K_i}(t) \cdot K_{OC\omega_K} = \omega_{B_i}(t) \cdot K_{ТП} \cdot \frac{f}{f'} + \omega_{P_i}(t) \cdot K_{норм} - \omega_{K_i}(t) \cdot K_{OC\omega_K} \\
 &\omega_{P_i}(t) = \frac{d\varphi_{P_i}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[K_{П} \cdot \varepsilon_{P_i}(t) + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon_{P_i}(t) dt \right] \\
 &\varepsilon_{P_i}(t) = \varphi_{3P_i}(t) - \varphi_{M_i}(t) = \varphi_0 \sin \omega_{P_i} t - \int_0^t (\omega_{B_i} - \omega_{K_i}) dt \\
 &i = 1, 2
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

У математичній моделі (1) в електроприводах корпусу та валків кліті використовуються двигуни постійного струму з незалежним збудженням, які регулюються за швидкістю обертання. На практиці зручніше використовувати асинхронні приводи та регульованим має бути лише привід кліті. Це пов'язано з тим, що сучасні частотні перетворювачі з системою векторного управління для асинхронних двигунів за якістю регулювання швидкості обертання доведені до рівня електроприводу постійного струму. Отже, перехідні процеси у двозв'язному асинхронному електроприводі гвинтової планетарної кліті можна вивчати на простому електродвигуні постійного струму.

У системі рівнянь (1) відомими функціями часу $\varepsilon_{B_i}(t)$, $U_{K_i}(t)$ – напруга живлення тиристорного перетворювача (В), $M_{C1}(t)$ и $M_{C2}(t)$ - моменти навантажень, приведені до роторів двигунів ($H \cdot m$); $\varphi_{3P_i}(t)$ - функція завдання кута рискання; відомими параметрами також є: J_1, J_2 – моменти інерції, приведені до роторів двигунів ($kg \cdot m^2$), R_1, R_2 - активні опори якорів двигунів і тиристорних перетворювачів (ТП) (Ωm), L_1, L_2 - індуктивності силових ланцюгів ТП-Д, $C_1, C_2, K_{ТП}, \frac{f}{f'}, K_{OC\omega_K}, K_{OC\omega_B}, K_{норм}$ - постійні машини, коефіцієнти передачі тахогенератора і ТП, співвідношення частот приводів, коефіцієнти зворотнього зв'язку за швидкістю валків та корпусу, коефіцієнт посилювача швидкості рискання, що нормує, $K_{П}, T_u$ - коефіцієнти ПІ-регулятора. Невідомі функції часу: $\omega_{B_i}(t), \omega_{K_i}(t), \omega_{P_i}(t)$ - швидкості обертання двигунів валків, корпусу кліті та рискання металу, $\varphi_{M_i}(t)$ - функція кута повороту металу, $\varphi_{P_i}(t)$ - кут рискання металу, активно регульований за ПІ-законом з

похибкою розузгодження між впливом завдання для кута рискання прокату

$$\varphi_{3p_i}(t) = \varphi_0 \sin \omega_{p_i} t \text{ та отриманим кутом повороту металу } \varphi_{M_i}(t) = \int_0^t (\omega_{B_i} - \omega_{K_i}) dt.$$

Використовуючи (1), побудуємо узагальнену структурну схему управління електроприводами ПГК (рис.2), що складається з трьох елементів: САУ електроприводом швидкості валків, САУ рухом заготівки відносно осі прокатки, САУ швидкості рухомого корпусу кліті. Ця структура підходить як для першої, так і для другої кліті. Кліті пов'язані між собою через швидкості входу заготівлі у кожену кліть, як було розраховано вище.

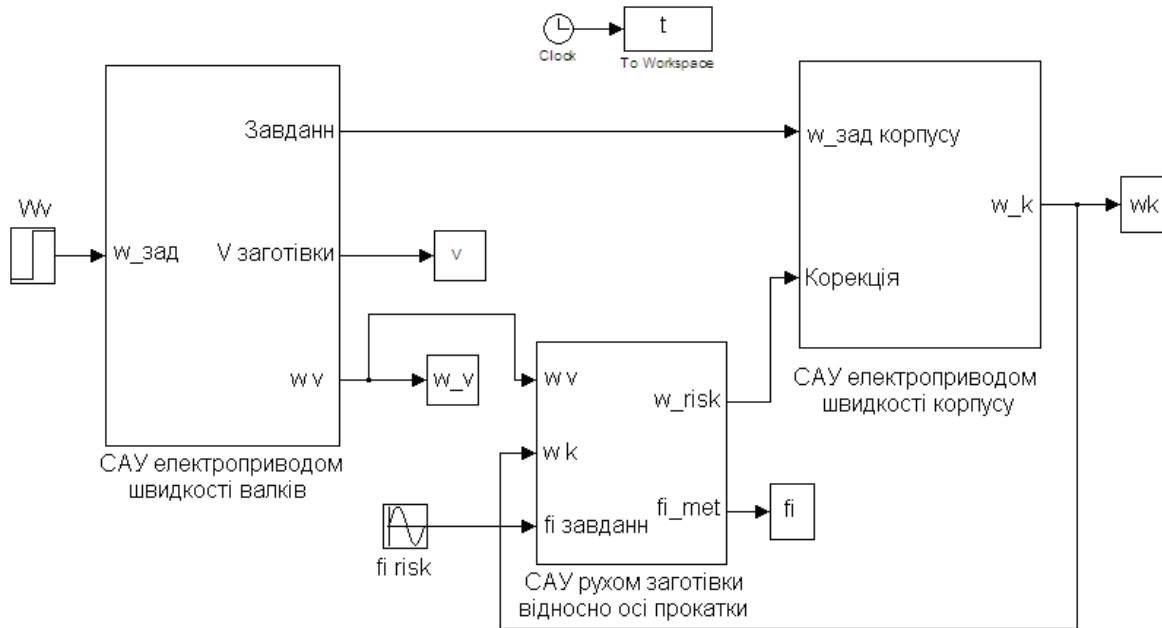


Рисунок 2 – Узагальнена структурна схема САУ процесом ПГП у планетарних клітях

Моделювання структурної схеми (рис.2) проводилось для номінальних параметрів за допомогою пакету прикладних програм MatLab-Simulink 6.5. Отримані у результаті моделювання перехідні процеси наочно характеризують роботу системи. Вплив завдання кута рискання металу $\varphi_{3p}(t)$ змінюється синусоїдально з амплітудою $\varphi_0 = 0.393 \text{ рад} = 23^\circ$ (рис.3) і з кутовою швидкістю $\omega_{3p}(t)$ (рис.4):

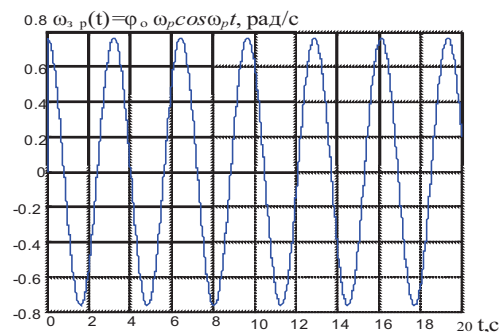
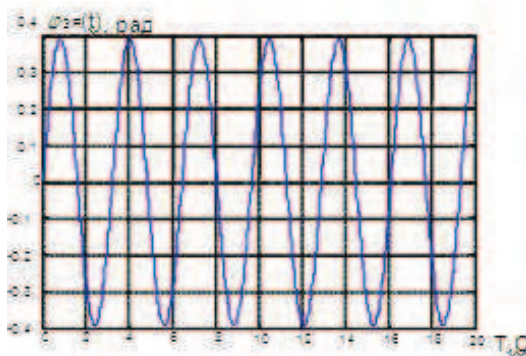


Рисунок 3 - Кут завдання рискання металу $\varphi_{3p}(t)$ Рисунок 4 – Швидкість завдання рискання металу $\omega_{3p}(t)$

З рис.5 видно, що після перехідного процесу тривалістю 1с, амплітуда зміни різниці швидкостей валків та корпусу кліті $\Delta\omega(t) = \omega_B(t) - \omega_K(t)$, яка дорівнює $\pm 0,766 \text{ рад/с}$,

відповідає амплітуді швидкості завдання рискання металу $\omega_{3P}(t)$ (рис.4). З аналізу перехідної характеристики кута повороту металу $\varphi_M(t)$ коло осі прокатки (рис.6) слідує, що рух заготівлі на виході з планетарної гвинтової кліти супроводжується малим періодичним кутовим її переміщенням навколо осі прокатки. Кут повороту заготівлі дорівнює $\pm 23^\circ \approx 0,393$ рад, що відповідає заданому куту рискання металу $\varphi_{3P}(t)$ (рис.3).

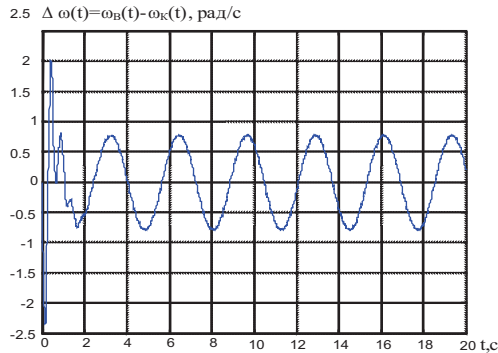


Рисунок 5 – Різниця швидкостей валків та корпусу кліти

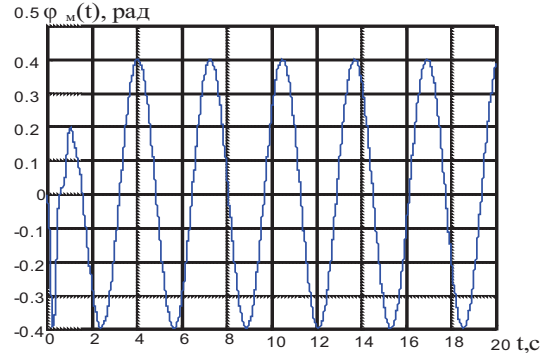


Рисунок 6 - Кут повороту металу коло осі прокатки

Амплітуда швидкості активного рискання металу $\omega_P(t)$ (рис.7), яка дорівнює $\pm 0,766$ рад/с, відповідає амплітуді швидкості завдання рискання металу $\omega_{3P}(t)$ (рис.4) та амплітуді швидкості обертання електропривода корпусу кліти $\omega_K(t)$ (рис.8).

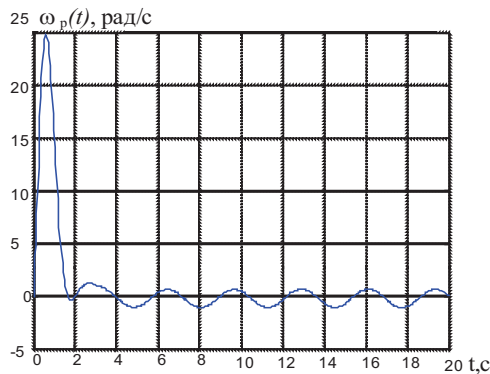


Рисунок 7 - Швидкість активного рискання металу

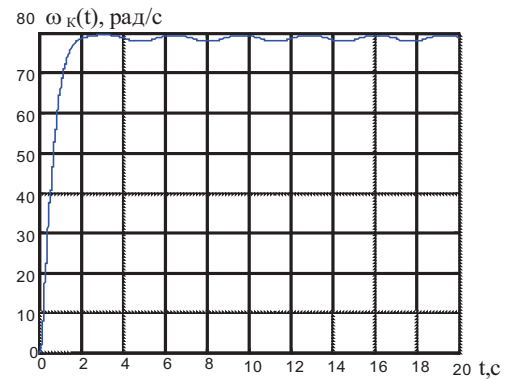


Рисунок 8 – Швидкість обертання привода корпусу кліти

З графіка перехідної характеристики електромагнітного моменту привода корпусу $M_{EMK}(t)$, отриманої без його обмеження (рис.9), слідує, що моменту 2 кН·м вистачить для подолання моменту інерції всієї кліти, який дорівнює $63 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Тоді активне рискання металу реалізується через рискання швидкості привода корпусу кліти відносно його номінального значення, яке дорівнює $\omega_{НОМ К} = 78,5$ рад/с, з амплітудою $\pm 0,766$ рад/с. Тому для прискореного обертання корпусу кліти з заданим рисканням необхідна потужність, яка складає:

$$P_K = J_K \cdot \left(\varphi_0 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_P} \right)^2 \right) \cdot \omega_K = 63 \cdot 0,393 \cdot 6^2 \cdot 78,5 = 70 \text{ кВт}.$$

У реальних умовах виробництва потребується додаткова потужність на подолання тертя у механізмах кліти та сили інерції заготівлі при її прискореному русі. Отже, потужність привода корпусу кліти, яку ми отримали розрахунковим шляхом, на практиці подвоюється.

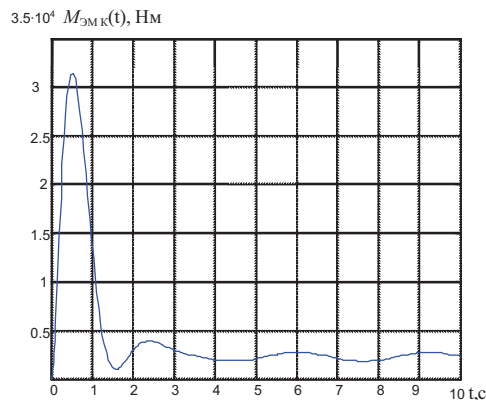


Рисунок 9 - Електромагнітний момент привода корпусу кліті

Перехідні характеристики швидкості обертання привода валків $\omega_B(t)$ та швидкості заготівлі на виході з ПГК $V(t)$ наведені на рис. 10, 11. З рис.11 видно, що на лінійну швидкість руху заготівлі на виході з кліті накладається активне ризання металу з відповідною амплітудою завдання швидкості ризання металу $\omega_{3P}(t)$ (рис.4) та амплітуді швидкості обертання електроприводу корпусу кліті $\omega_K(t)$ (рис.8).

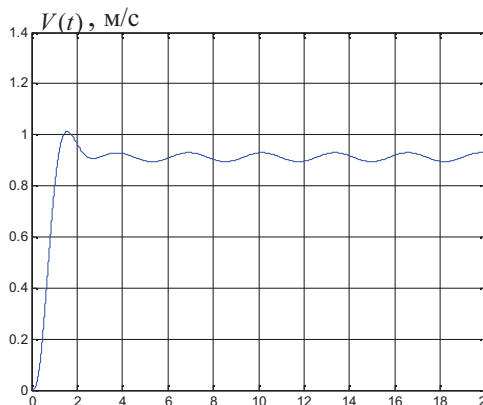
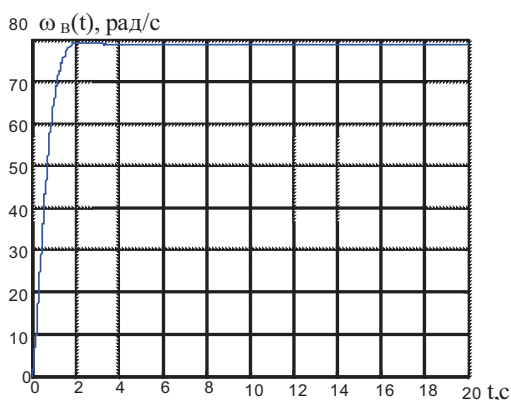


Рисунок 10 - Швидкість привода валків кліті

Рисунок 11 - Електромагнітний момент привода валків кліті

Виводи

1. Сучасні тенденції розвитку енергозбережних металургійних технологій для міні-заводів литейно-прокатного виробництва, потребують використання нових енергоємних, високопродуктивних методів, які поєднують безперервне лиття з оптимальною безперервною прокаткою, у якій обтиск металу здійснюється з максимальним його витягом за один прохід в однієї кліті.

2. В умовах Макіївського металургійного заводу виробництва катанки чорнова група з 17 клітей подовжньої прокатки може бути замінена двома планетарними клітьями поперечно-гвинтової прокатки з загальним витягом 78 од. Це дозволить стикувати подальшу чистову обробку, поєднати малі швидкості безперервного розливу рідкого металу з безперервною прокаткою, а також забезпечить економію енерговитрат чорнової групи клітей у п'ять разів.

3. Розглянуто основні технічні характеристики процесу обтиску заготовки у двох клітях. Процес поперечно-гвинтової прокатки у кліті планетарного виконання реалізується через двозв'язну електромеханічну систему управління електроприводами валків та корпусу кліті.

4. При розробці системи управління електроприводами валків та корпусу планетарної гвинтової кліті вирішено проблему виникнення повзучої швидкості кута повороту металу навколо осі прокатки через неоднорідності технологічних параметрів деформації металу та, як наслідок, неможливості точного розрахунку початкового співвідношення частот двигунів валків та корпусу кліті, при якому не було б неконтрольованого обертання металу. Вказану проблему вирішено за допомогою організації активного регульованого ризику металу навколо осі прокатки.

5. Розроблено структурну схему системи управління електроприводами валків та корпусу планетарної гвинтової кліті. Методами математичного моделювання отримано перехідні характеристики по основних каналах регулювання, які підтверджують роботоздатність системи управління. Розроблена система управління електроприводами планетарної гвинтової кліті дозволяє стабілізувати технологічний процес обтиску металу з великим витягом та малим періодичним рухом його навколо осі прокатки.

Література

1. Жукова Н.В. Планетарный косовалковый стан, как объект автоматизации / Н.В. Жукова, В.И. Литвинов, В.М. Шепель / Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. - 2007. - Вип. 3 (121). - С. 6 - 13.
2. Сапожников А.Я. Мини-комплекс для производства мелкого сорта на основе совмещения винтовой и продольной прокатки / А.Я. Сапожников, А.М. Кривенцов, С.П. Милютин // Труды третьего конгресса прокатчиков. - М.: АО "Черметинформация", 2000. - С. 314-315.
3. Кліть тривалкова гвинтова консольна планетарна: патент на винахід № 88522, В21В 13/12, В21В 19/00 / Литвинов В.И., Жукова Н.В., Литвинов Т.С., Шепель В.М. - дата публікація в відомостях про видачу патенту 26.10.2009, Бюл. №20.

Надійшла до редакції:
07.02.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

Abstract

Zhukova N.V., Mikhailova M.N. Research of dynamic of automatic control system of pony roughing for iron rod production. Technological process of iron rod production, which combines radial casting of blank and its cross rolling in planetary three-high stands, as plant of automation is considered. Control system structural diagram of electric drives of planetary stands rolls and frame with blank small spinning motion is developed. The analysis of transient response of the developed system is executed.

Keywords: *cross rolling, planetary three-high stand, electric drive of rolls, electric drive of stand frame, mathematic model.*

Аннотация

Жукова Н.В., Михайлова М.Н. Исследование динамики системы автоматического управления черновой группой клетей мелкосортного стана производства катанки. Рассмотрен технологический процесс производства катанки, совмещающий радиальное литье заготовки с поперечно-винтовой прокаткой ее в планетарных трехвалковых винтовых клетях, как объект управления. Разработана структурная схема системы управления электроприводами валков и корпуса планетарных клетей с малым периодическим перемещением заготовки вокруг оси прокатки. Выполнен анализ переходных характеристик разработанной системы.

Ключевые слова: *поперечно-винтовая прокатка, планетарная трехвалковая клеть, электропривод валков, электропривод корпуса клетки, математическая модель.*

© Жукова Н.В., Михайлова М.М., 2011