

# ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА БЕЗКОНТАКТНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПЛАНШЕТНІСТЮ ШТАБИ ПРОКАТУ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ПАСИВНОСТІ

Забезпечення вимог планшетності штаби прокату є найбільш актуальною проблемою листопрокатного виробництва, обумовленою підвищеннем вимог до якості прокату.

Основним критерієм для оцінки планшетності штаби готового прокату є максимальне відхилення поверхні штаби від ідеальної площини на заданому відрізку довжини. Відповідно до стандартів, штаба за планшетністю поділяється на особливо високу, високу, покращену та нормальну, а відхилення від площинності в залежності від товщини й ширини штаби, виду прокатки й металу не повинно перевищувати значень від 4 до 55 мм. Дефекти планшетності виникають залежно від особливостей пластичної деформації металу у валках кліті під дією збурень, які зумовлюють різницю витяжок з валків по ширині штаби, величина яких на рівні 0,01% вже призводить до появи суттєвих дефектів планшетності у вигляді хвилястості та жолобкуватості штаби. Гарантовану планшетність штаби під час прокатки можливо отримати тільки при застосуванні відповідної системи автоматичного керування.

Метою роботи є розробка енергозберігаючої електромеханічної системи автоматичного керування планшетності на основі безконтактної електромагнітної дії на штабу, яка забезпечує високу якість керування та стійку роботу при широкій зміні параметрів прокату без перелаштування регуляторів.

Запропонована електромеханічна система автоматичного керування (ЕМСАК) планшетністю розроблена на основі оригінального способу [1]. Для його реалізації використовуються безконтактні виконавчі пристрої (БКП), вторинним елементом яких є безпосередньо штаба. Індуктори БКП розташовуються під штабою вздовж осі прокатки. Величина та напрямок зусиль, що створюються у штабі безконтактною електромагнітною дією, визначається частотою струмів в обмотках індукторів. Для ліквідації типових порушень планшетності достатньо мати три БКП, встановлених по

центрю та під кромками штаби. При необхідності глибокого керування планшетністю кількість БКП збільшується.

Функціональна схема системи автоматичного керування планшетністю [2], що реалізує цей спосіб, представлена на рис. 1. На виході з кліті паралельно осі прокатки встановлюються три БКП1-БКП3. Кожен БКП живиться від індивідуального силового перетворювача частоти ПЧ1-ПЧ3. До блоку керування БК надходить сигнал від датчика розподілу питомого натягу ДРН в середній частині і на кромках штаби та сигнал швидкості штаби від датчика швидкості ДШ. При виникненні збурень епюра натягу по ширині штаби найчастіше має параболічну форму (крива 1). З датчика ДРН надходять сигнали  $U_{N1}$ ,  $U_{N2}$ ,  $U_{N3}$ , які пропорційні відповідним натягам на лівій кромці, у середній частині штаби і на правій кромці. У БК розраховується середньоарифметичне значення натягу:

$$U_{cp} = (U_{N1} + U_{N2} + U_{N3}) / 3. \quad (1)$$

Регулювання натягу по ширині штаби для підтримки високої якості планшетності здійснюється саме на рівні цього середнього натягу (пунктирна лінія 2). Цим забезпечується незмінність загального натягу штаби  $F_{sh}$ , створюваного моталкою, відсутність впливу на роботу інших систем регулювання параметрів штаби, зокрема, товщини, ширини, натягу та значний енергозберігаючий ефект способу керування.

У БК формуються також сигнали, пропорційні відхиленням питомих натягів від середнього значення:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{N1} - U_{cp}; \\ U_2 &= U_{N2} - U_{cp}; \\ U_3 &= U_{N3} - U_{cp}. \end{aligned} \quad (2)$$

У залежності від характеру розподілу питомого натягу штаби сигнали  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  можуть відрізнятися за величиною, знаком та інтенсивністю зміни. Нехай для розглянутого випадку  $U_1 > 0$ ,  $U_2 < 0$ ,  $U_3 > 0$ . Отримані сигнали

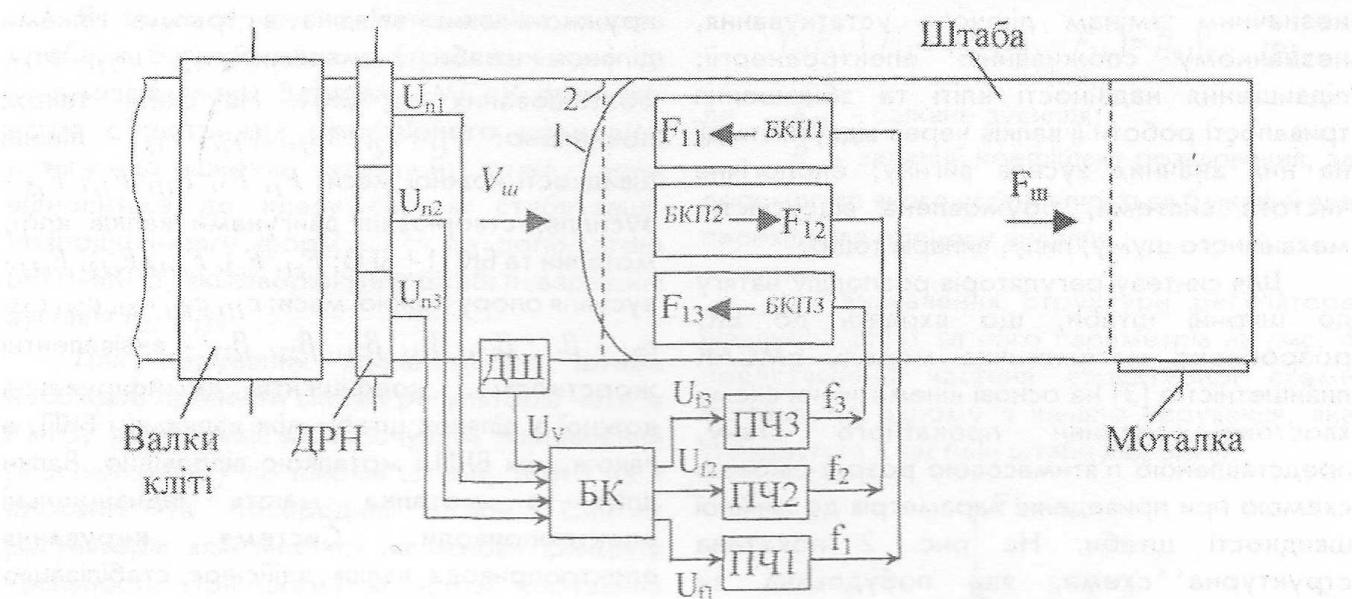


Рис. 1. Функціональна схема ЕМСАК планшетністю

алгебраїчно додаються до сигналу швидкості штаби  $U_V$ , формуючи завдання для відповідних перетворювачів частоти:

$$\begin{aligned} U_{f1} &= U_V + U_1; \\ U_{f2} &= U_V + U_2; \\ U_{f3} &= U_V + U_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Завдяки цьому до відповідного БКП будуть підводитися напруги живлення із частотами  $f_1, f_2, f_3$ :

$$\begin{aligned} f_1 &= K_n \cdot U_{f1}; \\ f_2 &= K_n \cdot U_{f2}; \\ f_3 &= K_n \cdot U_{f3}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $K_n$  - коефіцієнт передачі перетворювача частоти.

При цьому магнітні поля БКП1-БКП3 рухаються із швидкостями:

$$\begin{aligned} V_{01} &= 2\tau f_1; \\ V_{02} &= 2\tau f_2; \\ V_{03} &= 2\tau f_3, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\tau$  - полюсний розподіл БКП.

Для розглянутого випадку  $V_{01} < V_{uu}$ ,  $V_{02} > V_{uu}$ ,  $V_{03} < V_{uu}$ , тому БКП2 створює спрямоване за рухом штаби рушійне зусилля  $F_{12}$ , збільшуючи натяг у середній частині штаби, а БКП1 і БКП3 - подовжні гальмівні зусилля  $F_{11}$ ,  $F_{13}$  (працюючи в генераторному режимі), зменшуючи натяги на кромках штаби до середньоарифметичного значення. При відсутності нерівномірності натягу магнітні поля всіх БКП рухаються зі швидкістю штаби

$V_{01}=V_{02}=V_{03}=V_{uu}$ , забезпечуючи режим ідеального холостого ходу.

У запропонованому способі керування планшетністю регулювання розподілу натягу по ширині штаби здійснюється на рівні середньоарифметичного значення, тому механічні потужності, що витрачаються на збільшення питомих натягів (у розглянутому випадку це потужність БКП2  $P_{12}=F_{12} \cdot V_{uu}$ ) дорівнюють механічним потужностям, що витрачаються на зменшення питомих натягів (у розглянутому випадку це потужності БКП1 і БКП3 відповідно  $P_{11}=F_{11} \cdot V_{uu}$  і  $P_{13}=F_{13} \cdot V_{uu}$ ), тобто:

$$P_{11} + P_{12} + P_{13} = 0. \quad (6)$$

Таким чином, ЕМСАК планшетністю споживає з мережі активну електричну потужність, рівну тільки втратам перетворення енергії:

$$P_{\Sigma} = P_{12} / \eta - (P_{11} + P_{13}) \eta, \quad (7)$$

де  $\eta$  - сумарний ККД БКП та ПЧ.

Цим обумовлюється суттєвий енергозберігаючий ефект запропонованої системи.

Варто підкреслити також такі основні переваги безконтактної електромеханічної системи автоматичного керування планшетністю на основі БКП: висока якість керування, яка забезпечується великою швидкодією електромагнітного впливу на штабу; висока надійність, обумовлена простотою конструкції виконавчих пристрій на основі індукторів лінійних асинхронних двигунів, відсутністю механічного контакту між штабою та елементами системи керування; можливість впровадження на діючих прокатних станах завдяки компактності виконавчих елементів,

незначним змінам діючого устаткування, незначному споживанню електроенергії; підвищення надійності кліті та збільшення тривалості роботи її валків через відсутність дії на них значних зусиль вигину; екологічна чистота системи, обумовлена відсутністю механічного шуму, пилу, випарів тощо.

Для синтезу регуляторів розподілу натягу по ширині штаби, що входять до БК, розроблена математична модель ЕМСАК планшетністю [3] на основі кінематичної схеми хвостової частини прокатного стану, представлена п'ятимасовою розрахунковою схемою при приведенні параметрів до лінійної швидкості штаби. На рис. 2 показана структурна схема, яка побудована за допомогою рівняння Лагранжа II-го. Маси валків  $m_1$  і моталки  $m_2$  з'єднані за допомогою

пружно-в'язких зв'язків з трьома гілками ділянок штаби з масами  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{13}$ , розташованих під БКП. На схемі також позначено:  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{13}$  - лінійні швидкості кожної маси;  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{12}$ ,  $F_{13}$  - зусилля, створювані двигунами валків кліті, моталки та БКП1-БКП3;  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ ,  $F_{c11}$ ,  $F_{c12}$ ,  $F_{c13}$  - зусилля опору кожної маси;  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{13}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{22}$ ,  $c_{23}$  і  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$ ,  $\beta_{21}$ ,  $\beta_{22}$ ,  $\beta_{23}$  - еквівалентні жорсткості і коефіцієнти демпфірування кожної з ділянок штаби між валками і БКП, а також між БКП і моталкою відповідно. Валки кліті та моталка мають індивідуальні електроприводи. Система керування електропривода валків здійснює стабілізацію швидкості валків  $V$ , а електропривод моталки підтримує заданий натяг штаби  $F_2$ .

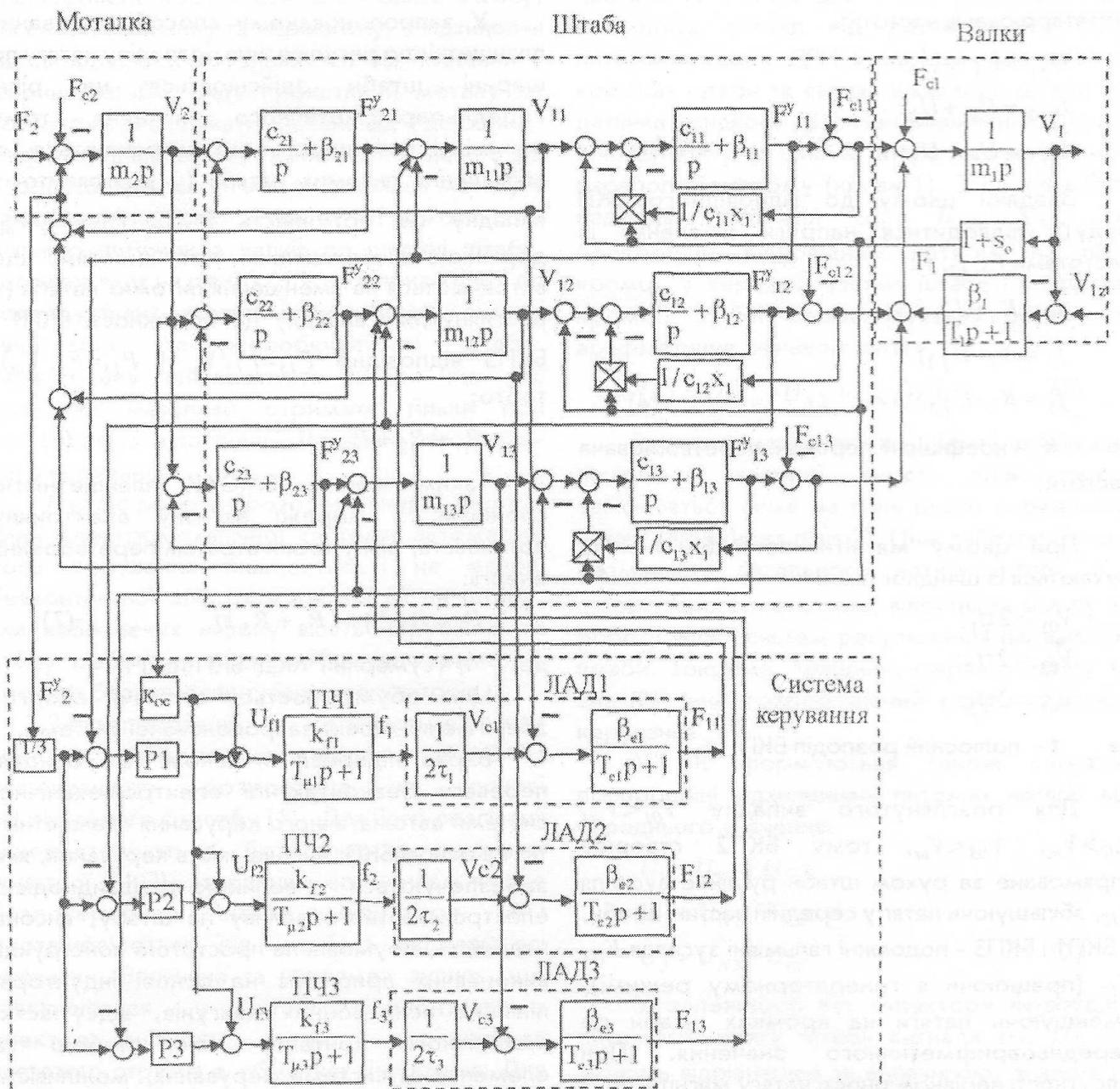


Рис. 2. Структурна схема електромеханічної системи керування планшетністю

Як видно з рисунка, математична модель штаби є багатовимірною (триканальною) та взаємозв'язаною. Задачею ЕМСАК планшетністю є підтримка рівномірного розподілу натягу по ширині штаби й, отже, вона відноситься до класу систем стабілізації. Розподіл натягу формується за допомогою БКП1-БКП3, які створюють у штабі повздовжні зусилля  $F_{II}$ - $F_{I3}$ .

Для керування планшетністю штаби необхідно провести синтез регуляторів натягів Р1-Р3, які повинні забезпечувати рівномірний розподіл натягу по ширині штаби, тобто на її кромках та посередині штаби. Синтез регуляторів здійснюється на основі принципу пасивності. При цьому алгоритм керування розроблюється за класичною математичною моделлю об'єкта у формі рівняння Лагранжа.

При цьому закон керування записується безпосередньо за рівнянням руху та рівнянням заданих траєкторій, що визначають динамічні властивості системи. Вирішення рівнянь Ріккаті чи рівнянь в частинних похідних відпадає, що неодмінно здійснюється в класичній теорії конструювання оптимальних регуляторів. Синтезований закон керування забезпечує асимптотичну стійкість збуреного руху системи та надає системі якісно нових властивостей - слабку чутливість до зміни параметрів об'єкта керування (зміна товщини, ширини штаби та фізико-механічних властивостей металу штаби).

Для визначення структури регуляторів та їх параметрів на рис. 3 представлена частина структурної схеми системи по одному з каналів керування, яка складається з перетворювача частоти ПЧ1 та БКП1.

Добуток зусилля БКП1  $F_{II}$  на синхронну швидкість  $V_{cl}$  дає одиницю вимірювання потужності. При цьому швидкість  $V_{II}$  розглядається як зовнішнє збурення. Відповідне диференційне рівняння, що описує цю ланку, має вигляд:

$$T_{el}\dot{F}_{II} + F_{II} = \beta_{el}V_{cl}. \quad (8)$$

Заданий закон керування зусилля формується наступним чином [4]:

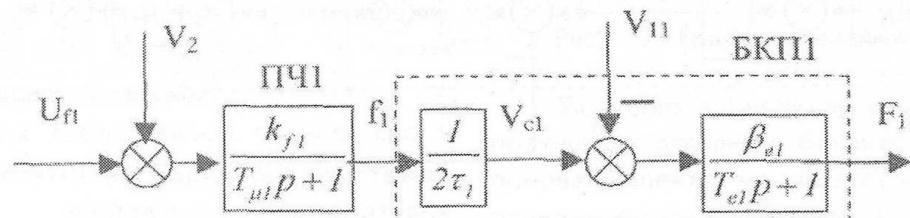


Рис. 3. Розрахункова схема каналу керування зусилля БКП1

$$T_{el}\dot{F}_{II}^* + F_{II}^* + R_{x1}(F_{II}^* - F_{II}) = \beta_{el}V_{cl}. \quad (9)$$

де  $F_{II}^*$  - бажане зусилля;

$R_{x1}$  - заданий коефіцієнт розсіювання, за допомогою якого встановлюється бажаний вид перехідного процесу зусилля.

Для визначення структури регулятора швидкості БКП1 та його параметрів на рис. 4 представлена частина структурної схеми системи по одному з каналів керування, яка складається з частини штаби над БКП1.

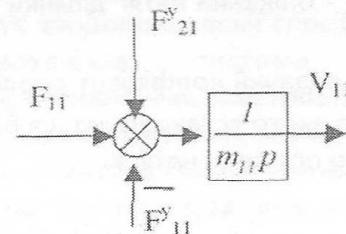


Рис.4. Розрахункова схема каналу керування швидкості БКП1

Добуток зусилля БКП1  $F_{II}$  на швидкість  $V_{II}$  дає одиницю вимірювання потужності. При цьому пружні зусилля  $F_y_{II}$ ,  $F_y_{21}$  розглядаються як зовнішнє збурення. Диференційне рівняння, що описує цю ланку, має вид:

$$\dot{F}_{II}^y = c_{11}V_{II} + \beta_{11}\dot{V}_{II}. \quad (10)$$

Заданий закон керування швидкості формується у такому вигляді:

$$m_{11}\dot{V}_{II}^* + V_{II}^* + R_{y1}(V_{II}^* - V_{II}) = F_{II}^*, \quad (11)$$

де  $V_{II}^*$  - бажана швидкість;

$R_{y1}$  - заданий коефіцієнт розсіювання, за допомогою якого встановлюється бажаний вид перехідного процесу швидкості.

Для визначення структури регуляторів пружних зусиль у штабі та їх параметрів на рис.5 показана частина структурної схеми системи, що представляє пружно-в'язке зусилля між валками та БКП1 по одному з каналів керування.

Добуток швидкості БКП1  $V_{II}$  на зусилля  $F_{II}$  дає одиницю вимірювання потужності. При

цьому швидкості  $V'_1$ ,  $\Delta V'_1$  розглядаються як зовнішнє збурення. Диференційне рівняння, що описує цю ланку, має вигляд:

$$\dot{F}_{11}^y = c_{11}V_{11} + \beta_{11}\dot{V}_{11}. \quad (12)$$

Заданий закон керування пружного зусилля (натягу ділянки штаби), при нехтуванні незначним природним демпфіруванням металу штаби  $\beta_{11}=0$ , формується наступним чином [4]:

$$\dot{F}_{11}^{*y} + F_{11}^{*y} + R_{z1}(F_{11}^{*y} - F_{11}^y) = c_{11}V_{11}^*, \quad (13)$$

де  $F_{11}^{*y}$  - бажаний натяг ділянки штаби по її ширині;

$R_{z1}$  - заданий коефіцієнт розсіювання, за допомогою якого встановлюється бажаний вид переходного процесу натягу.

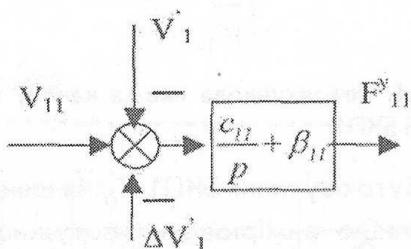


Рис. 5. Розрахункова схема каналу керування натягу БКП1

На основі рівнянь (9), (11), (13) будується структурна схема регулятора натягу штаби Р1 по каналу двигуна БКП1 (рис. 6). Як видно з рисунка, регулятор Р1 має каскадну структуру з трьох контурів керування - зусилля Р31, швидкості РШ1 БКП1 та пружного зусилля ділянки штаби РП31. Analogічно синтезуються структурні схеми регуляторів Р2 та Р3 по каналу керування БКП2 та БКП3.

Система керування електромеханічної системи формує рівномірний розподіл натягу по ширині штаби, тому задані натяги регуляторів Р1-Р3 рівні між собою і дорівнюють третині загального натягу штаби, що

створюється моталкою:

$$F_{11}^{*y} = F_{12}^{*y} = F_{13}^{*y} = F_2 / 3. \quad (14)$$

Дослідження розробленої електромеханічної системи автоматичного керування планшетністю штаби проведено шляхом моделювання на прикладі стану гарячої прокатки алюмінію 2000, продукцією якого є штаба з алюмінієм та його сплавів. Ширина штаби 1,0-1,8 м. Товщина штаби 2-6 мм. Максимальна швидкість штаби 10 м/с. Коливання питомого натягу по ширині штаби 4 Н/мм<sup>2</sup>.

Визначення величини планшетності під час моделювання здійснюється на основі зв'язку між витяжками волокон по ширині штаби та амплітудою хвилі штаби [5]:

$$L_{12}^2 = (L_{11} + L_{13})^2 / 4 + 16A^2 / 3, \quad (15)$$

де  $L_{11} = \dot{V}_{11}$ ,  $L_{12} = \dot{V}_{12}$ ,  $L_{13} = \dot{V}_{13}$  - довжина волокна штаби при виході з валків на лівій кромці, посередині та на правій кромці;  $A$  - амплітуда хвилі штаби.

На рис. 7 представлена графік переходного процесу зусилля БКП1 при дії збурення на розподіл натягу по ширині штаби у вигляді правильної параболи. Натяги на кромках штаби зменшилися на 2000 Н, а в центрі штаби натяг збільшився на 4000 Н. Величина збурень еквівалентна розглянутій зміні витяжок по ширині штаби величиною  $\Delta\varepsilon=0,01\%$ . Збурення подається на систему через 6 секунд після запуску електропривода валків і моталки та створення усталеного натягу штаби в 36000 Н, який рівномірно розподілився на її кромках та посередині величиною в 12000 Н. Задана лінійна швидкість валків становить 10 м/с. Як видно з рисунка, переходний процес має монотонний характер, який налаштовується величиною коефіцієнта розсіювання  $R_{x1}$  ( $R_{x2}$ ),

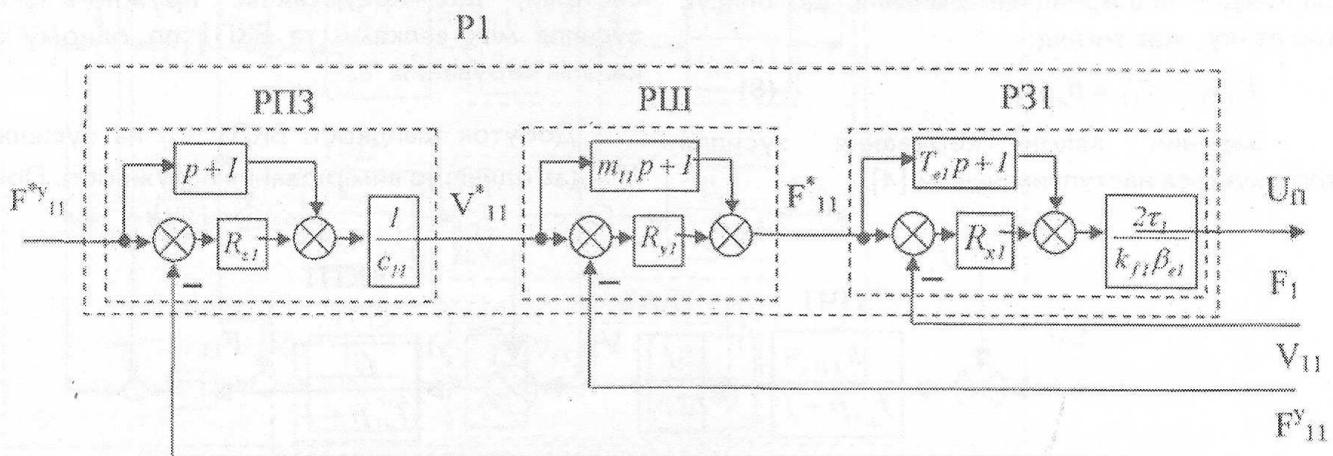


Рис. 6. Структурна схема регулятора натягу Р1 по каналу двигуна БКП1

$R_{x3}$  для регуляторів зусиль Р32-Р33). Перехідний процес зусилля завершується за час 0,26 с.

На рис. 8 представлено графік перехідного процесу пружного зусилля на лівій кромці штаби.

F11, Н

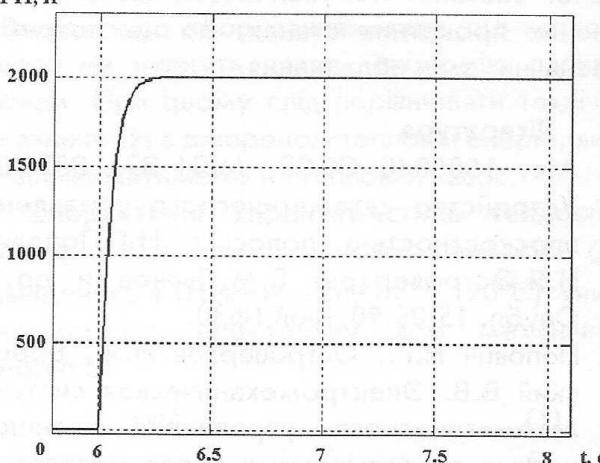


Рис. 7. Графік перехідного процесу зусилля БКП1

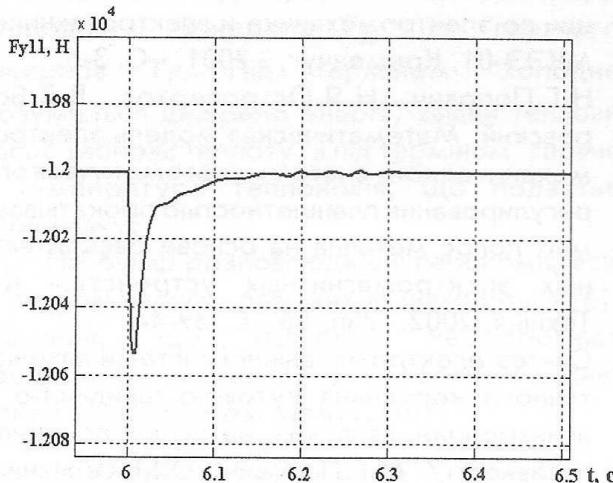


Рис. 8. Графік перехідного процесу натягу на лівій кромці штаби

Після початку дії збурення за час 0,32 с натяг по ширині штаби повертається до попереднього рівномірного розподілу на рівні 12000 Н. Як видно з рисунка, перехідний процес натягу має незначні коливання. Такий вид перехідних процесів та їх тривалість налаштовується величиною коефіцієнтів розсіювання  $R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}$  регуляторів натягів Р1-Р3.

Товщина штаби може змінюватися від 2 до 6 мм, тобто втричі. У таких межах змінюються коефіцієнти жорсткості механічних характеристик БКП  $\beta_{e1}=\beta_{e2}=\beta_{e3}$ , а також жорсткості ділянок штаби  $c_{21}=c_{22}=c_{23}$  та  $c_{11}=c_{12}=c_{13}$ . Для забезпечення заданої якості керування системи в традиційних системах здійснюється відповідне оперативне перелаштування параметрів регуляторів до

початку процесу прокатки штаби. Розроблена система керування планшетністю завдяки принципу пасивності забезпечує задовільну якість керування і стійку роботу без будь-якого перелаштування регуляторів. На рис. 9 представлено графіки хвиль під час дії збурення для штаб товщиною 2, 4 та 6 мм. Як видно з рисунка, максимальна амплітуда хвиль знаходитьться в допустимих межах 8,6...10,2 мм, що майже втричі менше найжорсткіших вимог до планшетності штаби з алюмінію.

Завдяки енергозберігаючій технології, яку забезпечує запропонований спосіб керування, електромеханічна система керування планшетністю споживає електроенергії менше, ніж потрібно на виконання механічної роботи. На рис. 10 показано графік механічної потужності (крива 1), яка необхідна для керування планшетністю.

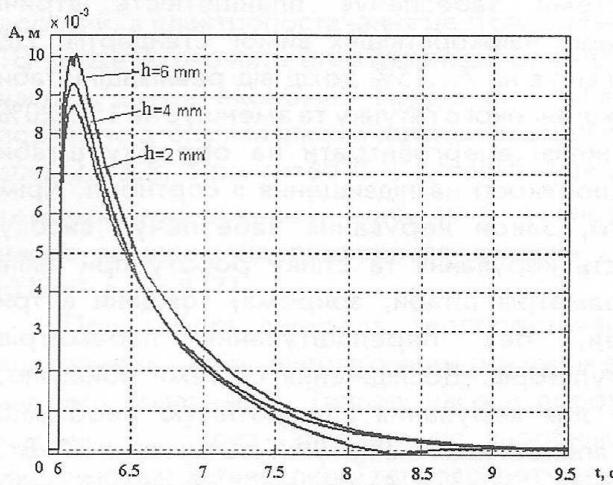


Рис. 9. Графіки перехідних процесів хвилі за різної товщини штаби

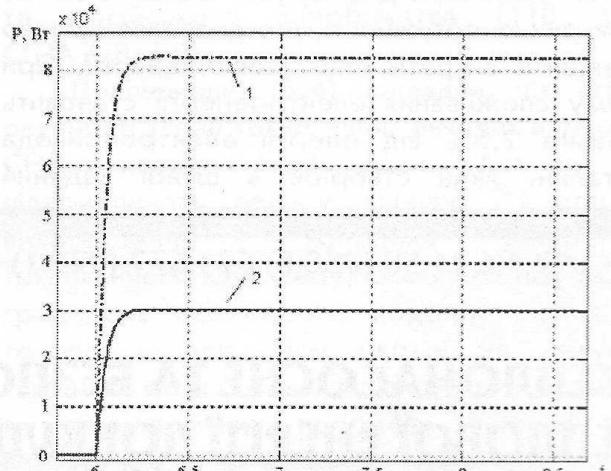


Рис. 10. Графіки механічної та електричної потужностей

Як видно з рисунка, усталена механічна потужність дорівнює близько 83 кВт. Запропонована електромеханічна система керування планшетності споживає з мережі тільки електроенергію, необхідну для покриття втрат

перетворення, що становить всього 30 кВт (крива 2) при сумарному ККД перетворювача частоти ПЧ та БКП, рівному 70%. Таким чином, зберігається близько 53 кВт.

### Висновки

Запропонована енергозберігаюча електромеханічна система автоматичного керування планшетністю на основі оригінального способу регулювання розподілу натягу штаби по її ширині за допомогою безконтактних виконуючих пристрій забезпечує підвищенну якість штаби за критерієм планшетності, незначне споживання електро-енергії, збільшення тривалості роботи валків, підвищення надійності кліті та прокатного стану в цілому. Проведені на прикладі стану 2000 гарячої прокатки алюмінію дослідження синтезованого на основі принципу пасивності закону керування планшетністю показали, що система забезпечує планшетність втрічі меншу найжорсткіших вимог стандартів. Це збільшує на 7...15% дохід від реалізації штаби більш високого ґатунку та зменшує на 15...20% можливі енерговитрати на обробку штаби гіршої якості на підвищення її сортності. Крім того, закон керування забезпечує високу якість керування та стійку роботу при зміні параметрів штаби, зокрема, товщини в три рази, без перелаштування параметрів регуляторів. Дослідження системи показало, що для керування планшетністю необхідна усталена механічна потужність близько 83 кВт. Завдяки енергозберігаючій технології, яку забезпечує запропонований спосіб керування, системі необхідно для керування всього 30 кВт електричної потужності, що дозволяє суттєво зменшити витрати електричної енергії. При цьому споживання електроенергії становить близько 2,5% від енергії електропривода моталки, який створює в штабі заданий

технологічний натяг. Високі енергетичні показники електромеханічної системи автоматичного керування планшетністю, а також незначні габарити безконтактних виконавчих органів (довжиною близько одного метра), дозволяють рекомендувати впровадження даної системи керування планшетністю на діючих прокатних станах, бо це потребує незначних змін обладнання.

### Література

1. А.с. 1585040 СССР, МКИ В21 В37/00. Устройство автоматического управления плоскостью полосы/ Н.Г.Попович, Н.Я.Островерхов, В.М.Пыжов и др. - Опубл. 15.08.90, Бюл.№30.
2. Попович Н.Г., Островерхов Н.Я., Боровский В.В. Электромеханическая система автоматического управления планшетностью прокатываемых полос металла на основе бесконтактных электромагнитных устройств: Сб. международной конференции по электромеханике и электротехнике, МКЭЭ-01, Кременчуг, - 2001. - С. 3-6.
3. Н.Г.Попович, Н.Я.Островерхов, В.В.Боровский. Математическая модель электромеханической системы автоматического регулирования планшетностью прокатываемых полос металла на основе бесконтактных электромагнитных устройств.- К.: Техніка, 2002.- Вип. 58.- С. 39-44.
4. Синтез електромеханічної системи автоматичного керування кутовою швидкістю з асинхронним двигуном на основі принципу пасивності/ М.Г.Попович, О.І.Кіселичник, М.Я.Островерхов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". Ч.2. Київ 2004.
5. Видрин В.Н., Федосиенко А.С. Автоматизация прокатного производства. - М.: Металлургия, 1984. - 472 с.