

ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В БЕЗПЕРЕРВНИХ ПРОКАТНИХ СТАНАХ

У безперервних групах клітей сусідні кліті зв'язані між собою кінематичним (яка рухається) зв'язком – смугою, що прокатується. При цьому порушення роботи однієї кліті приводить до порушення роботи всієї лінії приводу стану.

Істотну роль у формуванні характеру цих коливань грає пружний зв'язок смуги, що прокатується.

При комплексному вивченні коливань системи привода стану й смуги необхідно враховувати наступні основні фактори:

- піддатливість смуги й головної лінії клітей безперервного стану;
- характер навантаження робітників клітей;
- взаємозв'язок механічних коливань із електродвигунами й т.д.

Розглянемо схему двох клітей, зв'язаних між собою пружною смугою (рис. 5.1).

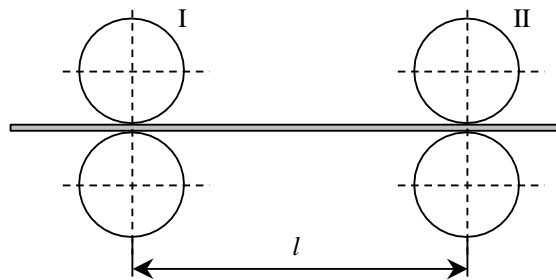


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема безперервного прокатного стану

Допустимо, різко збільшується момент у другій кліті. При цьому смуга між клітями буде випробовувати додаткову деформацію (натяг). Причому величина додаткового натягу смуги

$$T = c_1 \varphi_2, \quad (5.1)$$

де c_1 – коефіцієнт твердості смуги між клітями (технологічна твердість), Н/радий:

$$c_1 = \frac{EFR}{l},$$

E – модуль пружності матеріалу смуги, Н/мм²;

F – площа поперечного перерізу смуги, мм²;

R – радіус робочих валків, мм;

l – відстань між сусідніми клітями, мм;

φ_2 – кут повороту другої клітки, радий.

У другій кліті поява додаткового натягу викличе перехідний процес,

при цьому величина додаткового моменту від натягу

$$M_2^1 = TR . \quad (5.2)$$

З огляду на обертання валків,

$$T = c_1(\varphi_2 - \varphi_1) = c_1(\varphi_2 - \omega_1 t), \quad (5.3)$$

де ω_1 – кутова швидкість валків у першій кліті, радий/з;

t – час повороту валків, с.

Таким чином, додатковий момент

$$M_2^1 = R c_1 (\varphi_2 - \omega_1 t). \quad (5.4)$$

У перехідному процесі швидкості руху металу на виході з першої й входу у другу кліть неоднакові, тому що при зміні величини натягу змінюється й величина випередження металу.

Для спрощення рішення приймаємо величину випередження постійною.

Визначимо загальний момент сил опору на валках другої кліті:

$$M_2 = M_c + M_2^1, \quad (5.5)$$

де M_c – статичний момент на валках при стаціонарному процесі прокатки, Нм.

Перехідні процеси привода, що виникають внаслідок динамічних коливань системи, супроводжуються значними коливаннями струму в якорі електродвигуна.

Запишемо рівняння балансу електрорушійних сил у ланцюзі якоря електродвигуна:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + e, \quad (5.6)$$

де U – напруга, що приводить до якоря, В;

L – коефіцієнт самоіндукції ланцюга якоря;

i – сила струму, А;

R – опір ланцюга якоря, Ом;

e – протиелектрорушійна сила якоря, В.

Для системи керування «генератор-двигун» можна записати:

$$\frac{dU}{dt} = L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{de}{dt}. \quad (5.7)$$

З огляду на, що $M_1 = c_m i$ й $e = c_e \omega$, диференціальне рівняння моменту електродвигуна можна записати в наступному виді:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{L}{c_M} \frac{d^2 M_1}{dt^2} + \frac{R}{c_M} \frac{dM_1}{dt} + c_e \frac{d\omega}{dt}, \quad (5.8)$$

де c_M, c_e – постійні електродвигуна; $d\omega/dt = d^2\varphi/dt^2$.

Складемо диференціальне рівняння руху двомасової системи (однієї кліті):

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_1; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_2. \end{cases} \quad (5.9)$$

Динамічні процеси в системі привода з урахуванням дії електродвигуна й пружної смуги між клітями описуються наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_1; \\ \frac{L}{c_M} \frac{d^2 M_1}{dt^2} + \frac{R}{c_M} \frac{dM_1}{dt} + c_e \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = \frac{dU}{dt}; \\ I_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_2; \\ M_2 = M_c + c_{\Pi}(\varphi_2 - \omega_1 t). \end{cases} \quad (5.10)$$

Зневажаючи індуктивністю ланцюга якоря електродвигуна ($L=0$) і приймаючи пряmlinійний характер зміни напруги, яка підводиться до електродвигуна, одержимо

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_1; \\ \frac{R}{c_M} \dot{M}_1 + c_e \ddot{\varphi}_1 = U; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_2; \\ M_2 = M_c + c_{\Pi}(\varphi_2 - \omega_1 t). \end{cases} \quad (5.11)$$

Вирішуючи систему відносно φ_1 одержимо

$$\begin{aligned} \frac{d^5 \varphi_1}{dt^5} + \frac{c_e c_M}{R I_1} \frac{d^4 \varphi_1}{dt^4} + \left(c_{12} \frac{I_1 + I_2}{I_1 I_2} - \frac{c_{\Pi}}{I_2} \right) \frac{d^3 \varphi_1}{dt^3} + \frac{c_e c_M (c_{12} - c_{\Pi})}{R I_1 I_2} \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} - \\ - \frac{c_{12} c_{\Pi}}{I_1 I_2} \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{c_M}{R I_1 I_2} (c_{12} - c_{\Pi}) \frac{U_H}{t_p} - \frac{c_{12} c_{\Pi} \omega_1}{I_1 I_2}, \end{aligned} \quad (5.12)$$

де U_H – номінальна напруга якоря електродвигуна, В;

t_p – час розгону електродвигуна.

При цьому співвідношення $dU/dt = U_H/t_p$ описує лінійний закон зміни напруги в часі.

У підсумку маємо диференціальне однорідне рівняння п'ятого порядку. Для спрощення форми запису рівняння приймемо:

$a = c_e c_M / R$ (кутовий коефіцієнт механічної характеристики електродвигуна); $a_0 = a / I_1$; $f^2 = p^2 - c_n / I_2$; $n = a(c_{12} - c_n) / (I_1 I_2)$; $d = c_{12} c_n / (I_1 I_2)$,

де p – частота власних коливань двомасової системи головної лінії.

Характеристичне рівняння, отримане з диференціального однорідного, буде мати такий вигляд:

$$\lambda^5 + a\lambda^4 + f^2\lambda^3 + n\lambda^2 - d\lambda = 0. \quad (5.13)$$

Очевидно, що одне з корінь цього рівняння дорівнює нулю. У цьому випадку стан робить рух як тверда система.

Коливальна система з рівнянням частот четвертого ступеня буде стійкою за умови, що всі коефіцієнти позитивні й виконується умова

$$a_0 n f^2 > n^2 - a_0^2 d, \quad (5.14)$$

де f – частота коливань системи;

n – коефіцієнт загасання;

a_0 – нахил характеристик електродвигуна;

d – коефіцієнт зв'язку між характеристиками електродвигуна й силами опору машини.

Загальне рішення рівняння (5.12):

$$\varphi_1 = e^{\tau_1 t} (C_1 \cos p_1 t + C_2 \sin p_1 t) + e^{\tau_2 t} (C_3 \cos p_2 t + C_4 \sin p_2 t) + \left(\frac{c_M (c_{12} - c_n) U_H - \omega_1}{R c_{12} c_n t_p} \right) t, \quad (5.15)$$

де τ_1, τ_2 – дискримінанти рішення корінь бікватратного рівняння.

Слід зазначити, що власних частот у системи буде дві, тому що є два пружні зв'язки із твердостями c_{12} й c_n .

Рівняння моменту M_1 , виходячи з рішення рівняння руху,

$$M_1 = M_c + M', \quad (5.16)$$

де M' – відповідна зміна величини моменту привода залежно від зміни кутової швидкості.

В самому загальному випадку, момент електродвигуна складається із двох складових - постійного статичного моменту й додаткових коливальних складових із двома різними частотами:

- низкою (коливання пружної смуги між валками);
- високої (ця частота трохи нижче власної частоти коливань лінії стана без смуги).

У цілому динамічні навантаження в лінії стана (у приводі) залежать від багатьох технологічних й електромеханічних факторів:

- розмірів і пружних властивостей смуги;
- відстані між клітями;
- діаметра валків;
- твердості ланок головної лінії;
- розподілу мас у системі;
- величини електромеханічних постійних двигуна привода.

Експериментально встановлено, що в перехідний період натяг смуги змінюється за гармонійним законом із загасаючими амплітудами. Характер зміни струмів у якорі двигуна повністю повторює зміни натягу смуги.

За інших рівних умов значення частот коливань системи залежать від твердості смуги. Чим менше твердість смуги, тим нижче перша частота p_1 . Друга частота прагне до власної частоти коливань системи без смуги $p_2 \rightarrow p$. При відсутності смуги $p_1 = 0, p_2 = p$.

Розглянемо графіки залежності частот власних коливань системи від відношення твердостей системи для різних значень розподілу мас $n_1 = I_1 / (I_1 + I_2)$ (рис. 5.2).

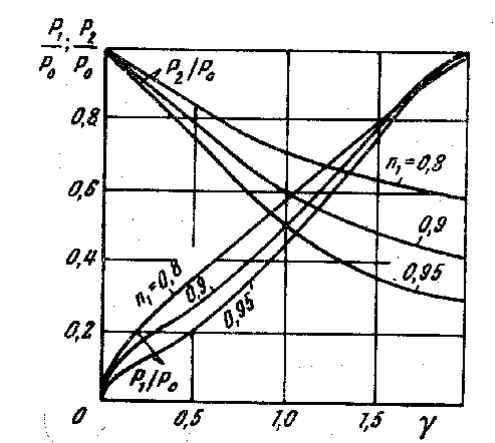


Рисунок 5.2 – Графіки частот коливань головної лінії стана при наявності пружного зв'язку між клітями

Дослідження дозволяють зробити висновок: неврахування пружного зв'язку між клітями або зневага піддатливістю елементів головної лінії можуть спотворити фізичну картину перехідних процесів у механічній системі й привести до помилкових результатів у розрахунках динамічних навантажень.

Література: [1, с.226-232]; [4, с.52-54].