

# СИНТЕЗ СУБОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА КОНТУРУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ

**Шибіко В.С., магістрант, Кудін В.Ф., професор, д.т.н.**

*кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** На даний час у багатьох металорізальних верстатах використовуються системи стабілізації зусилля різання [1]. Застосування таких систем дозволяє підвищити якість оброблюваної поверхні та збільшити продуктивність обладнання. Відмітною їх здатністю є складність побудови регуляторів, оскільки при використанні стандартних коректуючих пристроїв, при достатньо високих коефіцієнтах підсилення розімкнутої системи, у контурі стабілізації зусилля різання (КСЗР) виникає коливальний режим. Внаслідок цього, перехідний процес має високу коливальність, що являється неприпустимим при технологічному процесі металообробки.

Задача синтезу субоптимального регулятора для КСЗР є дуже актуальною на сьогоднішній день та знаходить відображення у багатьох публікаціях відомих вчених і науковців [2,3]. У даному випадку, ставиться задача пошуку закону оптимального керування для КСЗР, що вміщує електропривод подачі – двигун змінного струму (синхронний двигун з постійними магнітами), методом динамічного програмування Беллмана. Регулятор має забезпечувати стійкість системи при відпрацюванні задаючих збурень (впливів), мінімальну енергію керування та високі показники якості перехідного процесу.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є синтез субоптимального регулятора у контурі стабілізації зусилля різання, що вміщує синхронний двигун з постійними магнітами.

**Матеріали досліджень.** Структурна схема КСЗР з приводом подачі змінного струму зображена на рисунку 1:

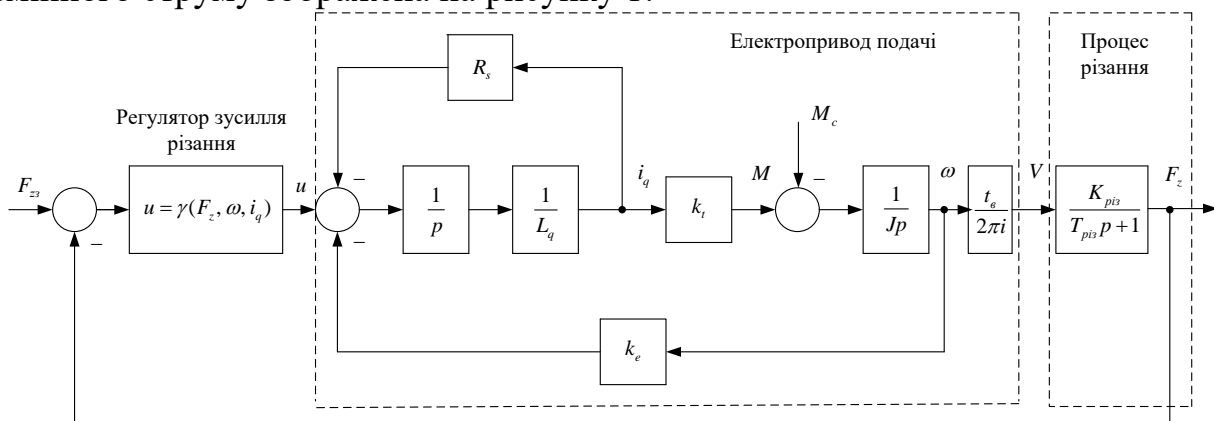


Рисунок 1 – Структурна схема КСЗР

$$K_{\partial^3 \zeta} = 2390.48; \quad \dot{O}_{\partial^3 \zeta} = 0.247 \text{ c}; \quad R_s = 3.05 \hat{I} \hat{i}; \quad L_q = 16 \hat{i} \hat{A} \hat{i}; \quad \dot{I}_{\tilde{n}} = \dot{I}_i = 4.3 \hat{I} \hat{i};$$

$$k_e = 1.041 \hat{A} \cdot \tilde{n} / \partial \hat{a} \hat{a}; \quad k_t = 1.65 \hat{I} \hat{i} / \hat{A}; \quad t_a = 2 \hat{i} \hat{i}; \quad i = 1444; \quad J = 0.51 \times 10^{-3} \hat{e} \hat{a} \cdot \hat{i}^2.$$

Модель процесу різання, яка отримана в [4], представлена аперіодичною ланкою першого порядку, що враховує інерційність процесу різання. Лінеаризована модель синхронного двигуна з постійними магнітами отримана в

[5]. На рисунку 1 прийняті наступні позначення:  $K_{\delta^3\zeta}$  - коефіцієнт підсилення процесу різання по подачі;  $\dot{O}_{\delta^3\zeta}$  - постійна часу процесу різання;  $F_z$  - тангенціальна складова зусилля різання;  $t_a$  - крок ходового гвинта;  $i$  - передаточне число редуктора;  $\omega$  - швидкість вала двигуна;  $V$  - лінійна швидкість подачі;  $J$  - момент інерції двигуна;  $M$  - момент на валу двигуна;  $M_c$  - момент навантаження вала двигуна;  $k_t$  - постійна величина, що пов'язує електромагнітний момент з дійсним значенням струму статора;  $k_e$  - постійна величина, що пов'язує значення ЕРС з кутовою швидкістю машини;  $L_q$  - індуктивність статора по повздовжній осі;  $R_s$  - опір статора;  $u$  - керуюча дія;  $F_{z\zeta}$  - завдання тангенціальної складової зусилля різання;  $i_q$  - складова струму статора по осі  $q$ .

Приведемо рішення задачі синтезу регулятора:

Повна математична модель КСЗР має наступний вигляд у формі Коші:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 \\ \dot{x}_2 = a_3 \cdot x_3 \\ \dot{x}_3 = -a_4 \cdot x_2 - a_5 \cdot x_3 + bu \end{cases}, \quad (1)$$

$$x_1 = F_z; \quad x_2 = \omega; \quad x_3 = i_q;$$

$$\text{де } a_1 = \frac{1}{T_{\delta^3\zeta}}; \quad a_2 = \frac{t_a \cdot K_{\delta^3\zeta}}{2\pi \cdot i \cdot T_{\delta^3\zeta}}; \quad a_3 = \frac{k_t}{J}; \quad a_4 = \frac{R_s}{L_q}; \quad a_5 = \frac{k_e}{L_q}; \quad b = \frac{1}{L_q}.$$

У якості мінімізуючого функціоналу приймемо квадратичний критерій оптимальності, який відповідає вимогам динамічної точності та мінімуму енергетичних затрат на керування:

$$\min_u J = \int_0^{\infty} \left( \sum_{i=1}^{n=3} \alpha_i x_i^2 + cu^2 \right) dt; \quad (2)$$

Функціональне рівняння Беллмана має вид:

$$\min_u \left[ \sum_{i=1}^{n=3} \alpha_i x_i^2 + cu^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} (-a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2} (a_3 \cdot x_3) + \frac{\partial V}{\partial x_3} (-a_4 \cdot x_2 - a_5 \cdot x_3 + bu) \right] = 0; \quad (3)$$

Диференціюючи (3), одержуємо закон керування:

$$u = -\frac{b}{2c} \frac{\partial V}{\partial x_3}; \quad (4)$$

Підставивши (4) в (3), та після виключення керування, отримаємо нелінійне рівняння Гамільтона – Якобі – Беллмана (ГЯБ):

$$\sum_{i=1}^{n=3} \alpha_i x_i^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} (-a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2} (a_3 \cdot x_3) + \frac{\partial V}{\partial x_3} (-a_4 \cdot x_2 - a_5 \cdot x_3) = \frac{b^2}{4c} \left( \frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^2; \quad (5) \text{Рі}$$

шення рівняння (5) шукається у вигляді квадратичної форми:

$$V(x_1, x_2, x_3) = \sum_{ij=1}^{n=3} k_{ij} x_i x_j; \quad (6)$$

Вагові константи  $\alpha_i$  та  $c$  функціонала (2) визначаємо, виходячи з максимально допустимих значень змінних стану системи та керуючих дій під час перехідного процесу:

$$\alpha_i = \left( \frac{1}{x_{i\max}} \right)^2, \quad c = \left( \frac{1}{u_{\max}} \right)^2, \quad (7)$$

Коефіцієнти співвідношення (6) визначаються із системи нелінійних алгебраїчних рівнянь Рікати.

Рівняння оптимального регулятора має вигляд:

$$u = -0.00001 \cdot x_1 - 0.0002 \cdot x_2 - 1.6298 \cdot x_3 \quad (8)$$

Для дослідження динаміки замкнутої системи було проведено цифрове моделювання. Перехідні процеси тангенціальної складової зусилля різання представлені на рисунку 2:

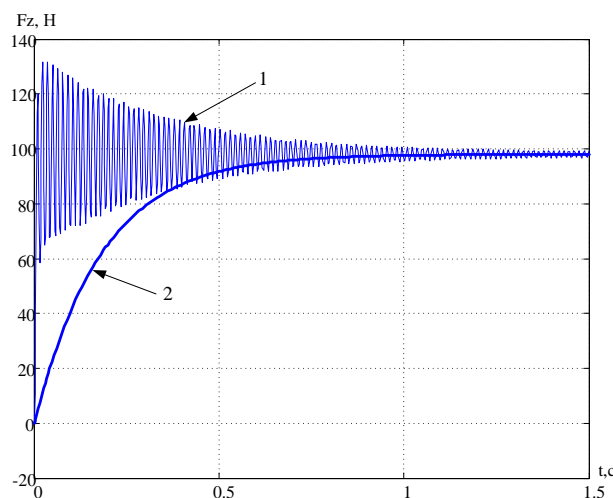


Рисунок 2 – Перехідні процеси при використанні П-регулятора (крива 1) та синтезованого субоптимального регулятора (крива 2)

**Висновки.** Аналіз графіків показує, що якість перехідного процесу у системі з синтезованим субоптимальним регулятором істотно вища, ніж із традиційним П-регулятором. Використання запропонованого регулятора забезпечує відсутність коливального режиму та дозволяє скоротити час перехідного процесу від  $0.722 \pi$  до  $0.54 \pi$ .

#### Перелік посилань

1. Шапарев Н. К. Расчет автоматизированных систем управления металлообработкой. – К.: Либідь, 1992. – 272 с.
2. Design and analysis of output feedback force control in parallel turning./R. Sudhakara, R. Landers // Proc I MECHE Part I Journal of Systems & Control Engineering. – 2004. – № 16. – PP. 487-501.
3. Kudin V. F., Kolacny J. Synthesis of suboptimal nonlinear regulator by immersion method. // J. Electric engineering. – Bratislava, Slovakia: – 1998. – Vol.49. – № 1-2. – PP 11-15.
4. Петраков Ю. В. Теорія автоматичного управління в металообробці. – К.: ІЗМН, 1999. – 212 с.
5. Е. В. Полилов, Е. С. Руднев, С. П. Скорик. Робастное управление синхронным электроприводом на основе  $H_2$ - и  $H_\infty$ - оптимизации // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – № 11 (186), 2011. – ст. 305-314.