

## АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ З ЗАЗОРАМИ

Ільків А.В., магістрант, Пижов В.М., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** Електричні двигуни широко використовуються в промисловості і в більшості застосувань вони потребують також системи керування для зміни і підтримки параметрів роботи. На разі, існує декілька методів керування різними типами електричних двигунів. Але більшість з них не враховує нелінійності, які входять в контур керування такі як мертва зона, гістерезис. Однією з таких нелінійностей є люфт. Відстань між зубцями в механічній системі (в електромеханіці це зазвичай редуктор) називають люфтом. Його не врахування в системі керування призводить до погіршення показників якості, появи високочастотного шуму, збільшення динамічних навантажень у передачах або навіть до руйнування зубчастих передач [1]. Тому дослідження електромеханічних систем з люфтом залишається актуальною і необхідною задачею.

**Мета.** Аналітичний огляд існуючих проблем та методів їх вирішення в електромеханічних системах з люфтами в кінематичних передачах.

**Матеріали і результати досліджень.** Існує багато галузей де повна компенсація люфта необхідна для отримання належної поведінки системи, наприклад, електропотяги та сервомеханізми. Тому ця тема часто піднімається в різних роботах. В основному ці праці можна поділити на три основні групи за основною темою: моделювання люфта, керування електромеханічними системами з люфтом та виявлення та оцінка значень люфта. Тому в аналітичному огляді доцільно розглянути всі три напрямки.

У переважній більшості публікацій, механічна частина з зазором представлена двомасовою розрахунковою схемою, яка наведена на рисунку 1 [2].

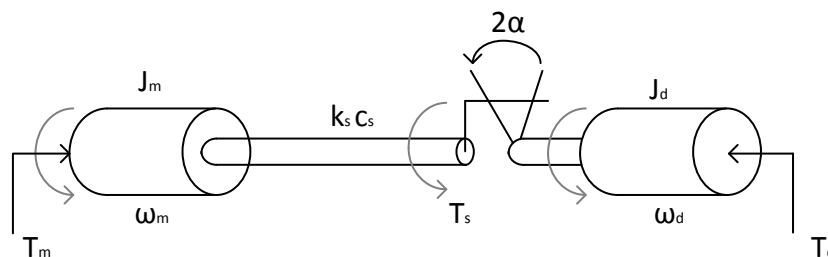


Рисунок 1 – Схематичний вигляд двомасової системи з люфтом

На рис. 1 позначено:  $J_m$  – момент інерції двигуна;  $T_m$  – момент двигуна;  $J_d$  – момент інерції навантаження;  $T_d$  – момент навантаження;  $T_s$  – момент, який передає вал (пружний момент);  $k_s$  – коефіцієнт пружності валу;  $c_s$  – внутрішній коефіцієнт демпфування валу;  $\omega_m, \omega_d$  – кутова швидкість двигуна та навантаження відповідно,  $\alpha$  – половина від величини люфта.

Важливим питанням є також математичний опис ланки з люфтом. Одна з найпростіших моделей була представлена в вигляді зони нечутливості [3], як відображено на структурній схемі двомасової системи з люфтом, рисунок 2.

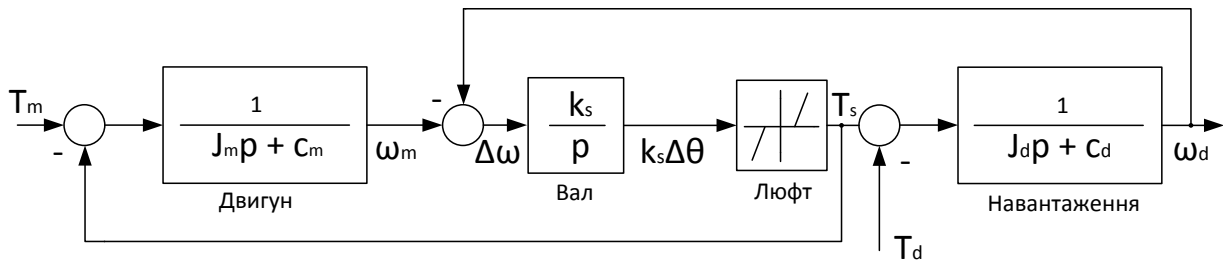


Рисунок 2 – Структурна схема двомасової системи з люфтом

На рис. 2  $c_m$  та  $c_d$  – коефіцієнти в'язкого тертя в двигуні та в навантаженні відповідно,  $\Delta\theta = \theta_m - \theta_d$  – різниця кутів оберту відповідно валів двигуна та навантаження. Коефіцієнт демпфування прийнято  $c_s = 0$ . Тоді момент, який передає вал:

$$T_s = k_s D_\alpha(\Delta\theta)$$

$$D_\alpha = \begin{cases} \Delta\theta - \alpha, & \Delta\theta > \alpha \\ 0, & |\Delta\theta| < \alpha \\ \Delta\theta + \alpha, & \Delta\theta < -\alpha \end{cases}$$

де  $D_\alpha$  – функція зони нечутливості.

Також, люфт моделювали як мікроскопічну взаємодію між зубцями і показали, що його наявність можна виявити і виміряти датчиками (наприклад, датчиком моменту або акселерометром) [4]. У [2] представлено точну фізичну модель люфта, яку в подальшому використали для проектування системи керування електропотягом [5,6].

Коли механічна частина системи знаходиться всередині контуру керування, то люфт має дестабілізуючий ефект. Для компенсації даного ефекту було запропоновано багато варіантів як лінійних регуляторів, так і нелінійних [7,8]. Для того, щоб лінійний регулятор контролював систему він повинен бути достатньо робастний до даної нелінійності. В [5] це досягається додаванням до системи керування з лінійним регулятором спостерігача моменту  $T_s$ , який передається через трансмісію. Іншим способом використання лінійного регулятора в системах з люфтом є заведення зворотного зв'язку за швидкістю і за положенням не валу двигуна, а виходу механічної системи (редуктора) [9]. Це дозволяє в таких системах використовувати звичайний пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор.

Оскільки керування серво-приводами передбачає точне відпрацювання завдання, то проблеми, пов'язані з наявністю люфта, доволі часто виникають саме в цій області. Наприклад, в [10] був розроблений алгоритм на основі релейне керування (switched control), що робить електромеханічну систему

повністю робастною до люфту і тертя. Також зустрічаються методи компенсації люфту в приводах роботів з використанням двох двигунів [11].

Щоб виявити і оцінити люфт в системі необхідно використовувати достатньо складні алгоритми на основі графів [12] чи нейронних мереж [13].

**Висновок.** В даній роботі був представлений короткий аналітичний огляд сучасних напрямків роботи з дослідження систем з люфтом. Як видно з використаних матеріалів, ця тема залишається актуальною та має широкий спектр тем для подальших досліджень. Зокрема, однією з недостатньо висвітлених тем являється напрямок дослідження систем з двома нелінійностями типу люфт. Це характерно для одно-двигунного електроприводу двох механізмів або двох-двигунного електроприводу. У таких випадках механічна частина електроприводу буде представлена трьох-масовою розрахунковою схемою. В подальшому планується розвивати саме цю тематику.

#### Перелік посилань

1. Klantari R., Saadat M. Backlash Nonlinearity Modeling and Adaptive Controller Design for an Electromechanical Power Transmission System (2009).
2. Nordin M. and Gutman P.O. Controlling mechanical systems with backlash – a survey, *Automatica* (2002).
3. Slotine J.J.E. and Weiping L., *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1991).
4. Sarkar N., Ellis R.E. and Moore, T.N. Backlash detection in geared mechanisms: Modeling, simulation and experimentation, *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing* (1998).
5. Lagerberg A. and Egardt B. Evaluation of control strategies for automotive powertrain with backlash, *Advanced Vehicle Control*, (2002).
6. Lagerberg A. and Egardt B. Backlash estimation with application to automotive powertrains, *IEEE Transaction on Control Systems Technology* (May 2007).
7. Nordin M., Galic J. and Gutman P. O. New models for backlash and gear play, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* (1997).
8. Rostalski P., Besselmann T., Baric, M., Van Belzan. F. and Morari M. A hybrid approach to modeling, control and state estimation of mechanical systems with backlash, *International Journal of Control*, (2007).
9. Indri M. and Tornambe A. Application of a PD controller on two mating gears with elasticity and backlash, *San Diego* (1997).
10. Orlov Y. and Aguilar L. Switched chattering control vs. backlash/friction phenomena in electrical servo-motors, *Int. J. Control* (2003).
11. Schiffer J. Dual motor control for backlash reduction Department of Automatic Control, Lund University (2009).
12. M. A. Djeziri, R. Merzouki, B. Ould Bouamama, G. Dauphin Tanguy. Fault detection of backlash phenomenon in mechatronic system with parameter uncertainties using bond graph approach, Luoyang, China, 2006.
13. Strobl D. and Schroder D. Neural Observers for the Identification of Backlash in Electromechanical Systems IFAC Proceedings volumes (2005).