

## ВПЛИВ ПУЛЬСАЦІЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА СТІЙКІСТЬ БОРТОВИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Якість виконання бортовим електроприводом [1] своїх функцій можлива в умовах їх стійкої роботи. На цей режим суттєво впливають пульсації вихідної напруги силових перетворювачів електроенергії [2], які працюють в дискретному режимі. Тому на відміну від неперервних систем дискретні системи мають кінцеве значення граничного коефіцієнта підсилення. В бортових системах електроприводу широке застосування знайшли широтно-імпульсні перетворювачі (ШПП) [3] постійної напруги. В таких системах під впливом пульсацій вірогідна поява автоколивань на основній субгармоніці [4], частота якої вдвічі менше, ніж частота основної гармоніки напруги на виході ШПП. Умови субгармонічної стійкості систем бортового (слідкуючого) електроприводу можна знайти за результатами аналізу їх характеристичного рівняння. Структурна схема електроприводу представлена рис .1.

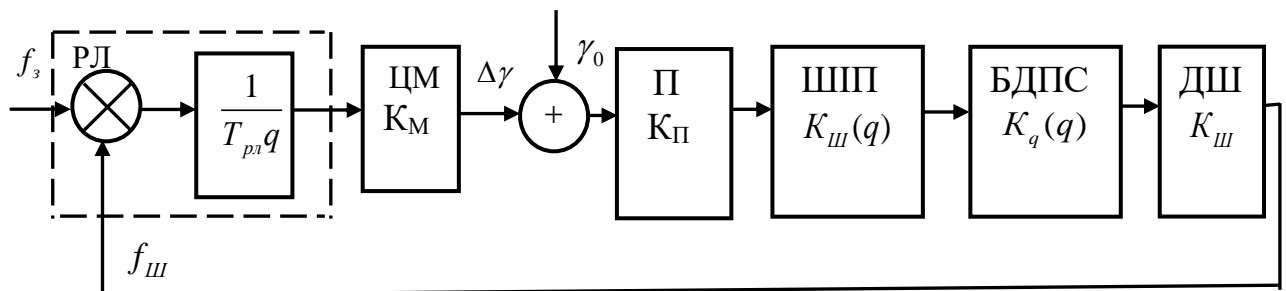


Рис.1– Структурна схема електроприводу

На структурній схемі:

$f_3$  – частота, що задає швидкість; ДШ – імпульсний давач швидкості;  $f_{Ш}$  – частота сигналу на виході давача швидкості; РЛ–реверсивний цифровий лічильник; ЦМ–цифровий модулятор з коефіцієнтом передачі  $K_M$  ; П–підсилювач з коефіцієнтом передачі  $K_P$  ;  $K_{Ш}(q)$  – передатна функція ШПП ; БДПС –безколекторний двигун постійного струму з передатною функцією  $K_q(q)$  , діапазон відхилення шпаруватості регулювання,  $\gamma_0$  – його еталонне значення.

За результатами аналізу розімкненої системи, рис.1, знайдена передаточна функція на основній субгармоніці для  $i$ -тої зони ШІМ.

$$K_{pi} \left( j\bar{\omega}, \frac{i}{N} \right), \quad (1)$$

де:  $\bar{\omega} = \omega T$ ,  $T$  –період роботи ШПП,  $\omega$ –кутова частота,  $N$ –кількість функцій Уолша, що апроксимують процес ШІМ,  $i$  – номер зони ШІМ.

В результаті аналізу характеристичного рівняння

$$1 + K_{pi} \left( j\bar{\omega}, \frac{i}{N} \right) = 0 \quad (2)$$

системи знайдено умови її стійкості на основній субгармоніці для двох випадків.

1) Коли БДПС працює в інерційній системі, його можна представити аперіодичною ланкою з передатною функцією

$$K_o(q) = \frac{\beta}{q + \beta}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{T}{T_m},$$

де:  $T_m$  – електромеханічна стала електродвигуна в режимі БДПС.

Для цього випадку умови стійкості системи на основній субгармонії представлені на рис. 2, де криві 1,2 справедливі для  $i=1,2$ , крива 4 – для  $i=3$ , крива 3 – експериментальна.

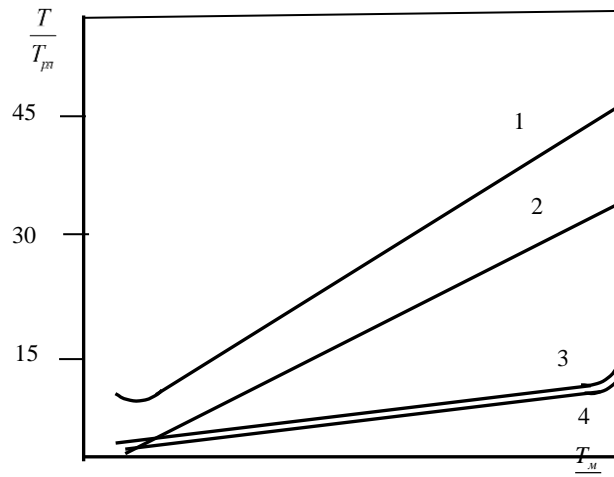


Рис.2 – Умови стійкості інерційної системи з БДПС на основній субгармонії, де  $T_{pl}$  – постійна часу реверсивного лічильника.

2) Якщо БДПС працює в системі високої швидкодії, то його передаточна функція має другий порядок (коливальна ланка):

$$K_o(q) = \frac{\overline{a_0}^{-2}}{q^2 + \overline{a_1}q + \overline{a_0}^{-2}}, \quad (4)$$

де:  $\overline{a_0}^{-2} = a_0 T^2, \overline{a_1} = a_1 T$ .

Умови стійкості такої системи на основній субгармонії представлені на рис.3 для випадку, коли корені характеристичного рівняння замкненої системи є дійсні числа.

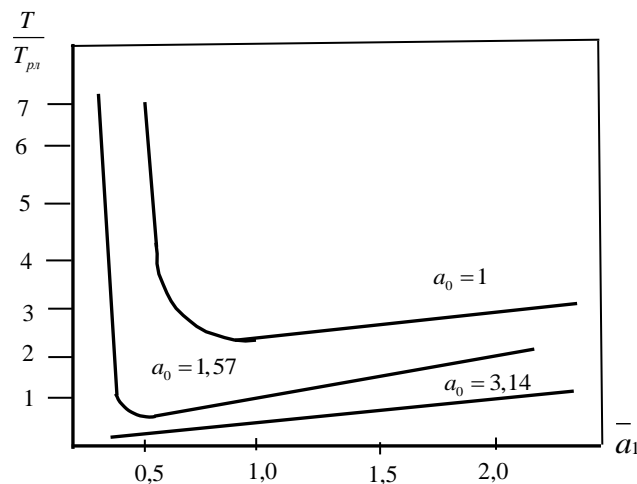


Рис.3 – Умови стійкості системи високої швидкодії з БДПС на основній субгармонії. Якщо вони є комплексними числами, то межі стійкості системи характеризує рис. 4

Видно, що для цього випадку криві стійкості на основній субгармоніці мають резонансний характер.

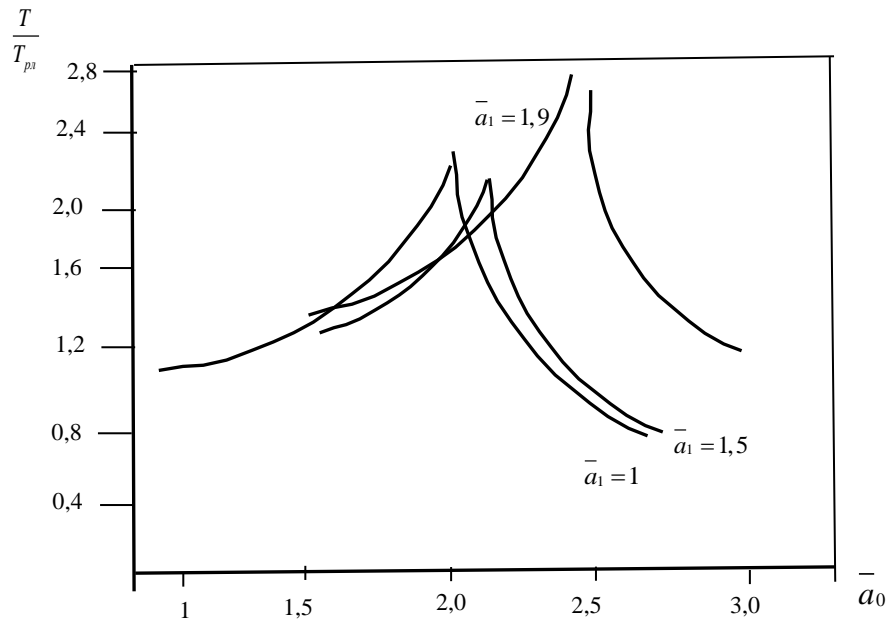


Рис.4 – Межі субгармонійної стійкості системи третього порядку

Результати, що отримано, дозволяють знайти умови стійкості бортової системи електроприводу на основній субгармоніці, якщо безколекторний двигун працює в режимі машини постійного струму. Для електроприводів, в яких безколекторний двигун з постійними магнітами працює в режимі машини змінного струму (як синхронна машина) з відпрацюванням системою похибки за фазою, умови стійкості на основній субгармоніці можна знайти, використовуючи ту ж саму методику, що і у попередніх прикладах.

#### Список посилань

1. S. Liu, D. Xin and L. Yang, "A Novel Single-Phase Bidirectional Electric-Drive-Reconstructed Onboard Converter for Electric Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44739-44747, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970201.,
2. T. Song, Y. Zhang and Z. Huang, "3-D Negative-Sequence Current Reconstruction Method for DC Bus Voltage Ripple Suppression," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, doi: 10.1109/TIE.2025.3563669.
3. Q. Peng et al., "Harmonic Distortion Analysis of an eGPU-Fed Aircraft EPDS with Phase-Shifted Carrier PWM," 2024 IEEE 15th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Luxembourg, Luxembourg, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDG61800.2024.10667439
4. S. Li, T. Chen and B. Fahimi, "On the Occurrence of Nonlinear Dynamic Phenomena in the Hysteresis-Controlled Switched Reluctance Motor Drive," *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, 2018, pp. 5710-5715, doi: 10.1109/IECON.2018.8591180