

## БЕЗЛЮФТОВИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;  
<sup>2</sup>Інститут електродинаміки НАН України, Київ

*Запропоновано нове технічне рішення на основі використання безлюфтового електромеханічного диференціала у сполученні з принципом двоканального керування, що забезпечує підвищення точності та збільшення діапазону регулювання швидкості електропривода.*

**Ключові слова:** двоканальний безлюфтовий електропривод, система автоматичного керування, електромеханічний диференціал, підвищення точності, діапазон регулювання швидкості, перехідний процес, дослідження.

### Вступ

Існує низка машин з обертальним та поступальним рухом виконавчих органів, які працюють на малих швидкостях і мають підвищені вимоги до точності і діапазону регулювання вихідних координат. До таких машин відносяться роботи, маніпулятори, металообробні та деревообробні верстати різного технологічного призначення, радіотелескопи, засоби відеоспостереження, системи наведення озброєння, а також антени радіолокаційних станцій (РЛС) та ін. Одним з головних елементів будь-якої РЛС є антена, обертання якої здійснюється електроприводом (ЕП). ЕП РЛС повинен забезпечити високу статичну та динамічну точність відпрацювання кутових координат положення та швидкості, бути надійним, енергоефективним та ремонтпридатним.

На антени РЛС діє різкозмінне вітрове навантаження, а у випадку їх встановлення на рухомих об'єктах (автомобілях, судах) має місце хитавиця. ЕП РЛС повинен бути розрахований на безвідмовну роботу у всьому діапазоні вітрового навантаження (1...50 м/с) та у несприятливих зовнішніх умовах.

Оскільки середня швидкість обертання антен РЛС лежить в межах 10...60 об/хв, у системах ЕП використовують редуктори, які потребують додаткового обслуговування, вносять люфти в кінематичний ланцюг і тим самим обмежують точність і довговічність всієї системи.

Актуальним завданням для РЛС є підвищення точності та надійності електроприводів обертання антен, в тому числі за рахунок використання безредукторних електроприводів (БЕП) [1].

### Результати дослідження

В результаті проведених досліджень, з метою підвищення точності, діапазону регулювання швидкості та надійності ЕП РЛС, запропоновано технічне рішення на основі використання безлюфтового електромеханічного диференціала у поєднанні з принципом двоканального керування [2].

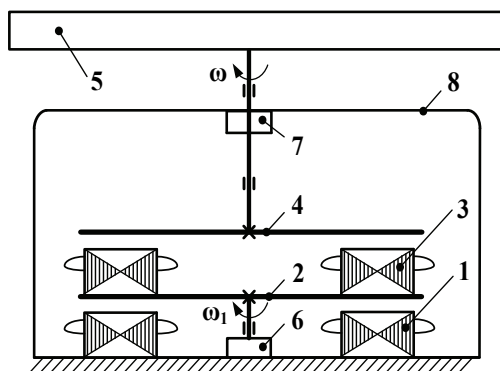


Рис. 1. Кінематична схема двоканального БЕП

Сутність цього технічного рішення пояснюється кінематичною схемою двоканального безредукторного електропривода обертового руху, показаною на рис. 1, де 1 — статор основного електродвигуна, встановлений на нерухомій основі; 2 — ротор основного електродвигуна зі встановленим на ньому 3 — статором допоміжного електродвигуна; 4 — ротор допоміжного електродвигуна та встановлений на ньому об'єкт керування (антена) 5; 6 — датчик кутової швидкості  $\omega_1$  ротора 2 основного електродвигуна відносно статора 1; 7 — датчик кутової

швидкості  $\omega$  об'єкта керування відносно нерухомої основи. При цьому основний та допоміжний електроприводи утворюють двоканальну систему автоматичного керування, в якій електропривод основного каналу I долає зовнішні збурення, а електропривод допоміжного каналу II усуває похибку основного електропривода.

Двоканальний регульований електропривод містить:

- основний електропривод, який включає електродвигун, датчик швидкості ротора електродвигуна відносно статора та реалізований на його основі контур регулювання швидкості ротора;
- допоміжний електропривод, який включає електродвигун, датчик швидкості об'єкта відносно нерухомої основи та реалізований на його основі контур регулювання швидкості об'єкта.

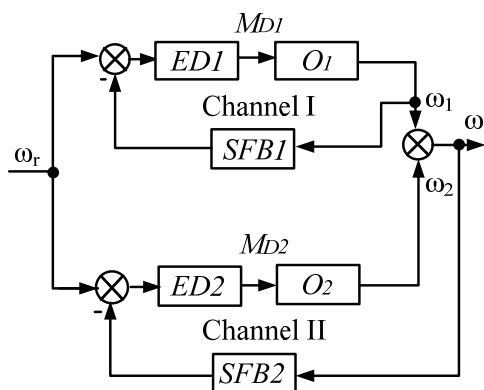


Рис. 2. Структурна схема двоканального БЕП

основним електроприводом, прикладається до ротора 2 (рис. 1) і забезпечує його рух разом з об'єктом керування 5, компенсуючи статичний та динамічний моменти сил, що діють на об'єкт. Допоміжний електропривод створює додаткову керувальну дію, що прикладається безпосередньо до об'єкта керування 5 та компенсує похибку основного електропривода.

Для створення опорного моменту самогальмування в електроприводах з метою зменшення їх встановленої потужності, забезпечення можливості фіксації ротора двигунів відносно статора у відключеному стані, а також усунення взаємного впливу основного та допоміжного електроприводів в статичних та динамічних режимах, електродвигуни використовуються у поєднанні з самогальмівною безлюфтовою механічною передачею. Застосування самогальмівної передачі також дає можливість відключати один з електродвигунів в режимах холостого ходу та за малих навантажень.

Крім того, використання електромеханічного диференціала забезпечує розширення діапазону регулювання дводвигунного електропривода, як у бік збільшення результуючої швидкості, так і у бік її зменшення у разі незалежного включення локальних електроприводів. З метою збільшення швидкості напрямки руху електродвигунів локальних електроприводів вибираються односпрямованими, тоді результуюча швидкість об'єкта керування дорівнює сумі швидкостей роторів електродвигунів. Для отримання малих та надмалих швидкостей руху об'єкта керування напрямки руху електродвигунів локальних електроприводів обираються протилежними, внаслідок чого результуюча швидкість виконавчого органу дорівнює різниці швидкостей роторів електродвигунів. При цьому отримання низьких швидкостей руху виконавчого органу можливе за швидкостей локальних електроприводів, близьких до номінальних, що підвищує стабільність і рівномірність руху. Водночас кожний з локальних електроприводів окремо не може забезпечити надмалої швидкості руху внаслідок обмеження діапазону регулювання швидкості вниз від номінальної.

У разі однакових протилежно спрямованих швидкостей руху роторів електродвигунів двоканального приводу виконавчий орган знаходиться у нерухомому стані, що дозволяє усунути сухе тертя, яке має місце в момент зрушування в одноканальних редукторних електроприводах.

Застосування електромеханічного диференціала дає можливість здійснення реверсу виконавчого органу без реверсування локальних електроприводів за рахунок зміни співвідношення їх швидкостей у випадку різноспрямованого руху. Такий спосіб реверсу дозволяє уникнути вибірки люфтів в редукторних електроприводах, оскільки положення місця контакту у зубчастому зачепленні не змінюється.

Двоканальний принцип керування забезпечує високоточне регулювання швидкості та положення об'єкта за рахунок підвищення порядку астатизму та збільшення коефіцієнта передач всієї двоканальної системи в цілому у порівнянні з порядком астатизму та коефіцієнтом передач

На рис. 2 показана структурна схема двоканального регульованого по швидкості електропривода, де позначені: ED1, ED2 — електроприводи основного I та допоміжного II каналів, відповідно; O1 — об'єкт керування I каналу (включає ланки 2, 3, 4, 5, кінематичної схеми рис. 1); O2 — об'єкт керування II каналу (включає ланки 4, 5 кінематичної схеми рис. 1); SFB1 — зворотний зв'язок за швидкістю  $\omega_1$  ротора 2 основного електродвигуна; SFB2 — головний зворотний зв'язок за швидкістю  $\omega$  об'єкта (антени);  $M_{D1}$ ,  $M_{D2}$  — обертальні моменти двигунів I та II каналу;  $\omega_r$  — задана кутова швидкість об'єкта.

Безлюфтовий двоканальний електропривод працює таким чином. Електромагнітний момент, створюваний

кожного окремого каналу, без погіршення стійкості.

Оскільки електромеханічна стала часу ЕП РЛС значно перевищує електромагнітну, то динамічну модель електричних координат можна апроксимувати аперіодичною ланкою, а залежність між швидкістю і електромагнітним моментом визначити на основі лінеаризації механічної характеристики двигуна на робочій ділянці. Тоді структурна схема асинхронного двигуна стає подібною до структурної схеми двигуна постійного струму [3] і при частотному керуванні має вигляд, показаний на рис. 3.

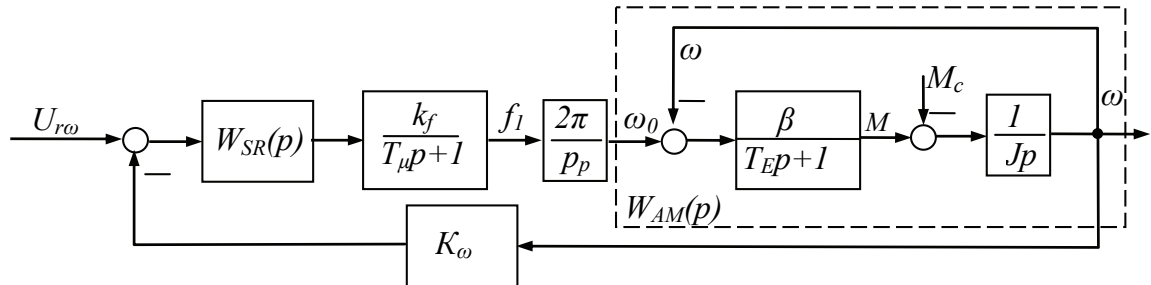


Рис. 3. Спрощена структурна схема контура регулювання швидкості асинхронного двигуна при частотному керуванні:  $\omega$  — швидкість двигуна;  $M$  — момент двигуна;  $M_c$  — момент навантаження;  $\omega_0$  — швидкість холостого ходу двигуна;  $f_1$  — вихідна частота перетворювача;  $p_p$  — кількість пар полюсів;  $J$  — момент інерції двигуна та механізму;  $\beta$  — жорсткість механічної характеристики двигуна;  $T_E$  — електромагнітна стала часу;  $K_f$  — коефіцієнт передачі перетворювача частоти;  $T_\mu$  — некомпенсована стала часу перетворювача;  $K_\omega$  — коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;  $U_{r\omega}$  — напруга задання швидкості;  $W_{SR}(p)$  — передаточна функція синтезованого ПІД-регулятора швидкості

$$W_{SR}(p) = 0,00084p + 0,26 + 1/2,37p.$$

Для оцінки показників двоканального електропривода РЛС складено модель двоканальної системи в пакеті Matlab Simulink на основі структурної схеми контуру регулювання швидкості асинхронного двигуна при частотному керуванні (див. рис. 3). В якості індукторів двоканального електропривода РЛС обрані статори тихохідних асинхронних двигунів з кількістю полюсів  $2p_p = 40$  та синхронною швидкістю 15,7 1/с. Інші параметри моделі двоканального електропривода:  $f_{1H} = 50$  Гц — номінальна частота напруги живлення;  $M_M = 80$  Нм — максимальний момент навантаження на валу;  $J = 5,3$  кг·м<sup>2</sup>,  $\beta = 8,5$  Нм·с;  $T_E = 0,0032$  с;  $K_f = 5$ ;  $T_\mu = 0,01$ с;  $K_\omega = 1,22$  В·с. В моделі враховані обмеження регуляторів швидкості.

На рис. 4. показані графіки перехідних процесів швидкості I та II каналів, а також об'єкта керування, на рис. 5 — графіки перехідних процесів моментів двигунів I та II каналів, відповідно, у збільшеному масштабі. Досліджено пуск під навантаженням 10 Нм з подальшим накиданням додаткового навантаження на об'єкт керування 40 Нм.

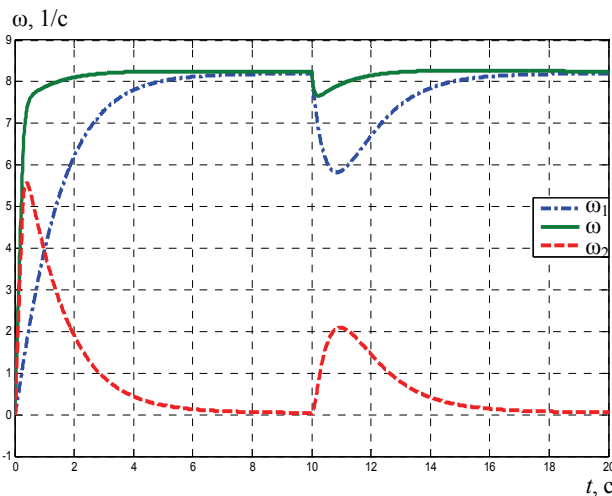


Рис. 4. Графіки перехідних процесів швидкості

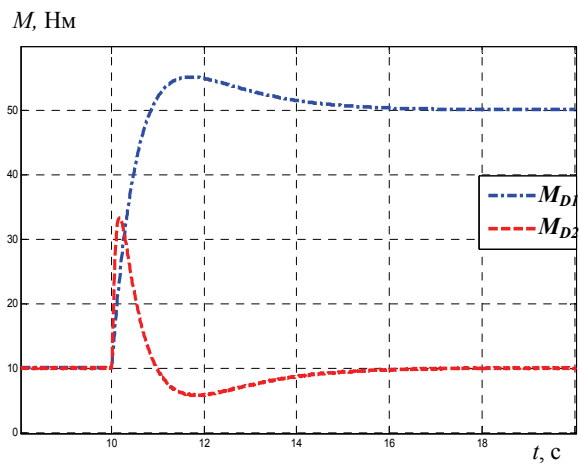


Рис. 5. Графіки перехідних процесів моментів

З графіків перехідних процесів видно, що використання двоканальної системи дозволило приблизно в 3 рази збільшити швидкодію та зменшити динамічну похибку і час відновлення швидкості у разі зміни навантаження. При цьому величина навантаження допоміжного каналу в основному визначається дією, пов'язаною з компенсацією похибки першого каналу.

### Висновки

Запропонований підхід дозволяє підвищити статичну і динамічну точність електропривода та збільшити діапазон регулювання швидкості. Завдяки використанню електромеханічного диференціала забезпечується отримання надмалих швидкостей руху виконавчого органу робочої машини, а також усунення сухого тертя в механічних передачах, яке виникає в момент зрушування.

Здійснення реверсу виконавчого органу без реверсування локальних електроприводів дозволяє уникнути вибірки люфтів в двоканальному редукторному електроприводі.

Поєднання функцій безлюфтового електромеханічного диференціала та двоканального керування в одному пристрої вирішує проблему створення високоточного регульованого електропривода.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стяжкін В. П. Автоматизована система керування безредукторними електроприводами суднових навігаційних РЛС / В. П. Стяжкін, С. І. Гаврилюк // Електроніка та зв'язок : науково-технічний журнал. — 2016. — Т. 21, № 4 (93).
2. Заявка на корисну модель України. Двоканальний регульований електропривод / В. І. Теряєв, В. П. Стяжкін, С. І. Гаврилюк. — номер заявки u 2017 09525 від 29.09.2017 р.
3. Особливості синтезу та дослідження електромеханічних систем з послідовною корекцією та частотнорегульованими асинхронними двигунами // [М. Г. Попович, В. І. Теряєв, О. І. Кіселичник, С. О. Бур'ян]. — Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — Кременчук : КДПУ, 2007. — Вип. 3/2007 (44). Ч. 2. — С. 12—16.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.10. 2017

**Теряєв Віталій Іванович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: kpivit@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ;

**Стяжкін Віталій Павлович** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу систем стабілізованого струму, e-mail: tems@ukr.net ;

**Гаврилюк Сергій Іванович** — аспірант, e-mail: serggtm@gmail.com .

Інститут електродинаміки НАН України, Київ

V. I. Teriaiev<sup>1</sup>  
V. P. Stiazhkin<sup>2</sup>  
S. I. Havryliuk<sup>2</sup>

## Backlash Free Two Channel Electric Drive

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

<sup>2</sup>Institute of Electrodynamics of the NASU

*There has been proposed the new technical decision based on the using backlash free electromechanical differential and the principle of two channel control, which provides increasing of the accuracy and speed control range of the electric drive.*

**Keywords:** two-channel backlash free electric drive, automatic control system, electromechanical differential, accuracy increase, speed control range, transient process, research.

**Teriaiev Vitalii I.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electrical Drives, e-mail: kpivit@gmail.com ;

**Stiazhkin Vitalii P.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Stabilized Current Systems, e-mail: tems@ukr.net ;

**Havryliuk Serhii I.** — Post-Graduate Student, e-mail: serggtm@gmail.com

**В. И. Теряев**<sup>1</sup>  
**В. П. Стяжкин**<sup>2</sup>  
**С. И. Гаврилюк**<sup>2</sup>

## **Безлюфтовый двухканальный электропривод**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»;

<sup>2</sup>Институт электродинамики НАН Украины, Киев

*Предложено новое техническое решение на основе использования безлюфтового электромеханического дифференциала в сочетании с принципом двухканального управления, обеспечивающее повышение точности и увеличение диапазона регулирования скорости электропривода.*

**Ключевые слова:** двухканальный безлюфтовый электропривод, система автоматического управления, электромеханический дифференциал, повышение точности, диапазон регулирования скорости, переходной процесс, исследование.

**Теряев Виталий Иванович** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: kpivit@gmail.com ;

**Стяжкин Виталий Павлович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела систем стабилизированного тока, e-mail: tems@ukr.net ;

**Гаврилюк Сергей Иванович** — аспирант, e-mail: serggtm@gmail.com