

## СПІВВІДНОШЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ ТА МОМЕНТІВ У ДВОДВИГУННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ З БЕЗРЕДУКТОРНИМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ДИФЕРЕНЦІАЛОМ

В.П. Стяжкін<sup>1\*</sup>, канд.техн.наук, В.І. Теряєв<sup>2</sup>, канд.техн.наук, С.І. Гаврилюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net)

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: [kpivit@gmail.com](mailto:kpivit@gmail.com)

Встановлено співвідношення швидкостей та моментів у дводвигунному електроприводі з безредукторним електромеханічним диференціалом у замкненій двоканальній системі регулювання швидкості. Досліджено статичні та динамічні режими роботи цієї системи з врахуванням встановлених співвідношень. Бібл. 5, рис. 4.

**Ключові слова:** дводвигунний електропривод, безредукторний електромеханічний диференціал, математична модель, двоканальна система керування.

**Постановка проблеми.** Перспективною тенденцією побудови електромеханічних систем є об'єднання робочих органів (РО) механізмів з електродвигунами без використання механічних передач. Такий електропривод отримав назву “прямий” або “безредукторний”. Використання прямого електроприводу дає можливість позбутися люфтів, пружностей та кінематичних похибок, властивих механічним передачам і, завдяки цьому, збільшити точність керування РО.

Запропоноване у [1] технічне рішення на основі використання безредукторного електромеханічного диференціала у сполученні з принципом двоканального керування дає змогу позбутися вказаних вище недоліків. Електромеханічний диференціал дає можливість розширити діапазон регулювання швидкості вище від номінальної або отримати наднизькі швидкості руху. Двоканальне керування [2,3,4,5] забезпечує збільшення швидкодії та зменшення статичних і динамічних похибок за швидкістю та положенням РО за рахунок підвищення порядку астатизму або коефіцієнта передачі всієї двоканальної системи у цілому в порівнянні з порядком астатизму або коефіцієнтом передачі кожного окремого каналу без погіршення запасу стійкості.

Двоканальний електропривод з безредукторним електромеханічним диференціалом має ряд особливостей, обумовлених його конструкцією, зокрема наявністю перехресних зв'язків між електродвигунами. Тому для здійснення синтезу системи керування такого електроприводу необхідно розробити математичну модель електромеханічного диференціала.

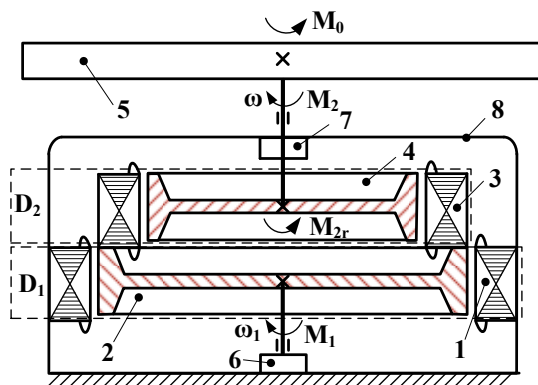


Рис. 1

датчик кутової швидкості  $\omega_1$  ротора 2 першого електродвигуна відносно статора 1 та струмопідвід до рухомого статора електродвигуна  $D_2$ ; 7 – датчик кутової швидкості  $\omega$  РО відносно нерухомої основи;  $M_1$  – активний момент двигуна  $D_1$ ;  $M_2$  – активний момент двигуна  $D_2$ ;  $M_{2r}$  – реактивний момент двигуна  $D_2$ ,  $M_0$  – момент навантаження. Активний та реактивний обертальні моменти двигуна  $D_2$  у статичних та динамічних режимах мають однакову величину, але протилежне спрямування, тобто  $M_2 = -M_{2r}$ .

Електропривод працює наступним чином. Електромагнітний момент  $M_1$ , створюваний двигуном  $D_1$  першого електроприводу, прикладається до ротора 2, на якому встановлений статор двигуна  $D_2$  другого електроприводу, а через останній – до РО, компенсуючи статичні та динамічні моменти, що діють на нього. Згідно з

© Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І., 2018

\* ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0602-1112>

принципом роботи двоканальної системи автоматичного керування [3] двигун другого електроприводу створює додатковий електромагнітний момент  $M_2$ , який безпосередньо прикладається до РО і компенсує похибку першого електроприводу.

Для встановлення співвідношень швидкостей та моментів дводвигунного електроприводу здійснимо поелементне складання рівнянь динаміки для кожної з ланок, яка має ступінь вільності. Даний механізм втрачає рухомість при накладанні двох жорстких зв'язків, тобто має два ступеня вільності. Перша ланка, яка відповідає першому ступеню вільності, включає ротор 2 двигуна  $D_1$  з встановленим на ньому статором 3 двигуна  $D_2$ . Ланка другого ступеня вільності включає ротор 4 двигуна  $D_2$ , який жорстко зв'язаний з РО 5.

Рівняння динаміки, що описують рух першої та другої ланок диференціала,

$$M_1 - M_{2r} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \quad (1)$$

$$M_2 - M_0 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (2)$$

де  $J_1$  – сумарний момент інерції ротора 2 та статора 3;  $J_2$  – сумарний момент інерції ротора 4 та РО 5;  $\omega_2$  – швидкість ротора двигуна  $D_2$  відносно власного статора.

Переходячи до зображень, отримуємо рівняння для відносних швидкостей електродвигунів  $D_1$  та  $D_2$ ,  $\omega_1$  та  $\omega_2$  відповідно

$$\omega_1 = (M_1 - M_{2r}) \frac{1}{J_1 p}; \quad (3)$$

$$\omega_2 = (M_2 - M_0) \frac{1}{J_2 p}. \quad (4)$$

Швидкість РО  $\omega$  визначається алгебраїчною сумою швидкостей двигунів  $D_1$  та  $D_2$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2. \quad (5)$$

Для проведення досліджень двоканального електроприводу було обрано тихохідні асинхронні двигуни з наступними параметрами: кількість полюсів  $2p_D = 20$ , синхронна швидкість  $\omega_0 = 31,4$  1/с, номінальна частота напруги живлення  $f_{1H} = 50$  Гц, номінальний момент на валу  $M_H = 16$  Нм, сумарний момент інерції на валу двигуна  $D_1 - J_1 = 7,3$  кг·м<sup>2</sup>, сумарний момент інерції на валу двигуна  $D_2 - J_2 = 7,3$  кг·м<sup>2</sup>, жорсткість механічних характеристик двигунів  $\beta_1 = \beta_2 = 1,5$  Нм·с, електромагнітна стала часу  $T_{E1} = T_{E2} = 0,0096$  с.

На рис. 2 показано структурну схему такого ЕП, де прийнято наступні позначення:  $K_{f1} = K_{f2}$  – коефіцієнти передачі перетворювачів частоти;  $T_\mu = 0,01$  с – некомпенсована стала часу перетворювачів;  $f_1, f_2$  – вихідні частоти перетворювачів,  $p_{p1}, p_{p2}$  – кількості пар полюсів електродвигунів,  $\omega_{01}, \omega_{02}$  – швидкості холостого ходу,  $\beta_1, \beta_2$  – модулі жорсткості механічних характеристик,  $T_{E1}, T_{E2}$  – електромагнітні сталі часу двигунів  $D_1$  та  $D_2$  відповідно;  $K_{\omega 1} = K_{\omega}$  – коефіцієнти зворотного зв'язку за швидкістю для каналів грубого та точного відліку відповідно;  $U_{r\omega}$  – напруга задання швидкості,  $U_{\omega 1}, U_{\omega}$  – напруги зворотних зв'язків основного та допоміжного каналів.

Зі структурної схеми видно, що електроприводи є взаємозв'язаними через природні перехресні зв'язки за швидкістю  $\omega_1$  та моментом  $M_{2r}$ .

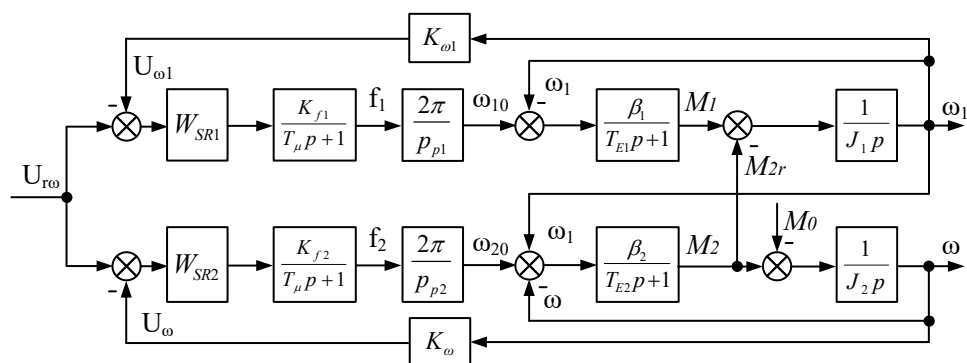


Рис. 2

З метою оцінки показників якості регулювання електроприводу були синтезовані ПІД-регулятори швидкості  $W_{SR1}, W_{SR2}$  для першого та другого каналів відповідно з наступними передатними функціями:

$$W_{SR1,2}(p) = \frac{T_M T_E p}{T_U} + \frac{T_M}{T_U p} + \frac{1}{T_U}, \quad (6)$$

де  $T_M = J/\beta$ ;  $T_U = a K_\omega K_f T_\mu 2\pi/p_p$ ;  $a=2$  – коефіцієнт демпфування контуру швидкості.

На рис. 3, а показано графіки зміни швидкостей при лінійному наростанні задання швидкостей, що відповідає рівноприскореному руху, з подальшим прикладенням навантаження  $M_0 = 8$  Нм на третій секунді, яке не спричинило насичення регуляторів швидкості, з наступним прикладенням навантаження  $M_0 = 16$  Нм на п'ятій секунді, яке призвело до насичення регуляторів. На рис. 3, б показано відповідні графіки перехідних процесів зміни моментів електродвигунів.

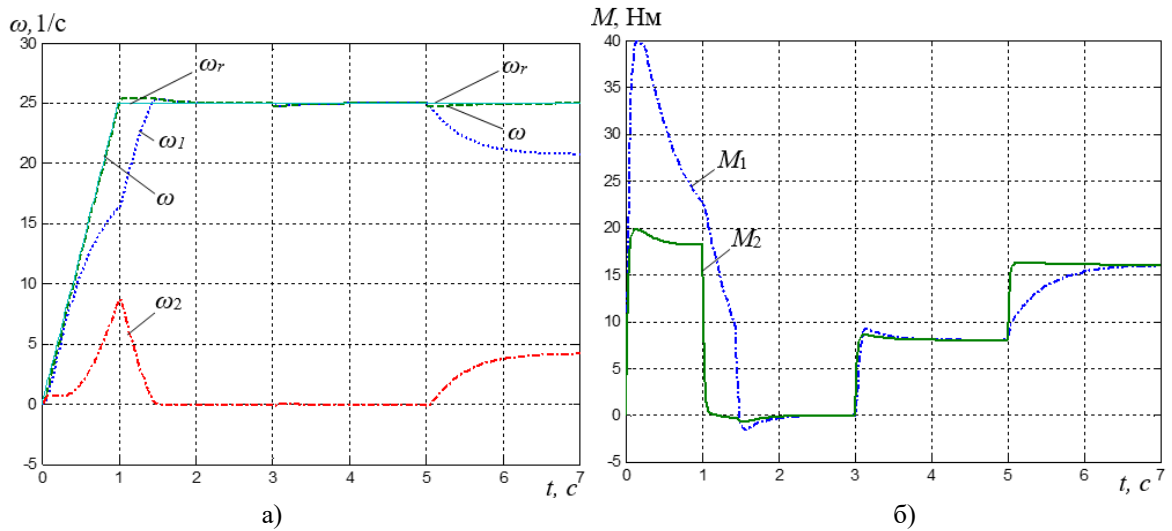


Рис. 3

Аналіз результатів дослідження перехідних процесів свідчить про те, що завдяки підвищенню порядку астатизму у двоканальній системі усувається усталена похибка при відпрацюванні лінійно-наростаючого задання швидкості. Важливим також є те, що, незважаючи на перехід регуляторів у насичення, двоканальна система продовжує стабілізацію швидкості об'єкта керування за рахунок компенсуючої дії допоміжного каналу регулювання.

На рис. 4, а, б представлено графіки перехідних процесів швидкостей та моментів при різноспрямованому русі електродвигунів, які підтверджують можливість отримання низької стабільної швидкості руху виконуючого органу за рахунок зміни співвідношення швидкостей електродвигунів, а також наявність стабілізації швидкості об'єкта керування двоканальною системою навіть при насиченому стані регуляторів.

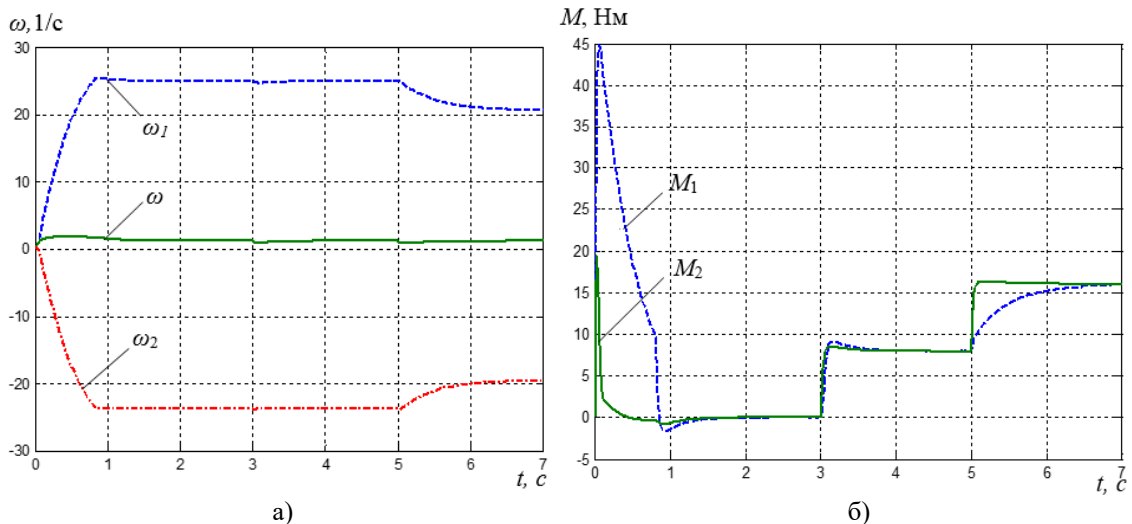


Рис. 4

Перспектива подальших досліджень полягає в аналізі найбільш прийнятних способів керування локальними електроприводами, проведенні структурно-параметричного синтезу двоканальної САУ з урахуванням природних перехресних зв'язків, а також у вивченні особливостей роботи двоканального електроприводу в умовах низьких швидкостей та обмежень регульованих координат.

**Висновки.** Встановлено співвідношення швидкостей та моментів дводвигунного електроприводу з безредукторним електромеханічним диференціалом у замкненій двоканальній системі регулювання швидкості, яка враховує перехресні зв'язки між його електроприводами.

Проведені дослідження свідчать про те, що двоканальна система автоматичного керування у сполученні з безредукторним електромеханічним диференціалом дає якісно нові властивості електроприводу, які полягають у збільшенні сумарного діапазону регулювання швидкості, підвищенні точності у статичних та динамічних режимах, зниженні чутливості до обмежень амплітуди керуючих сигналів. Використання безредукторного диференціала дає змогу здійснення реверсу електроприводу без реверсування електродвигунів, що дає змогу уникнути перехідних процесів, пов'язаних із впливом люфтів, пружностей та сухого тертя, які мають місце у механічних передачах при зміні напрямку руху.

1. Теряев В.І., Стяжкін В.П., Гаврилюк С.І. Двоканальний регульований електропривод. Патент України № 124134, 2017.
2. Чемоданов Б.К. Следящие приводы. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 903 с.
3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.
4. Клепиков В.Б., Худяев А.А., Поленок В.В. Итерационный двухканальный электропривод подачи для прецизионных станков и механизмов. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 26-35.
5. Xiao J.R., Pan J.F. Position tracking control of two permanent magnet linear synchronous motors. International Conference on Power Electronics Systems and Applications – Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA). 2017. Hong Kong, China. December 12-14, 2017. Pp. 1-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PESA.2017.8277729>.

### СООТНОШЕНИЯ СКОРОСТЕЙ И МОМЕНТОВ В ДВУХДВИГАТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ

**В.П. Стяжкін<sup>1</sup>**, канд.техн.наук, **В.И. Теряев<sup>2</sup>**, канд.техн.наук, **С.И. Гаврилюк<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net)

<sup>2</sup> – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сикорського»,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03056, Україна,

e-mail: [kpivit@gmail.com](mailto:kpivit@gmail.com)

Установлено співвідношення швидкостей і моментів в двохдвигательному електроприводі з безредукторним електромеханічним диференціалом в замкнутій двоканальній системі регулювання швидкості. Исследованы статические и динамические режимы работы этой системы с учетом установленных соотношений. Библ. 5, рис. 4.

**Ключевые слова:** двухдвигательный электропривод, безредукторный электромеханический дифференциал, математическая модель, двухканальная система управления.

### SPEEDS AND TORQUES RELATIONS OF THE TWO-MOTOR ELECTRIC DRIVE WITH GEARLESS ELECTROMECHANICAL DIFFERENTIAL

**V.P. Styazhkin<sup>1</sup>**, **V.I. Teriaiev<sup>2</sup>**, **S.I. Gavryluk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net)

<sup>2</sup> – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute",

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: [kpivit@gmail.com](mailto:kpivit@gmail.com)

The speeds and torques relationship of two-motor electric drive with a gearless electromechanical differential in a closed two-channel speed control system is established. The static and dynamic modes of operation of the system are considered. References 5, figures 4.

**Key words:** two-motor electric drive, gearless electromechanical differential, mathematical model, two-channel control system.

1. Teriaiev V.I., Styazhkin V.P., Gavryluk S.I. The two-channel adjustable electric drive. Patent UA No 124134, 2017. (Ukr)
2. Chemodanov B.K. Servo drive in three volumes. Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Bauman, 1999. 903 p. (Rus)
3. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskij G.G. Control of electric drives. Leningrad: Energoizdat, 1982. 392 p. (Rus)
4. Klepikov V.B., Khudiaiev A.A., Polenok V.V. Iterative two-channel servodrive of feed high precision machine tools and mechanisms. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 5. Pp. 26-35. (Ukr)
5. Xiao J.R., Pan J.F. Position tracking control of two permanent magnet linear synchronous motors. International Conference on Power Electronics Systems and Applications – Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA). 2017. Hong Kong, China. December 12-14, 2017. Pp. 1-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PESA.2017.8277729>.

Надійшла 02.03.2018  
Остаточний варіант 11.05.2018