

УДК 681.5:62-83

**ПРИНЦИПИ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДВОКАНАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ****В. І. Теряєв**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: kpivit@gmail.com

Метою роботи є розвиток теорії й практики двоканальних електромеханічних систем на основі використання методів теорії автоматичного керування, математичного моделювання, теоретичної механіки. Перевагою двоканальних систем є можливість підвищення статичної та динамічної точності без використання традиційних засобів – підвищення коефіцієнту передачі та порядку астатизму. Особливість реалізації та роботи двоканальних систем полягає у необхідності наявності пристрою підсумовування вихідних координат локальних каналів та нерівномірному розподілі їх навантажень. У роботі наведено приклади технічної реалізації передаточних пристроїв двоканальних електроприводів із поступальним та обертальним переміщенням виконуючого органу, отримано математичну модель диференціального передаточного пристрою, яка враховує наявність крутильної пружності валів двигунів, проведено порівняльні дослідження одноканальних та двоканальних електромеханічних систем з урахуванням природних перехресних зв'язків між каналами, що виникають при використанні диференціальних механічних передач, надано методичку аналітичної оцінки співвідношень моментів двигунів каналів грубого й точного відліку двоканальної системи.

**Ключові слова:** система, електромеханічна, двоканальна, передаточний, диференціальний, пристрій, пружність, модель, розподіл, навантаження.

**ПРИНЦИПЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУХКАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****В. И. Теряев**Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: kpivit@gmail.com

Целью работы является развитие теории и практики двухканальных электромеханических систем на основе использования методов теории автоматического управления, математического моделирования, теоретической механики. Преимуществом двухканальных систем является возможность повышения статической и динамической точности без использования традиционных средств – повышения коэффициента передачи и порядка астатизма. Особенность реализации и работы двухканальных систем заключается в необходимости наличия устройства суммирования выходных координат локальных каналов и неравномерном распределении их нагрузок. В работе приведены примеры технической реализации передаточных устройств двухканальных электроприводов с поступательным и вращательным перемещением исполнительного органа, получена математическая модель дифференциального передаточного устройства, учитывающая наличие крутильной упругости валов двигателей, проведены сравнительные исследования одноканальных и двухканальных электромеханических систем с учетом естественных перекрестных связей между каналами, возникающих при использовании дифференциальных механических передач, представлена методика аналитической оценки соотношений моментов двигателей каналов грубого и точного отсчета двухканальной системы.

**Ключевые слова:** система, электромеханическая, двухканальная, передаточное, дифференциальное, устройство, упругость, модель, распределение, нагрузки.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Важливу проблему при розробці систем автоматичного управління (САУ) різного технологічного призначення, особливо слідкуючих систем, є підвищення точності відпрацювання керуючої дії. Одним із перспективних способів підвищення точності може бути застосування так званого принципу двоканальності [1–3]. Для реалізації даного принципу необхідна наявність пристрою підсумовування вихідних координат локальних каналів [4–8]. У двоканальних електромеханічних системах такими пристроями є спеціальні механічні передачі, які здійснюють підсумовування лінійних або кутових переміщень виконавчих органів (ВО).

Метою даного дослідження є розгляд особливостей технічної реалізації та математичного моделювання двоканальних електромеханічних систем, а також розробка методички аналітичного оцінювання розподілу навантажень між каналами грубого й точного відліку у двоканальних системах.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

Приклади технічної реалізації двоканальних електромеханічних систем зображено на рис. 1, де а) – електропривод подачі металорізального верстака з поступальним рухом переміщення виконавчих органів; б) – електропривод платформи радіотелескопа з обертальним рухом переміщення виконавчих органів у горизонтальній площині.

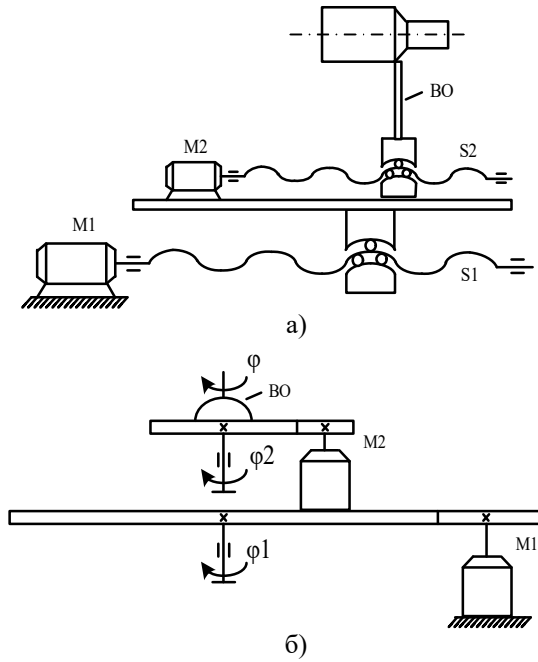


Рисунок 1 – Приклади технічної реалізації двоканальних електромеханічних САУ

Для побудови двоканальних слідкуючих електроприводів використовуються також диференціальні механічні передачі. На рис. 2 зображено кінематичну схему передаточного пристрою диференціального типу, яка використовується для маніпуляторів із кутовим рухом переміщення ВО.

На рис. 1 введено позначення: M1, M2 – електродвигуни каналів грубого (I) та точного (II) відліку;  $J_{d1}, J_{d2}, M_{d1}, M_{d2}, \omega_{d1}, \omega_{d2}$  – моменти інерції, обертальні моменти й кутові швидкості роторів двигунів відносно статорів;  $i_1, i_2$  – передаточні числа від двигунів M1 та M2 до зубчастого вінця;  $J_k, \omega_k$  – момент інерції й кутова швидкість зубчастого вінця (коліса);  $J_b, \omega_b, \phi_b$  – момент інерції, швидкість і кут повороту барабана (ВО);  $M_c$  – момент опору руху;  $M_{y1}, M_{y2}, c_1, c_2$  – пружні моменти й коефіцієнти жорсткості валів двигунів;  $\omega_1, \omega_2$  – кутові швидкості зубчастих коліс, закріплених на валах двигунів M1 і M2 відповідно.

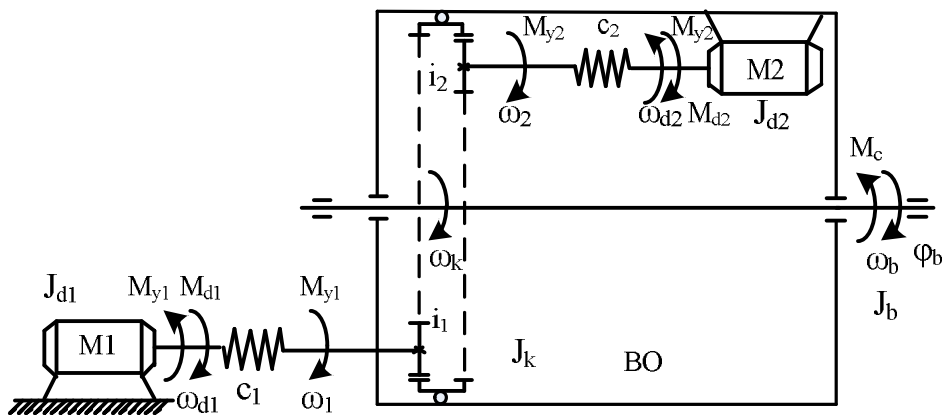


Рисунок 2 – Диференціальний передаточний пристрій

Існуючі математичні моделі таких передач [2] не враховують наявності пружності в кінематичному ланцюзі.

Розглянемо методологію отримання математичної моделі диференціального передаточного пристрою, яка враховує наявність крутильної пружності валів двигунів, що мають найменшу механічну жорсткість у кінематичному ланцюзі. Як видно з рис. 2, при наявності пружностей дана передача, згідно з принципом Вілліса, володіє чотирма ступенями вільності.

Для отримання рівнянь динаміки диференціального передаточного пристрою складемо рівняння Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \omega_{d1}} \right) = J_{d1} \frac{d\omega_{d1}}{dt}; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \omega_k} \right) = J_k \frac{d\omega_k}{dt};$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \omega_{d2}} \right) = J_{d2} \frac{d\omega_{d2}}{dt}; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \omega_b} \right) = J_b \frac{d\omega_b}{dt};$$

де  $W_k$  – кінетична енергія елементів кінематичного ланцюга.

Визначивши часткові похідні від кінетичної енергії кінематичних ланок і продиференціювавши їх за часом, отримуємо математичну модель механічної частини двоканальної системи з диференціальною передачею:

$$J_{d1} p \omega_{d1} = M_{d1} - \frac{c_1}{p} (\omega_{d1} - \omega_k i_1);$$

$$J_k p \omega_k = \frac{c_1}{p} (\omega_{d1} - \omega_k i_1) i_1 + \frac{c_2}{p} (\omega_{d2} - (\omega_b - \omega_k) i_2) i_2;$$

$$J_{d2} p \omega_{d2} = M_{d2} - \frac{c_2}{p} (\omega_{d2} - (\omega_b - \omega_k) i_2);$$

$$J_b p \omega_b = \frac{c_2}{p} (\omega_{d2} - (\omega_b - \omega_k) i_2) i_2 - M_c.$$

Структурну схему диференціального передавального пристрою, складену відповідно до цих рівнянь, надано на рис. 3.

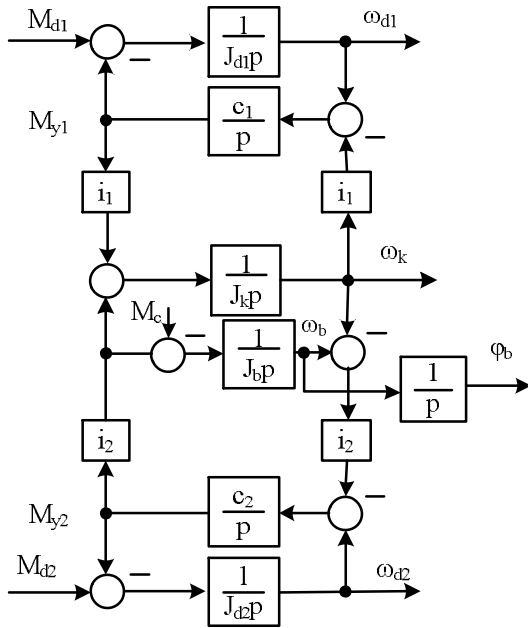


Рисунок 3 – Структурна схема диференціальної механічної передачі

Отримана структурна схема дозволяє здійснювати моделювання та синтез двоканальних слідкуючих електромеханічних систем підвищеної точності. Як видно з рівнянь динаміки та структурної схеми, особливисті диференціальних механічних передач є наявність природних перехресних зв'язків між вихідними координатами. Нижче буде показано, що ці перехресні зв'язки негативно впливають на динамічні показники якості регулювання.

Принцип роботи двоканальної слідкуючої САУ ілюструється структурною схемою (рис. 4). На два канали, позначені цифрами I та II, подається загальна керуюча дія  $U_3$ . Канал I замкнений по власній вихідній координаті – куту  $\varphi_1$ . Канал II замкнений по вихідній координаті всієї системи – куту  $\varphi$ , що є сумою кутів  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ .

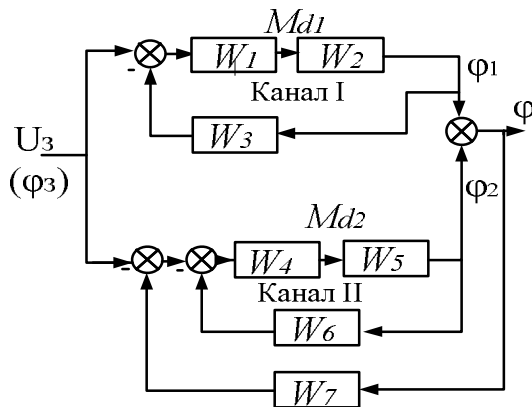


Рисунок 4 – Структурна схема двоканальної системи автоматичного управління

На рис. 4 позначено передатні функції:  $W_1, W_4$  – регуляторів I та II каналу;  $W_2, W_5$  – об'єктів керування I та II каналу;  $W_3, W_6$  – зворотних зв'язків за положенням I та II каналу;  $W_7$  – головного зворотного зв'язку за положенням;  $M_{d1}, M_{d2}$  – обертальні моменти двигунів I та II каналу.

З рис. 4 видно, що на вході каналу II діє сигнал  $\Delta\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi = \varphi_3 - \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_1 - \varphi_2$ . Отже, якби другий канал мав абсолютну швидкодію й похибка  $\Delta\varphi_2$  дорівнювала нулю, то вихідна координата II каналу  $\varphi_2$  дорівнювала б похибці першого каналу  $\Delta\varphi_1$  й істинне значення вихідної координати  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi_1 = \varphi_1 + \varphi_3 - \varphi_1 = \varphi_3$  точно дорівнювалось б приписаному  $\varphi_3$ . Оскільки створення безінерційного силового каналу неможливо, похибка відтворення буде існувати [2].

Надамо передаточну функцію еквівалентної розімкнутої двоканальної системи в загальному вигляді:

$$W_E(p) = \frac{D_E}{p^{v_E}} W_{E0}(p),$$

де  $D_E, v_E$  – добротність та порядок астатизму еквівалентної системи;  $W_{E0}$  – передатна функція, поліноми чисельника й знаменника якої не мають нульових коренів, тобто  $W_{E0}|_{p=0} = 1$ . Якщо позначити  $D_1$  і  $D_2$  – добротності першого й другого каналів,  $v_1$  і  $v_2$  – їх порядок астатизму, то  $v_E = v_1 + v_2, D_E = D_1 D_2$ , тобто у двоканальних приводах порядки астатизму каналів складаються, а їх добротності перемножуються [2]. Це свідчить про збільшення точності двоканальної системи без підвищення коефіцієнту передачі розімкнутої системи або її порядку астатизму з використанням додаткових інтегральних ланок.

Для демонстрації викладеного розглянемо результати моделювання динамічних режимів двоканальної САУ.

Як приклад проведено порівняльне моделювання динамічних режимів одноканальної, класичної двоканальної системи та двоканальної системи з перехресними зв'язками, побудованої з використанням механічного диференціалу. Як базова модель для обох каналів була використана система підпорядкованого регулювання координат двигуна постійного струму з контурами струму й швидкості при налаштуванні на модульний оптимум. Параметри ланок структурної схеми розраховано за даними двигуна грубого каналу двоканальної системи.

На першому етапі надано порівняльне дослідження динамічних режимів одноканальної системи, замкненої за положенням і спрощеної двоканальної системи без урахування перехресних зв'язків.

Графіки перехідних процесів відпрацювання ступінчастої та лінійної задаючої дії в одноканальній та двоканальній системі надано на рис. 5 та рис. 6 відповідно.

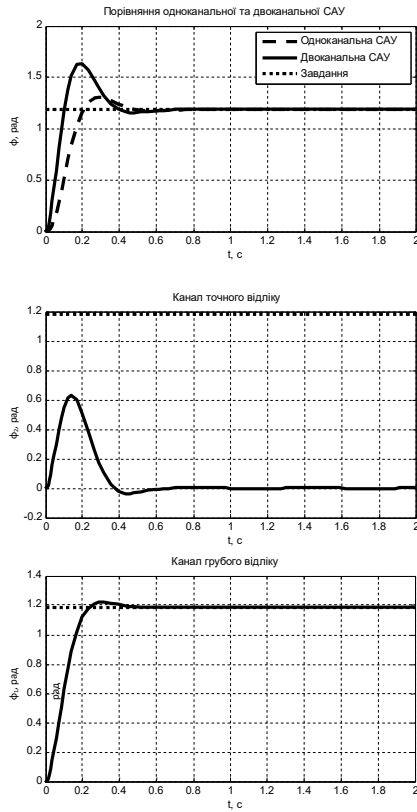


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів відпрацювання ступінчастої задаючої дії

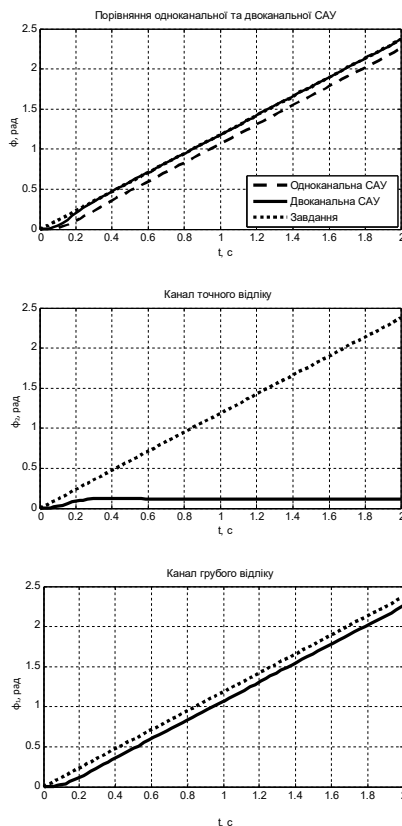


Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів відпрацювання лінійної задаючої дії

Результати моделювання одно- та двоканальної систем (рис. 5, 6) підтверджують [1–4], що використання двоканальної системи дає кращі показники якості регулювання для всіх видів задаючих дій. Особливо показово це видно на прикладі відпрацювання лінійної задаючої дії – у двоканальній системі кінематична похибка відсутня.

Дослідження перехідних процесів у двоканальній системі автоматичного управління без природних перехресних зв'язків та з їх урахуванням при відпрацюванні типових задаючих дій – ступінчастої, лінійної, параболічної та гармонічної – зображено на рис. 7–10.

Порівняльний аналіз перехідних процесів для спрощеної двоканальної системи й двоканальної системи з перехресними зв'язками вказує на те, що перехресні зв'язки погіршують якість перехідних процесів при всіх видах задаючих дій. Радикальним способом усунення впливу цих перехресних зв'язків є їх компенсація штучними перехресними зв'язками, що стає можливим завдяки отриманій уточненій математичній моделі диференціального передаточного пристрою.

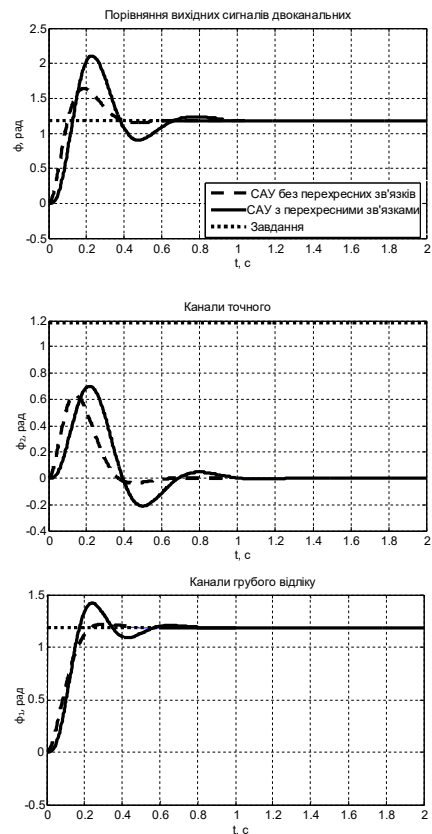


Рисунок 7 – Графіки перехідних процесів відпрацювання ступінчастої задаючої дії

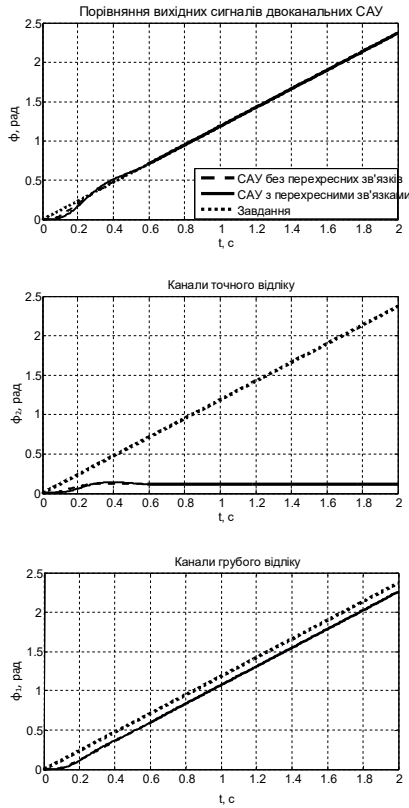


Рисунок 8 – Графіки перехідних процесів відпрацювання лінійно наростаючої задаючої дії

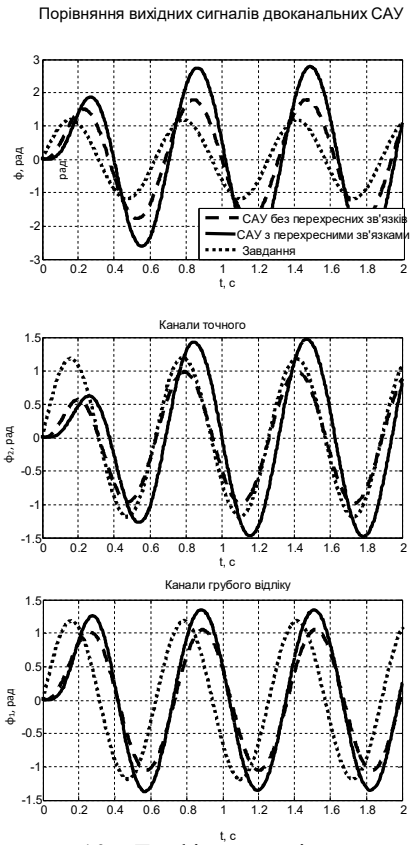


Рисунок 10 – Графіки перехідних процесів відпрацювання гармонічної задаючої дії

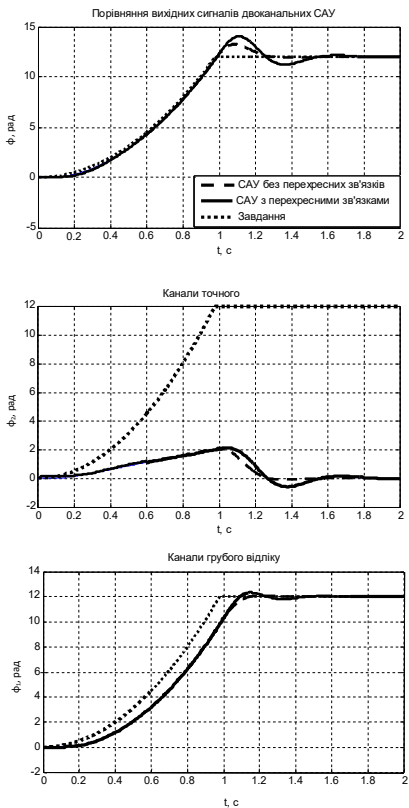


Рисунок 9 – Графіки перехідних процесів відпрацювання параболічної задаючої дії

Розглянемо методику аналітичної оцінки співвідношення моментів двигунів каналів грубого й точного відліку у двоканальній електромеханічній системі [3, 10]. Із цією метою здійснимо перетворення вихідної структурної схеми двоканальної системи (рис. 4) таким чином, щоб вихідними координатами I та II каналів були обертальні моменти двигунів  $M_{d1}$  та  $M_{d2}$ . Етапи перетворення структурної схеми (рис. 4) з метою знаходження передаточних функцій по моменту  $W_{M1}$  та  $W_{M2}$  зображено на рис. 11,а-г.

Частково перетворена структурна схема, надана на рис. 11,а, пояснює джерело підвищення точності багатоканальної САК – наявність прямого зв'язку по задаючій дії  $W_{1-3}$ , аналогічного застосовуваному в системах із комбінованим керуванням [9].

Оскільки задаюча дія є загальною для обох каналів, відношення обертаючих моментів двигунів може бути виражене у вигляді

$$\frac{M_{d2}(p)}{M_{d1}(p)} = \frac{U_3(p)W_{M2}(p)}{U_3(p)W_{M1}(p)} = \frac{W_{M2}(p)}{W_{M1}(p)}$$

Введемо додаткові позначення передаточних функцій

$$W_{1-3} = \frac{W_1W_2}{1+W_1W_2W_3}; W_8 = \frac{W_{1-3}(1+W_4W_5W_6)}{W_4W_5}; W_9 = 1+W_8;$$

$$W_{10} = \frac{W_7}{W_9}; W_{11} = \frac{W_6}{W_9} + W_{10}$$

З урахуванням прийнятих позначень, вирази передаточних функцій для моментів мають вигляд:

$$W_{M1} = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2 W_3}; \quad W_{M2} = \frac{W_9 W_4}{1 + W_9 W_4 W_5 W_{11}}$$

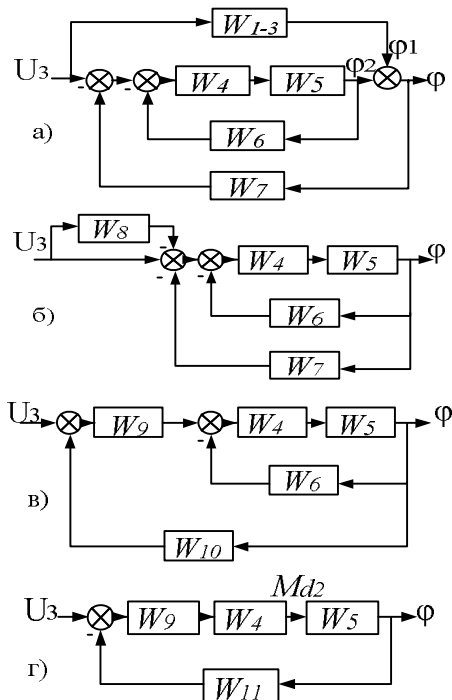


Рисунок 11 – Перетворення структурної схеми двоканальної САУ

З метою отримання кількісної оцінки співвідношення моментів  $M_{d2}/M_{d1}$ , як приклад проведено розрахунок АЧХ (рис. 12) для двоканального слідкуючого електроприводу, побудованого на основі двох високомоментних електродвигунів зі збудженням від постійних магнітів типу ПБВ 112L із диференціальним передаточним пристроєм (рис. 2) та наступними параметрами: номінальна потужність 1,1 кВт; номінальна швидкість 500 об/хв; сумарний приведений момент інерції 8,5 кг·м<sup>2</sup>; передаточне відношення механічних передач 12,5.

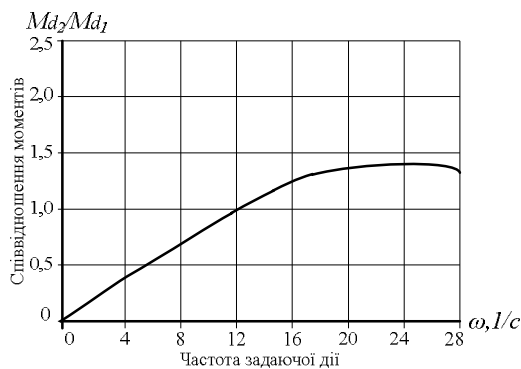


Рисунок 12 – АЧХ двоканальної системи

Отримані результати свідчать, що в імовірній області частот зміни задаючої дії 0–1 Гц співвідношення моментів електродвигунів лежить у діапазоні, що не перевищує значення 0,5.

**ВИСНОВКИ.** Розроблено математичну модель диференціального механічного передаточного пристрою з чотирма ступенями вільності, яка враховує наявність крутильної пружності валів двигунів. Це дозволяє проводити уточнене дослідження та синтез двоканальних слідкуючих електромеханічних систем із механічним диференціалом.

Показано, що природні перехресні зв'язки між регульованими координатами, властиві механічним передачам диференціального типу, негативно впливають на показники якості регулювання двоканальної системи в цілому. Надана методологія визначення такого роду перехресних зв'язків дозволяє здійснити їх компенсацію.

Запропоновано методику аналітичної оцінки співвідношень моментів двигунів каналів грубого й точного відліку двоканальної електромеханічної системи, що дозволяє здійснювати уточнений вибір двигунів та силового електрообладнання для конкретного виду й типу застосовуваної системи електропривода. При виборі виконавчих двигунів двоканального слідкуючого електропривода слід виходити з умови забезпечення статичних і динамічних режимів роботи електропривода в основному двигуноному каналу грубого відліку. Момент двигуна точного каналу для більшості типових застосувань лежить у межах 0,1–0,5 моменту основного двигуна, що дає можливість реалізувати канал точного відліку на основі прецизійного електроприводу і тим самим забезпечити підвищену точність роботи всієї двоканальної системи.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Следящие приводы / Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2003. – 878 с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
3. Теряев В.І. Особливості технічної реалізації двоканальних електромеханічних систем // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Зб. наук. праць XVII Міжнародної наук.-техн. конф., м. Кременчук, 17–19 травня 2016 р. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 1/2016 (4). – С. 113–115.
4. Теряев В.І., Попович Є.М. Технічна реалізація двоканальної системи керування курсом судна // Міжнар. наук.-техн. журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – К., 2015. – С. 348–351. – Режим доступу: <http://jour.fea.kpi.ua/issue/view/4106>
5. Кузнецов Б.И., Богаенко И.Н. и др. Многоканальные итерационные системы управления. – К.: НПК "КІА", 1998. – 244 с.

6. Худяев А.А., Кунченко Т.Ю. Высокооточная квазиитерационная двухканальная электромеханическая система с механическим дифференциалом // Техническая электродинамика. – К., 2015. – Вып. 1. – С. 21–28.

7. Худяев А.А., Пшеничников Д.А. Обзор систем управления и исполнительных устройств электроприводов повышенной точности, построенных по итерационному принципу // Вестник Национального технического университета "ХПИ": сб. науч. тр. «Проблемы автоматизированного электропривода». – Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. – Вып. 36 (1009). – С. 177–180.

8. Никольский А.А. Новые высокооточные электроприводы с пьезокомпенсаторами для станков,

механизмов и приборов // Электротехника. – 1993. – Вып. 1. – С. 27–31.

9. Кобяков А.Н., Ляпа Н.Н. Двухканальные следящие системы как разновидность комбинированных систем // Вісник Сумського державного університету. – 1999. – Вып. 1 (12). – С. 96–99.

10. Теряев В.И., Манько В.В. Математическая модель двухканального следящего электропривода с механическим дифференциалом // Доповіді Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики. – К.: Політехніка, 2011. – С. 342–343.

## FEATURES OF TECHNICAL REALIZATION TWO-CHANNEL ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

### V. Teriaiev

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: kpivit@gmail.com

**Purpose.** Aim of the article is the development of the theory and practice of two-channel electromechanical systems based on automatic control theory methods, mathematical modeling and theoretical mechanics. The advantage of the two-channel system is the possibility of increasing the static and dynamic accuracy without the use of traditional means - increasing the transfer coefficient or order of astatism. **Methodology.** Feature of realization and implementation of two-channel systems consists in the necessity of presence the local channels output coordinate summation device and the uneven distribution of their loads. **Results.** In the paper gives examples of technical realization of transmission devices for two-channel drives with translational and rotational movement of the executive device, received mathematical model of the differential transmission unit, taking into account the presence of torsional elastic shaft of engines, comparative studies of single-channel and two-channel electro-mechanical systems, taking into account the natural cross-links between the channels arising from the use of mechanical differential gear, provides a methodology of analytical assessment ratios moments engines channels rough and fine reference two-channel.

**Key words:** system, electromechanical, dual-channel, transfer device, realization, distribution, load, channels.

### REFERENCES

1. Chemodanov, B.K. (2003), *Sledyaschie privody* [Servo drives], Izdatelstvo MGTU imeni Baumana, Moscow. (in Russian)

2. Basharin, A.V., Novikov, V.A. and Sokolovskiy, G.G. (1982), *Upravlenie elektroprivodami* [Electric drive control], Energoizdat, Leningrad. (in Russian)

3. Teriaiev, V.I. (2016), "Features of technical realization dual-channel electromechanical systems", *Problemi energoresursozberezhennya v elektrotehnichnih sistemah. Zbirnik naukovih prats XVII Mizhnarodnoyi nauk.-tehn. konf.* [Problems of energy saving in electrical systems. Proceedings of the XVII International Scientific Conference], Kremenchuk, 17–19 May 2016, pp. 113–115. (in Ukrainian)

4. Teriaiev, V.I. and Popovich, E.M. (2015), "Technical realization of dual channel course control system of the vessel", *Mizhnarodnyy nauk.-tekhn. zhurnal "Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky"*, pp. 348–351, available at: <http://jour.fea.kpi.ua/issue/view/4106>. (in Ukrainian)

5. Kuznetsov, B.I., Bogaenko, I.N. et al. (1998), *Mnogokanalnye iteracionnye sistemy upravleniya* [Multichannel iterative control systems], NPK "KIA", Kiev. (in Russian)

6. Hudyayev, A.A. and Kunchenko, T.Y. (2015), "Precision quasi iterative two-channel electro-mechanical system with mechanical differential", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 1, pp. 21–28. (in Russian)

7. Hudyayev, A.A. (2013), "Overview of control systems and actuators drives of higher accuracy, built on the iterative principle", *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI", sbornik nauchnykh trudov «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda»*, Vol. 36, no. 1009, pp. 177–180. (in Russian)

8. Nikolskiy, A.A. (1993), "New high-precision electric drives with piezocompensators for machine tools, machinery and equipment", *Elektrotehnika*, no. 1. pp. 27–31. (in Russian)

9. Kobayakov, A.N. and Lyapa, N.N. (1999), "Two-channel tracking systems as a kind of combined systems", *Visnyk Sumskoho derzhavnoho universytetu*, Vol. 1, no. 12, pp. 96–99. (in Russian)

10. Teriaiev, V.I. and Manko, V.V. (2011), "Mathematical model of two-channel servo electric drive with a mechanical differential", *Dopovidi Mizhnarodnoyi nauk.-tehn. konf. molodih uchenih, aspirantiv i studentiv "Suchasni problemy elektroenergotekhniki ta avtomatiki"*, pp. 342–343. (in Russian)

Стаття надійшла 11.09.2016.