

УДК 681.511.46

ЕНЕРГОФОРМУЮЧЕ КЕРУВАННЯ ДВОМАСОВОЮ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ У ГАМІЛЬТОНОВОМУ ПРЕДСТАВЛЕННІ

І. З. Щур, Ю. О. Білецький

Національний університет "Львівська політехніка"

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: i_shchur@meta.ua, shadovv00@gmail.com

Синтезовано системи енергоформуючого керування двомасовим електроприводом як гамільтоною системою з керованими входами/виходами без урахування інерційностей у електричному колі та з їх урахуванням (на прикладі синхронної машини з постійними магнітами). Приведено результати порівняльних комп'ютерних досліджень роботи синтезованої енергоформуючої системи керування при використанні різних параметрів налаштування з класичною системою модального регулювання. Дослідження проводились як при наявності люфту в механічних зачепленнях, так і без нього.

Ключові слова: енергетичні підходи, енергоформуюча система керування, двомасовий електропривод.

ЭНЕРГОФОРМИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В ГАМИЛЬТОНОВОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

И. З. Щур, Ю. О. Билецкий

Национальный университет "Львовская политехника"

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: i_shchur@meta.ua, shadovv00@gmail.com

Синтезированы системы энергоформирующего управления двухмассовым электроприводом как гамильтоновой системой с управляемыми входами/выходами без учёта инерционностей в электрической цепи и с их учётом (на примере синхронной машины с постоянными магнитами). Приведены результаты сравнительных компьютерных исследований работы синтезированной системы управления при использовании разных параметров настройки с классической системой модального регулирования. Исследования проводились как при наличии люфта в механических зацеплениях, так и без него.

Ключевые слова: энергетические подходы, энергоформирующая система управления, двухмассовый электропривод.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Більшість сучасних електромеханічних систем розглядаються як одно-масові, однак деколи особливості керування тим чи іншим об'єктом вимагають його надання як дво-, а то й тримасовою системою. Зростання кількості мас, відображених у системі, призводить до ускладнення системи автоматичного керування (САК) та виникнення значних проблем при розробленні самого алгоритму керування, особливо при наявності нелінійностей.

Для керування двомасовими електроприводами переважно використовують системи підпорядкованого та модального регулювання (СМР) [1, 2], а також системи інтелектуального керування [3]. Однак всі ці методи характеризуються високим рівнем складності та громіздкістю синтезу, потребують прийняття великої кількості допущень при синтезі та значного досвіду у налаштуванні. Серед них СМР відзначається чітким алгоритмом синтезу системи керування. Найбільш простий підхід полягає у спрощенні замкнутого струмового контуру з ПІ-регулятором струму до пропорційної ланки та синтезі СМР тільки для механічної частини електроприводу, яка описується відомою системою рівнянь [2]:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{c1} - b_1\omega_1 - c\Delta\phi - \beta(\omega_1 - \omega_2); \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = c\Delta\phi + \beta(\omega_1 - \omega_2) - M_{c2} - b_2\omega_2; \\ c \frac{d\Delta\phi}{dt} = c(\omega_1 - \omega_2), \end{cases} \quad (1)$$

де J_1, J_2 – відповідно моменти інерції двигуна та механізму; ω_1 і ω_2 – кутові швидкості двигуна і механізму; M – електромагнітний момент двигуна;

M_{c1}, M_{c2} – статичні моменти, що діють на сам двигун та привідний механізм відповідно; b_1, b_2 – коефіцієнти зовнішнього тертя двигуна і механізму; c – коефіцієнт жорсткості пружного зв'язку; $\Delta\phi$ – кут скручування; β – коефіцієнт внутрішнього тертя.

СМР реалізується наступним чином: на вході механічної частини системи до сигналу електромагнітного моменту двигуна (вихід струмового контуру) додаються сигнали зворотних зв'язків за кутовою швидкістю двигуна, за пружним моментом $M_{12} = c\Delta\phi + \beta(\omega_1 - \omega_2)$ та за кутовою швидкістю механізму з відповідними коефіцієнтами – $K_{\omega1}, K_{M12}$ та $K_{\omega2}$. Формули для розрахунку коефіцієнтів зворотних зв'язків наведено в [2].

Метою роботи є синтез системи керування двомасовим електроприводом як гамільтоною системою з керованими входами/виходами, дослідження дієвості параметрів САК і структури її регулятора загалом, порівняння синтезованої енергоформуючої САК і СМР.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Останнім часом для керування складними нелінійними об'єктами почали розробляти системи керування на основі енергетичних підходів [4]. Одними з таких є енергоформуючі системи керування, синтез яких полягає у розкладі системи на більш прості підсистеми, що певним чином пов'язані між собою, та пошуку таких додаткових взаємозв'язків і підсистем, щоб загальна енергія системи набула мінімуму у точці рівноваги [4]. Дана точка рівноваги є ціллю керування і визначається сигналом завдання.

З метою спрощення процедури синтезу об'єкт керування розглядається як гамільтонова система з керованими входами/виходами [4]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + G(x)u(t) \\ y(t) = G^{\circ}(x) \frac{\partial H}{\partial x} \end{cases}, \quad (2)$$

де $\mathbf{x}(t)$ – вектор стану; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$, $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ – матриці взаємозв'язків та демпфування відповідно; $H[\mathbf{x}]$ – функція повної енергії системи; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ – матриця портів; $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ – вектори вхідних та вихідних енергетичних змінних.

Відповідно до [5], синтез енергоформуєчої системи керування зводиться до вибору вигляду матриць системи керування та знаходження значень їх елементів шляхом вирішення наступного матричного рівняння:

$$[J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_a}{\partial x} = [J_a(x) - R_a(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + G(x)b(x), \quad (3)$$

де $\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ та $\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ – матриці взаємозв'язків та демпфування бажаної системи; $H_a[\mathbf{x}]$ – функція повної енергії системи керування; $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$, $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ – матриці взаємозв'язків та демпфування САК; $\mathbf{b}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}$ – вектор вхідних енергетичних змінних, який формується введенням зворотного зв'язку.

За даною методикою синтезовано систему енергоформуєчого керування двомасовим електроприводом (1) за процедурою, наведеною нижче.

Оскільки механічні сталі часу є значно більшими ніж електричні, то під час синтезу САК двомасовим електроприводом на першому етапі його електричною частиною знехтуємо. Тоді модель керованої системи складатиметься тільки з моделі механічної частини (1).

Для запису керованого об'єкта як гамільтонової системи з керованими входами/виходами потрібно задатись вектором стану \mathbf{x} . Виходячи з того, що вектор \mathbf{x} складається зі змінних, що характеризують стан системи і через які може бути визначена її внутрішня енергія, то він вибирається у вигляді енергетичних імпульсів, що пов'язані з інерційностями у системі:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \omega_1 \\ J_2 \omega_2 \\ c \Delta \varphi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Тоді решта матриць моделі механічної частини електроприводу (1), записаної як гамільтонова система з керованими входами/виходами (2), набудуть вигляду:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} M_{dv} - M_{c1} \\ -M_{c2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c \\ 0 & 0 & c \\ c & -c & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} b_1 + \beta & -\beta & 0 \\ -\beta & b_2 + \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а матриця $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ – одинична діагональна матриця.

Виходячи з вектора \mathbf{x} Гамільтоніан системи:

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{x} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{J_1} x_1^2 + \frac{1}{J_2} x_2^2 + \frac{1}{c} x_3^2 \right), \quad (7)$$

де $\mathbf{D} = \text{diag}[J_1 \quad J_2 \quad c]$ – діагональна матриця інерційностей.

Тоді, відповідно до [5], похідна повної енергії системи керування буде дорівнювати

$$\frac{\partial H_a}{\partial \mathbf{x}} = [\omega_{1,0} \quad \omega_{2,0} \quad \Delta \varphi_0]^T, \quad (8)$$

де $\omega_{1,0}$, $\omega_{2,0}$ – завдання кутових швидкостей двигуна і механізму відповідно; $\Delta \varphi_0$ – завдання кута скручування.

Вигляд матриць системи керування $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ і $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ доцільно вибирати схожими на матриці керованого об'єкта (5). Тоді задамо наступним виглядом матриць системи керування:

$$\mathbf{J}_a(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -B_{13} \\ 0 & 0 & -B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_a(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де B_{13} , B_{23} – взаємозв'язки системи керування, які потрібно знайти; A_{11} , A_{12} , A_{22} , і A_{33} – демпфуючі коефіцієнти системи керування.

Підставивши рівняння (4)–(9) у (3), одержимо систему з трьох рівнянь, записану у матричному вигляді. З другого та третього рівнянь цієї системи через коефіцієнти A_{12} , A_{22} , і A_{33} виражаються параметри B_{23} і B_{13} відповідно. Підставивши їх у перше рівняння, одержимо рівняння регулятора, що формує величину моменту, який повинен розвивати двигун:

$$M = M_{c1} + M_{c2} + b_1 \omega_{1,0} + b_2 \omega_{2,0} - A_{11}(\omega_1 - \omega_{1,0}) - 2A_{12}(\omega_2 - \omega_{2,0}) + \frac{-A_{22}(\omega_2 - \omega_{2,0})^2 - A_{33}(\Delta \varphi - \Delta \varphi_0)^2}{\omega_1 - \omega_{1,0}}. \quad (10)$$

У бажаній точці рівноваги системи кутові швидкості двигуна і механізму однакові – $\omega_{1,0} = \omega_{2,0}$, а кут скручування дорівнює:

$$\Delta \varphi_0 = \frac{M_{c2} + b_2 \omega_{2,0}}{c}. \quad (11)$$

Для побудови регулятора за виразами (10) та (11) в САК необхідно ввести спостерігач моменту статичного навантаження.

Синтезована система керування (10) забезпечує повне відпрацювання сигналу завдання на швидкість, є астатичною і забезпечує асимптотичну стійкість системи. Демпфуючі коефіцієнти у САК призначені для прискорення протікання перехідних процесів і визначаються при налагодженні. Задаючи певним коефіцієнтам нульові значення, можна змінювати структуру регулятора в напрямку спрощення.

Параметри дослідної керованої механічної частини були наступними: $J_1 = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2 = 3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $c = 20000 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $b_1 = 0,25 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $b_2 = 0,25 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $\beta = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$. Дана САК досліджувалась при різних структурах та налаштуваннях регулятора (10). Також було проведено порівняльні дослідження САК,

синтезованої на основі енергетичних підходів, та СМР [2]. Налаштування СМР, синтезованої за біноміальною перехідною функцією при $\omega_0 = 50 \text{ c}^{-1}$, були отримані наступними: $K_{\omega 1} = 2086$, $K_{M12} = 8,658$, $K_{\omega 2} = -1134$.

Результати порівняльних досліджень СМР та енергоформуючої САК зображено на рис. 1. Для останньої як найкращі отримано два наступних налаштування (перерегулювання встановлювалося на рівні $\delta\omega \approx 5 \%$):

- регулятор 1 – $A_{11} = 220$, $A_{12} = A_{22} = A_{33} = 0$;
- регулятор 2 – $A_{11} = 150$, $A_{12} = 43$, $A_{22} = A_{33} = 0$.

У початковий момент часу $\omega_1 = \omega_2 = 0 \text{ рад/с}$ сигнал завдання на кутову швидкість механізму $\omega_{2,0} = 5 \text{ рад/с}$, а моменти статичного навантаження – $M_{c1} = M_{c2} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$. При досягненні часу $t = 0,3 \text{ с}$ відбувається накидання моменту навантаження до $M_{c2} = 450 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

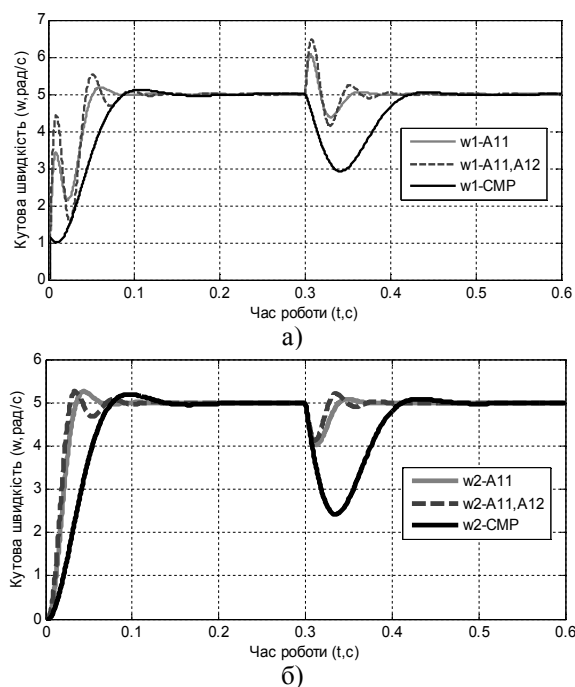


Рисунок 1 – Осцилограми кутової швидкості двигуна (а) і привідного механізму (б), керованих СМР та енергоформуючою системою керування

Виходячи з проведених досліджень, можна зробити наступні висновки: коефіцієнт A_{11} є найбільш дієвим і цілком самостійним коефіцієнтом, що дає змогу суттєво покращити роботу системи; коефіцієнти A_{12} і A_{22} дають змогу прискорити перехідний процес, однак призводять до виникнення коливань у системі; A_{33} – найменш дієвий коефіцієнт, а також важкий у реалізації, оскільки вимагає постійного спостереження за моментом, що прикладений до механізму. У залежності від поставленого завдання можна комбінувати використання різних коефіцієнтів.

Слід також зауважити, що системи енергоформуючого керування показують значно кращу порівняно з СМР реакцію як на зміну сигналу завдання, так і зміну навантаження (рис. 1).

Для перевірки роботи систем керування при суттєвій нелінійності керованого об'єкту додатково проводились дослідження, де було введено люфт величиною 5° (рис. 2).

Проведені дослідження показали наступне: коефіцієнт A_{11} забезпечує високу швидкодію системи та стійкість її роботи навіть при наявності люфту; A_{12} при роботі з люфтом призводить до виникнення значних коливань у системі і тому доцільно застосовувати тільки у поєднанні з A_{11} ; коефіцієнт A_{22} можна застосовувати тільки у від'ємних значеннях разом з додатним A_{11} ; стосовно A_{33} – то для даного випадку його наявність у системі керування призводить до некоректної роботи усієї системи.

З рис. 2 випливає, що порівняно з СМР енергоформуючі системи керування забезпечують значно краще протікання перехідних процесів при наявності у системі механічного люфту.

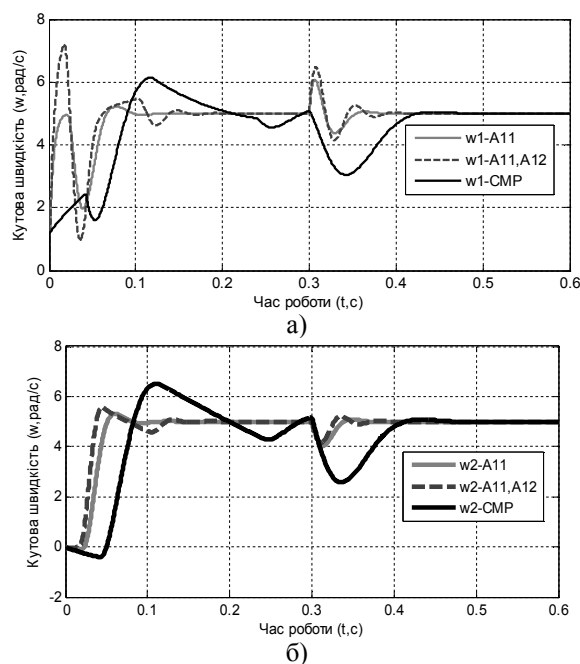


Рисунок 2 – Осцилограми кутової швидкості двигуна (а) і привідного механізму (б), керованих СМР та енергоформуючою системою керування при роботі за наявності люфту

З метою ще більш детального дослідження застосування енергетичних підходів до синтезу систем керування двомасовими електроприводами за даною методикою було синтезовано САК без використання спрощень (у моделі враховуються електричні кола) на прикладі двомасового електроприводу на базі синхронної машини з постійними магнітами (СМПМ).

Синтезована САК включає систему керування, отриману в [6], з доповненням її шляхом заміни третього рівняння у моделі САК СМПМ на рівняння (10). Роботу синтезованої системи проілюстровано на рис. 3.

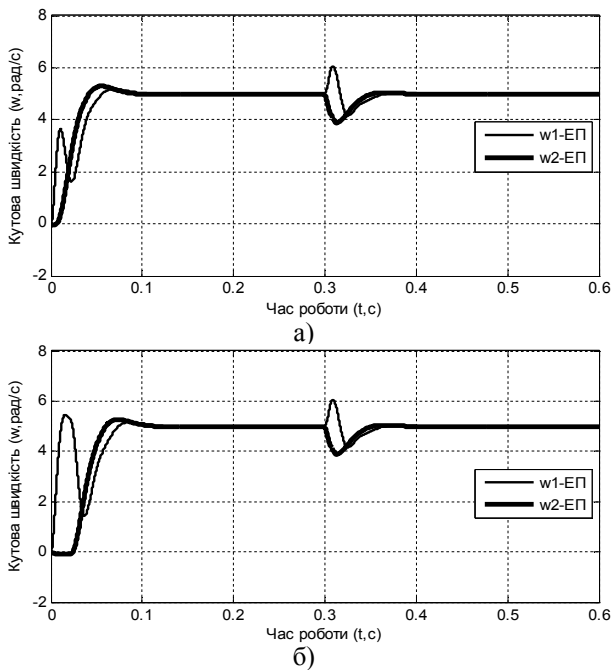


Рисунок 3 – Осцилограми кутових швидкостей двомасового електроприводу з енергоформуючою системою керування при роботі за наявності люфту (б) і без нього (а)

Дослідження проводились за наступних налаштувань САК: $k = -2,5$, $r_1 = 55$, $r_2 = 0,3$ та $A_{11} = 178$, де k , r_1 та r_2 – відповідно корегуючий коефіцієнт, що відображає компенсацію перехресних зв'язків у машині та коефіцієнти електричного демпфування.

Урахування електричного кола дає змогу частково покращити якість протікання перехідного процесу за рахунок уведення внутрішнього контуру регулювання, а також спрощує адаптацію системи

ENERGY-SHAPING CONTROL OF TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM

I. Schur, Y. Biletskyi

National University “Lviv Polytechnic”

vul. St. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: i_shchur@meta.ua, shadvv00@gmail.com

A novel energy-shaping control system of two-mass electric drive as port-controlled Hamiltonian system are created. First of them were made only for mechanical part of the drive (ignoring singularity of electric circuit), second – in synthesize procedure both electric (on PMSM example) and mechanical parts were considered. The results of comparative computer simulations of synthesized control system with different setting parameters and classical system of modal regulation are shown. Here are also the results of comparative researches, where the gap was included into mechanical part of the system. The achieved controllers were analyzed and conclusions were made.

Key words: energy approaches, energy-shaping control system, two-mass electrical drive.

REFERENCES

1. Akimov L., Kolotilo V., Markov V. *Dynamic of two-mass systems with untraditional speed regulators and status observers*: monogr. – Kharkiv, 2000. – 93 p. [in Russian]
2. Marushchak Y. *Dynamic of two-mass systems of mode stabilization in electric furnace*: monogr. – Lviv, 2011. – 224 p. [in Ukrainian]
3. Cirtea M.N., Dinu A., Khor J.G., McCormick. *Neural and Fuzzi Logig Control of Drives and Power Systems*. – Newnes, 2002. – 399 p.
4. Ortega R., van der Schaft A., Mareels I., Maschke B. Putting energy back in control // *IEEE Contr. Syst. Mag.* – 2001. – Iss. 21. – № 2. – PP. 18–33.
5. Zou. Z., Yu H., Tang Y. Maximum output power of PMSM based on energy-shaping and PWM control principle // *IEEE Intr. Conf. on Aut. and Log.* – Qingdao University, Sep., 2008. – PP. 1556–1560.
6. Schur I., Biletskyi Y. Energy approaches in nonlinear system's control (on permanent magnet synchronous machine example) // *Bulletin of the NU "Lviv Polytechnic". Electromechanic and electroenergetic systems*. – Lviv: NU "LP", 2012. – (in print). [in Ukrainian]

Стаття надійшла 15.06.2012.
Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Шамардіною В.Н.