

2. Vasiliev M.A Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. *Successes in the physics of metals*. 2007. V. 8. P. 65–105. (Rus)
3. Zuev L.B., Gromov V.E., Kurilov V.F., Gurevich L.I. Mobility of dislocations in single crystals of zinc under the action of current pulses. DAN SSSR. 1978. Vol. 239. No. 1. P. 84–86. (Rus)
4. Korzh V.N., Gertsriken D.S., Lopata L.A., Khomyakovskiy Yu.L. Effect of the electroplastic effect on diffusion processes in deformable metals. *Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Engineering in agricultural production, branch engineering, automation*. 2010. V. 23. P. 326–329. (Rus)
5. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>
6. Postnikov I.M. Designing of electrical machines. C: Gos. Ed. Those. LIT. USSR. 1962. 736 p. (Rus)
7. Neiman L.R., Kalantarov P.L. Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Part 2. M-L: SEI. 1959. 444 p. (Rus)

Надійшла 24.05.2018

Received 24.05.2018

УДК 681.515

## АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТА КООРДИНАТНИХ ЗБУРЕНЬ

М.Я. Островерхов\*, докт. техн. наук, М.П. Бурик\*\*, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

*Запропоновано алгоритми керування електромеханічними системами на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що дає змогу отримати бажану динаміку в умовах параметричних та координатних збурень. Алгоритм керування записується безпосередньо за рівнянням об'єкта керування та диференціальним рівнянням, яким задається бажана якість керування. Реалізація алгоритму показана на прикладі керування електромеханічною системою насосної установки. Дестабілізуючим фактором виступає зменшення на 40 % номінального значення активного електричного опору обмотки ротора асинхронного двигуна та діаметра трубопроводу. При дії збурень якість перехідних процесів не зазнала суттєвої деградації. Бібл. 4, рисунок.*

**Ключові слова:** електромеханічна система, алгоритм керування, мінімізація функціонала.

**Вступ.** Якісне керування електромеханічними системами пов'язане з компенсацією негативного впливу дестабілізуючих факторів. Визначення параметрів схеми заміщення електродвигунів за паспортними даними здійснюється з похибками, обумовленими допущеннями в методиці обчислень. Внаслідок нагрівання електродвигунів у процесі роботи змінюються електричні опори обмоток [1, 2]. Приведений до валу двигуна момент інерції механізму може змінюватися в результаті зміни кінематики. За своєю природою електродвигуни та механізми є взаємопов'язаними об'єктами керування, коли зміна однієї з координат впливає на інші. Таким чином, керування електромеханічними системами проходить в умовах параметричних та координатних збурень, що обумовлює невизначеність математичної моделі об'єкта керування. Розв'язання цієї задачі класичними методами підвищує громіздкість системи внаслідок використання додаткових алгоритмів ідентифікації та адаптації.

**Метою роботи** є покращення показників якості відпрацювання електромеханічними системами завдання та компенсування змін навантаження в умовах невизначеності шляхом розробки алгоритмів керування, які забезпечують слабку чутливість до параметричних та координатних збурень.

**Концепція керування** базується на розв'язанні зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій [3]. В основу методу покладена ідея зворотності прямого методу Ляпунова з дослідження стійкості. Це дає змогу знаходити алгоритм керування, при якому замкнений контур регулювання має наперед задану функцію Ляпунова, в якості якої виступає миттєве значення енергії. Отриманий закон надає

замкнутій системі властивості стійкості в цілому, що дає змогу вирішувати задачі керування взаємозв'язаними, нелінійними об'єктами, як в лінійних системах за математичними моделями локальних контурів. Характерною особливістю оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціонала якості, а деякого мінімального значення, що забезпечує допустиму за технічними вимогами динамічну похибку системи.

Об'єкт локального контура керування описується диференціальним рівнянням

$$x^{(h)} = \sum_{k=0}^g b_k u^{(k)} - \sum_{i=0}^{(h-1)} a_i x^{(i)}, \quad (1)$$

де  $x$  – регульована координата;  $u$  – керуюча функція;  $a_i, b_k$  – коефіцієнти рівняння;  $h, g$  – порядок лівої та правої частин рівняння, причому  $h < g$ .

Бажана якість регулювання координати замкнутого контура задається звичайним диференціальним рівнянням

$$z^{(n)} + \sum_{i=0}^{(n-1)} \gamma_i z^{(i)} = \sum_{j=0}^m \beta_j x^{*(j)}, \quad (2)$$

де  $z$  – проміжна координата;  $\gamma_i, \beta_j$  – коефіцієнти, які визначають характер та тривалість перехідного процесу;  $x^*$  – завдання координати;  $n, m$  – порядок лівої та правої частин рівняння, причому  $n < m$ .

Порядок лівої частини рівняння (2) дорівнює чи на одиницю більше порядку лівої частини (1).

Локальний функціонал є ступенем наближення реального процесу керування до бажаного та є нормованим, миттєвим значенням узагальненої енергії

$$G(u) = 0.5 \left[ z^{(n)} - x^{(h)} \right]^2, \quad dG(u) / du = -(\partial f(u, x^{(i)}) / \partial u) \left[ z^{(n)} - x^{(h)} \right]. \quad (3)$$

Мінімізація функціонала (3) здійснюється за градієнтним законом першого порядку

$$du / dt = -\eta (dG(u) / du), \quad \eta > 0, \quad \dot{u} = k \left[ z^{(n)} - x^{(h)} \right], \quad k = \eta (\partial f(u, x^{(i)}) / (\partial u)) = const > 0. \quad (4)$$

Умовою збіжності процесу мінімізації функціонала (4) є

$$G(u) \rightarrow 0; \quad \frac{dG(u)}{dt} = -k \frac{\partial f(u, x^{(i)})}{\partial u} \left[ z^{(n)} - x^{(h)} \right]^2 < 0, \quad sign(k) = sign\left(\frac{\partial f(u, x^{(i)})}{\partial u}\right), \quad t \rightarrow \infty. \quad (5)$$

У результаті мінімізації алгоритм керування в загальній формі має вигляд

$$u = k \left[ z^{(n-1)} - x^{(h-1)} \right], \quad z^{(n-1)} = \sum_{j=0}^{(m-1)} \beta_j x^{*(j)} - \sum_{i=0}^{(n-2)} \gamma_i x^{(i)}. \quad (6)$$

Дослідження якості запропонованих алгоритмів здійснено на прикладі електромеханічної системи регулювання напору насосної установки. Нелінійна взаємопов'язана система складається з векторно-керованого асинхронного електроприводу [2], відцентрового насосу, що працює на протитиск, та гідравлічної мережі.

Система диференціальних рівнянь описує математичну модель об'єкта у разі стандартних припущень:

$$\begin{cases} \dot{H} + \frac{2Q_n(a_p + a_l)}{T_Q} H = 2 \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} \left[ 1.5 p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_2^* i_{1q}) \right] + V_H, \quad V_H = 2 \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} T_l + \frac{2Q_n a_l}{T_Q} \frac{2H_0}{\omega_n} \omega \leq V_H^0; \\ 2 \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_2^* i_{1q}) \right] > V_H^0; \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J} [T - T_l] = \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_2^* i_{1q}) \right] - \frac{1}{J} \left[ T_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + (T_n - T_0) \frac{\omega}{\omega_n} \sqrt{(H_0 (\omega / \omega_n)^2 - H_{st}) / (H_0 - H_{st})} \right]; \\ \dot{i}_{1d} + (R_1 / \sigma + \alpha \beta L_m) i_{1d} = V_{1d} + u_{1d} / \sigma, \quad V_{1d} = \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_2^* \leq V_{1d}^0, \quad \frac{u_{1d}}{\sigma} > V_{1d}^0; \\ \dot{i}_{1q} + (R_1 / \sigma + \alpha \beta L_m) i_{1q} = V_{1q} + u_{1q} / \sigma, \quad V_{1q} = -\omega_0 i_{1d} - \omega \beta \psi_2^* \leq V_{1q}^0, \quad \frac{u_{1q}}{\sigma} > V_{1q}^0, \end{cases} \quad (7)$$

де  $T_Q$  – коефіцієнт математичної моделі гідравлічної мережі;  $\omega_n$  – номінальна кутова швидкість,  $Q_n$  – номінальна подача;  $H$  – напір насоса;  $a_p$  – гідравлічний опір насоса;  $a_l$  – коефіцієнт опору гідравлічної мережі;  $H_0$  – напір насоса при  $\omega_n$ ;  $\alpha=R_2/L_2$ ,  $\sigma=L_1-L_m^2/L_2$ ,  $\beta=L_m/\sigma L_2$  – коефіцієнти математичної моделі асинхронного двигуна;  $R_1, R_2$  – активний опір обмоток статора й ротора;  $L_1, L_2, L_m$  – індуктивність обмотки статора, ротора та контура намагнічування;  $u_{1d}, u_{1q}$  – компоненти вектора напруги статора;  $i_{1d}, i_{1q}$  – компоненти вектора струму статора;  $\psi_2^*$  – заданий модуль вектора потокозчеплення ротора;  $J$  – сумарний момент інерції електромеханічної системи;  $p_n=1$  – число пар полюсів;  $T_l$  – момент навантаження;  $T_o$  – момент на валу насоса при  $\omega_n$  та  $Q=0$ ;  $T_n$  – номінальний момент відцентрового насоса;  $H_{st}$  – статичний напір під час підйому рідини на задану висоту;  $V_H, V_{1d}, V_{1q}$  – координатні збурення, що є невизначеними та обмеженими.

Багатовимірна система (7) завдяки динамічній декомпозиції розкладається на нелінійні підсистеми. Перша та друга похідні за часом заданих траєкторій зміни напору гідравлічної системи  $\dot{H}^*(t)$  та модуля потокозчеплення ротора  $\psi_2^*$  є обмеженими. Алгоритми керування потокозчепленням ротора, компонентами струму статора та напором насоса забезпечують астатизм першого порядку за керуючою дією та мають відповідну структуру [4]:

- регулятор модуля потокозчеплення ротора  $\psi_2^*$  (РП)

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{\psi_2^*}{L_m} + \psi_2^* \frac{1}{\alpha L_m}, \quad \psi_2^* = \psi_2^*(0) + (\psi_{2n}^* - \psi_2^*(0)) \sqrt{\frac{H^*}{H_n}}, \quad \psi_2^*, \psi_2^*(0) > 0; \quad (8)$$

- регулятор напору відцентрового насоса (РН)

$$\dot{i}_{1q}^* = k_H (\gamma_H \int (H^* - H) dt - H); \quad (9)$$

- регулятори компонент струму статора за віссю  $d$  та  $q$  (PCd та PCq)

$$u_{1d} = k_{i1d} (\gamma_{i1d} \int (i_{1d}^* - i_{1d}) dt - i_{1d}), \quad u_{1q} = k_{i1q} (\gamma_{i1q} \int (i_{1q}^* - i_{1q}) dt - i_{1q}); \quad (10)$$

- спостерігач польової компоненти струму статора  $i_{1d}$  (СП)

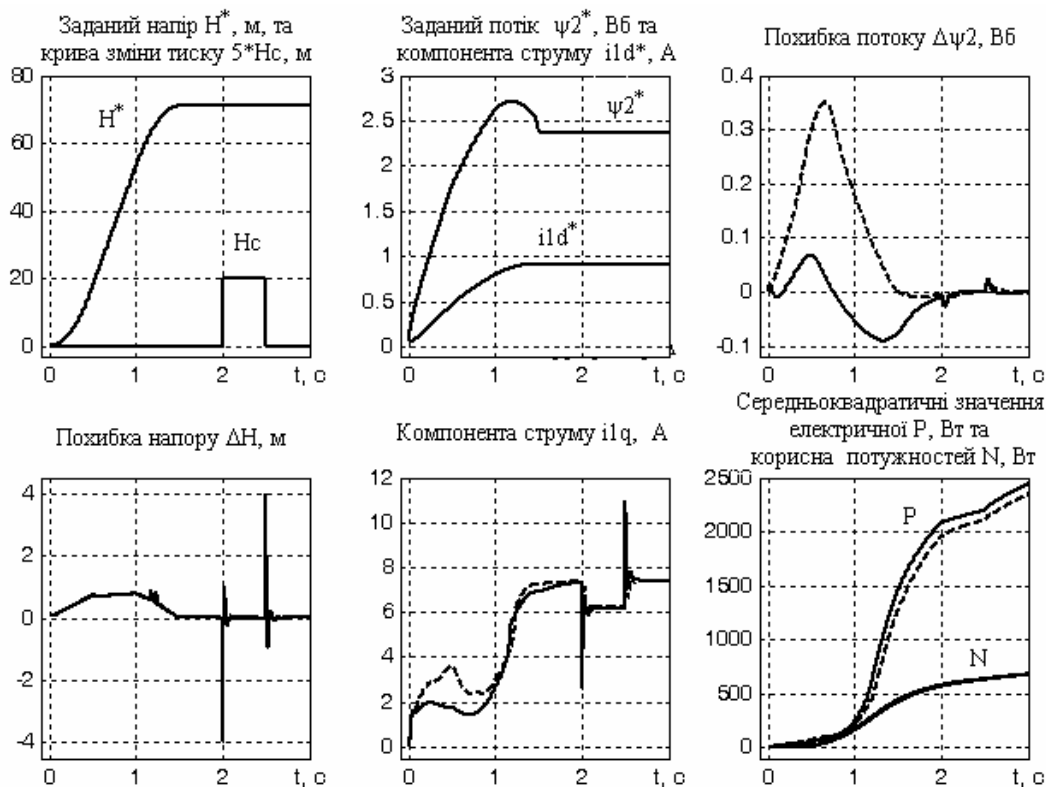
$$\hat{i}_{1d} = -\left(\frac{R_l}{\sigma} + \alpha \beta L_m\right) \hat{i}_{1d} + \omega \theta i_{1q} + \alpha \beta \psi_2^* + \frac{u_{1d}}{\sigma}, \quad \dot{\varepsilon}_\theta = \omega + \frac{\alpha L_m i_{1q}}{\psi_2^*} + k_o (\gamma_o \int (i_{1d} - \hat{i}_{1d}) dt - \hat{i}_{1d}), \quad (11)$$

де  $\varepsilon_\theta(0)=0$  – кутове положення рухомої системи координат ( $d-q$ ) стосовно нерухомої системи координат ( $a-b$ );  $\omega_\theta = d\varepsilon_\theta/dt$  – кутова швидкість магнітного поля;  $k$  – коефіцієнт підсилення алгоритмів керування;  $\gamma \approx (3/t_{mn}) > 0$  – коефіцієнт, що задає бажану тривалість перехідного процесу аперіодичного характеру.

**Результати моделювання.** Асинхронний двигун (АД) типу 4A90L2Y3 має:  $P_n=3$  кВт,  $\omega_n=300,65$  рад/с,  $U_{1n}=380$  В, частоту  $f_{1n}=50$  Гц,  $R_1=2,535$  Ом,  $R_2=1,628$  Ом,  $L_1=0,394$  Гн,  $L_2=0,398$  Гн,  $L_m=0,387$  Гн,  $J=0,007$  кгм<sup>2</sup>,  $T_l=10$  Нм. Гідравлічна мережа має довжину 100 м. Вода підіймається на висоту  $H_{st}=65,5$  м. Застосовується відцентровий насос типу NMD 25/190В/А, що забезпечує подачу рідини  $Q_n=4,5$  м<sup>3</sup>/г та має повний напір  $H=71$  м. Алгоритми керування мають такі параметри:  $\gamma_{i1q}=\gamma_{i1d}=800$ ,  $k_{i1q}=k_{i1d}=50$  – коефіцієнти регуляторів PCd та PCq;  $\gamma_H=100$ ,  $k_H=1$  – коефіцієнти регулятора РН;  $\gamma_o=50$ ,  $k_o=1$  – коефіцієнти спостерігача потокозчеплення СП. Початкові умови усіх координат приймалися нульовими крім  $\psi_2^*(0)=0,02$  Вб.

Графіки заданих траєкторій напору та модуля вектора потокозчеплення ротора представлені на рисунку, з якого видно, що АД збуджується від 0,02 до 0,92 Вб та одночасно ротор прискорюється до номінальної кутової швидкості за заданою траєкторією напору за проміжок часу  $t=0\dots1,5$  с (у гідравлічній мережі встановлюється заданий напір 71 м); на момент часу  $t=2$  с різко зменшується споживання води, що спричиняє стрибок тиску  $H_c=4$  м; на момент часу  $t=2,5$  с швидко збільшується споживання води, що обумовлює стрибок тиску з протилежним знаком  $H_c=-4$  м.

На рисунку суцільною лінією зображено перехідні процеси координат електромеханічної системи у разі номінальних параметрів АД та насосної установки, а пунктирною – під час дії параметричного збурення. Дестабілізуючим фактором є зменшення на 40 % номінального значення активного електричного опору обмотки ротора  $R_2$ , що спричинено неточним визначенням параметрів за вхідними даними, та зменшення діаметру трубо-



проводу на 40 % у випадку його забруднення. При дослідженні вибрано саме зменшення активного опору ротора, оскільки показники якості керування векторної системи більш деградують під час дії цього параметричного збурення. Запропоновані алгоритми в комбінації зі спостерігачем польової компоненти струму статора  $i_{1d}$  для непрямого векторного керування АД забезпечують стійкість, задані динамічні показники та астатичне керування напором гідравлічної мережі. Динамічна похибка під час відпрацювання заданої кривої напору змінилась від 0,883 до 0,842 м у разі дії збурення. Значення компоненти струму статора за віссю  $q$  збільшилось з 6,9 до 7,25 А. Динамічна похибка модуля потокозчеплення ротора збільшилась від 0,091 до 0,352 Вб. Час компенсації у разі зміни тиску (навантаження) збільшився з 0,04 до 0,06 с, максимальне відхилення напору (динамічна похибка) зменшилось з 4 до 3,999 м. Показники якості керування напором у разі компенсації зміни витрат у системі є практично однаковими, тобто запропоновані регулятори забезпечують робастне керування у разі відсутності значної деградації перехідних процесів координат системи. З рисунка видно, що середньоквадратичне значення активної потужності  $P$  зменшилось на 94 Вт відносно номінального 2440 Вт за цикл 3 с. Ефективна величина корисної потужності  $N$  або кількість енергії, якої набуває секундний потік рідини, що характеризує швидкісні можливості передачі енергії рідини машиною, за момент часу 3 с зменшився на 7 Вт (1,03 %) відносно номінального 679 Вт. Зміна тиску в гідравлічній мережі суттєво не впливає на енергетичні показники системи.

**Висновки.** Алгоритми керування на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій забезпечують динамічну декомпозицію взаємопов'язаної системи на локальні підсистеми та слабку чутливість до параметричних збурень. Розглянута електромеханічна система з векторно-керуваним асинхронним електроприводом забезпечує астатичне регулювання напору гідравлічної мережі та задовільну якість перехідних процесів в умовах дії суттєвих параметричних збурень у вигляді зміни на 40 % електричного опору обмотки ротора двигуна та діаметра трубопроводу. Динамічна похибка при відпрацюванні заданої кривої напору змінилась всього на 0,06 %, час компенсації у разі зміни тиску – на 0,02 с, максимальне відхилення напору – на 0,001 м, динамічна похибка модуля потокозчеплення ротора – на

29 %. Енергетичні показники електромеханічної системи при дії збурень є задовільними, зокрема середньоквадратичне значення активної потужності зменшилось на 3,85 %.

1. Пересада С.М., Ковбаса В.С., Бовкунович В.С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя: теория и экспериментальное тестирование. *Электроинформ.* 2009. № 19. С. 69–73.
2. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. Induction motor control design. London: Springer, 2010. P. 351.
3. Крутько П.Д. Декомпозирующие алгоритмы робастно устойчивых нелинейных многосвязных управляемых. Теория и прикладные задачи. *Изв. РАН. Т и СУ.* 2005. № 1. С. 5–31.
4. Островерхов М.Я., Бурик М.П. Енергоефективна система регулювання напору відцентрового насосу. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2017. Вип. 7. Т.1. С. 41–46.

УДК 681.515

**Н.Я. Островерхов**, докт. техн. наук, **Н.П. Бурик**, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

### **АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И КООРДИНАТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

*Предложены алгоритмы управления электромеханическими системами на основе концепции обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий, которые позволяют получить желаемую динамику в условиях параметрических и координатных возмущений. Алгоритм управления записывается непосредственно по уравнению объекта управления и дифференциальному уравнению, которым задается желаемое качество управления. Реализация алгоритма показана на примере управления электромеханической системой насосной установки. Дестабилизирующим фактором выступает уменьшение на 40 % номинального значения активного сопротивления обмотки ротора асинхронного двигателя и диаметра трубопровода. При действии возмущений качество переходных процессов не претерпело существенной деградации. Библи. 4, рисунок.*

**Ключевые слова:** электромеханическая система, алгоритм управления, минимизация функционала.

**M.J. Ostroverkhov, M.P. Buryk**

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

Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

### **CONTROL ALGORITHMS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF PARAMETRIC AND COORDINATE PERTURBATIONS**

*Control algorithms of electromechanical systems on the basis of the concept of inverse problems of dynamics combined with the minimization of local instantaneous energy values functional are proposed, which allows obtaining the desired dynamics in the conditions of parametric and coordinate perturbations. Controller algorithm is written directly on the equation of object and the differential equation of desired quality the control. The implementation of the algorithm is shown on the example of control of the electromechanical system of the pump installation. Variation on 40% rotor resistance of the induction motor and the diameter of the pipeline did not lead to degradation of dynamic performance. References 4, figur.*

**Key words:** electromechanical systems, control algorithms, minimization of the functional.

1. Peresada S.M., Kovbasa S.N. Bovkunovich V. S. Robust vector torque-flux control of induction motors: theory and experimental results. *Electroinform.* 2009. №19. P. 69–73. (Rus)
2. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. Induction motor control design. London: Springer, 2010. P. 351 (Eng.).
3. Krut'ko P. D. Decomposing algorithms of robust-stable nonlinear multiply connected control systems. Theory and applied problems. *Journal of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control systems.* 2005. № 1. P. 5–31. (Rus)
4. Ostroverkhov M.J, Buryk M.P. Energy-efficient control system of pressure of centrifugal pump. *Scientific herald of Tavria State Agrotechnological University.* 2017. № 7. P. 41–46. (Ukr)

Надійшла 02.03.2018

Received 02.03.2018