

М. ТВЕРД, фірма ZAKLAD ENERGOELEKTRONIKI "TWERD", Польща, Торунь;
Б. Л. КОПЧАК, канд. техн. наук, доц., докторант НУ «Львівська Політехніка»

САМОНАЛАГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ КЕРУВАННЯМ МЕТОДОМ РОЮ ЧАСТИНОК

Вступ. У зв'язку зі зростанням попиту на регульовані електроприводи (ЕП) змінного струму в електромеханічних системах (ЕМС) фірмою «TWERD» і Національним університетом "Львівська політехніка" згідно договору про творчу співпрацю проводяться роботи щодо використання в універсальних перетворювачах частоти (ПЧ) типу MFC 710 з векторним керуванням [1] дробових ПІД-регуляторів з передавальною функцією (ПФ) [1]

$$W_p(s) = K_p + T_i s^{-\lambda} + T_d s^{\delta}, \quad (1)$$

і можливості реалізувати режим самоналагодження електромеханічних систем з такими регуляторами.

В системі керування ПЧ типу MFC 710 використаний інтерфейс MODBUS, завдяки якому є можливість керувати перетворювачем частоти в будь якій системі автоматичного керування (САК), в якій передбачені керувані входи на RS-232C або RS-485. У випадку необхідності для керування таким ПЧ можна використати комп'ютер, мікроконтролер або пристрій власної конструкції.

Мета даної роботи – дослідити режим самоналагодження регулятора швидкості ЕМС з мікропроцесорним керуванням шляхом формування бажаної динамічної характеристики контура регулювання швидкості методом рою частинок (МРЧ) (angl. PSO - Particle Swarm Optimization) на моделі і оцінити можливість його реалізації за використання комп'ютера або спеціального програмованого логічного контролера (ПЛК) в ПЧ фірми «TWERD» типу MFC 710.

Матеріали досліджень. Авторами запропоновано оригінальні підходи до налагодження параметрів як дробового, так і цілочисельного ПІД-регулятора швидкості, який є частковим випадком більш загального його представлення за допомогою ПФ дробового порядку (λ і $\delta = 1$), в автоматичному режимі, тобто у режимі самоналагодження, методом рою частинок [2,3] і може бути реалізований за використання комп'ютера або спеціалізованого ПЛК ПЧ.

Проведено дослідження двох варіантів налагодження параметрів регулятора швидкості таким методом:

- за використання перехідної функції бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми;

- за характерними точками перехідної функції бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми (час першого досягнення 95% від усталеного значення перехідного процесу ($t_{0.95}$); максимальне відхилення координати (y_{\max}), або її перерегулювання δ_n ; час досягнення максимуму перерегулювання (t_{\max})).

Як приклад для налагодження використовуємо стандартну перехідну функцію дробового порядку (форма Батерворта) [4] з бажаною якістю перехідного процесу: $t_{0.95} = 0,29\text{с.}$, $\delta_n = 7,32\%$, $t_{\max} = 0,52\text{с.}$, яка відповідає ПФ

$$W_{\text{ст.Бат.}}(s) = \frac{\omega_{\text{ос}}}{s^{1.2} + \omega_{\text{ос}}}, \quad (2)$$

для $\omega_{\text{ос}} = 10 \text{с}^{-1}$. Така якість перехідного процесу відповідає технічному – оптимальному (ТО) протіканню перехідних процесів в ЕМС.

На рис.1. показана функціональна схема ЕМС у режимі самоналагодження, в якій передбачено варіант можливості контролю швидкості як вала двигуна ($\omega_{\text{д}}$), так і механізму ($\omega_{\text{м}}$), хоча для врахування впливу нелінійності характеристики механізму перевагу слід надавати другому варіанту, враховуючи переваги регуляторів дробового порядку для синтезу нелінійних систем [5].

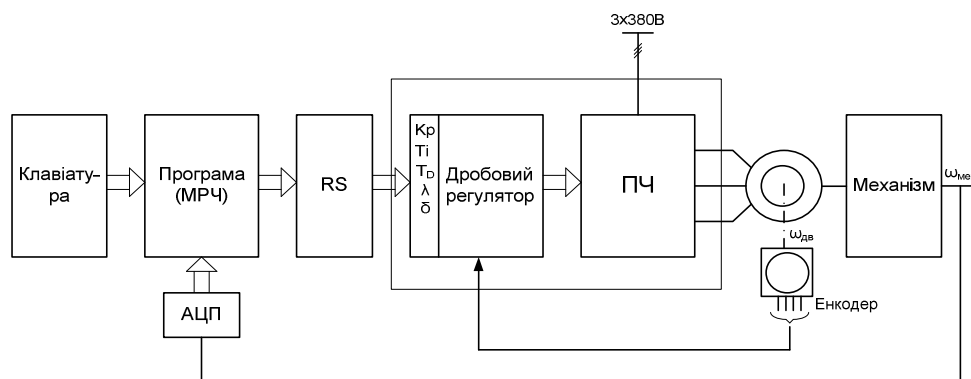


Рис.1. Функціональна схема ЕМС у режимі самоналагодження за використання комп'ютера

Зв'язок комп'ютера з ПЧ здійснюється через RS, а встановлення параметрів ПД-регулятора за використання протоколу MODBUS. Розрахунок параметрів регулятора відбувається в комп'ютері у режимі активного експерименту за використання методу рою частинок.

Нами проведені симуляційні дослідження запропонованого алгоритму вибору параметрів дробового ПД-регулятора методом рою частинок для оптимізації контуру швидкості, який полягає в наступному [2,3].

1. Вносимо в пам'ять комп'ютера еталонну перехідну функцію, яка відповідає вибраній за бажаною якістю перехідного процесу стандартній дробовій формі з ПФ (2). Дискретизацію перехідної функції в часі здійснюємо з кроком 0,01сек.

2. Для дробового ПД-регулятора з ПФ (1) будемо п'ятивимірний простір рою (за кількістю параметрів: $K_p, T_i, T_d, \lambda, \delta$) [4], який передбачає як частковий випадок і тривимірний простір для цілочисельного регулятора з параметрами K_p, T_i, T_d .

3. На основі попередніх розрахунків встановлюємо початкові параметри регулятора.

4. Подавши одиничне збурення на вході, записуємо в пам'ять комп'ютера отриманий перехідний процес частоти обертання ЕМС.

5. Запускаємо процес пошуку параметрів регулятора швидкості, які забезпечать бажаний перехідний процес методом рою частинок.

6. На кожній ітерації для кожної частинки рою (координата параметрів регулятора у п'ятивимірному просторі) і набутих нею в процесі руху в просторі параметрів знаходиться її перехідна функція і відбувається порівняння її з еталонною. Частинка, параметри якої забезпечать найменше абсолютне середньоквадратичне відхилення і менше від попередньої ітерації, буде визначена як найкраща на ітерації, а її параметри будуть визначати траєкторії руху інших частинок на наступній ітерації.

7. Кількість ітерації можна або задавати вручну або вводити процедуру припинення ітераційного процесу, коли абсолютне середньоквадратичне відхилення найкращої частинки стане меншим за задане.

8. Після досягнення бажаної точності комп'ютер встановлює в регуляторі ПЧ знайдені параметри.

Для порівняння ступеня збігу перехідної функції отриманої за використання дробового ПД-регулятора і перехідної функції бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми, для кожного елемента рою на кожній ітерації розраховуємо похибки апроксимації у вигляді абсолютного середньоквадратичного відхилення σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - y_{ie})^2}, \quad (3)$$

де: y_i – значення апроксимуючої перехідної функції в i -й точці; y_{ie} – дійсне значення перехідної функції в i -й точці; M – кількість точок опрацювання перехідного процесу.

Для зменшення часу пошуку параметрів регулятора швидкості, зокрема для можливості його використання для реалізації самоналагоджувальної системи керування ЕМС, нами запропоновано підхід до синтезу дробового ПД-регулятора за наступними характерними точками перехідної функції бажаної стандартної дробової форми: час першого досягнення 95% від усталеного значення перехідного процесу (t_{095}); максимальне відхилення координати (y_{\max}), або перерегулювання δ_n ; час досягнення максимуму перерегулювання (t_{\max}).

Відмінність алгоритму такого підходу від попереднього полягає в тому, що порівняння перехідної функції з еталонною відбувається лише у певних характерних точках перехідного процесу t_{095}, y_{\max} і t_{\max} .

При пошуку параметрів дробового ПД-регулятора швидкості за характерними точками перехідної функції бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми в алгоритм нами введена функція якості J , яка як і σ (3) також характеризує ступінь збігу, і в програмному середовищі MATLAB і записується у вигляді

$$J = k_t (t_{095} - t_{095pot})^2 + k_y (y_{\max} - y_{\max pot})^2 + k_{t_{\max}} (t_{\max} - t_{\max pot})^2; \quad (4)$$

де: $k_t=0.1$; $k_y=1$; $k_{t_{\max}}=1$ - вагові коефіцієнти.

Ці коефіцієнти враховують ступінь важливості кожної з характерних точок, а їх величина вибирається автором на основі досвіду проведення таких досліджень. В процесі роботи МРЧ функція якості J мінімізується (в ідеальному випадку вона дорівнює нулю). Тобто на кожному кроці ітерації відбувається порівняння біжучих параметрів кожного елемента рою з еталонними і розрахунок функції якості.

Знаходження ПФ дробового регулятора за використання методу рою покажемо на двох прикладах для об'єктів керування, які описані ПФ дробового порядку, шляхом моделювання у середовищі MATLAB. Об'єкти керування нами вибрані такі, що апроксимовані ПФ дробового порядку і мають різний характер перехідної функції. Таке представлення об'єктів керування ЕМС має переваги як з точки зору пониження порядку моделі, так і точності та часу апроксимації [2,6], що створює перспективу для побудови самоналагоджувальних (адаптивних) електромеханічних систем з дробовими регуляторами.

Приклад 1. Для об'єкта керування ЕМС з ПФ

$$W(s) = \frac{1}{0.5s^{0.9} + 1} \quad (5)$$

на рис.2. (крива «1») показано його перехідну функцію.

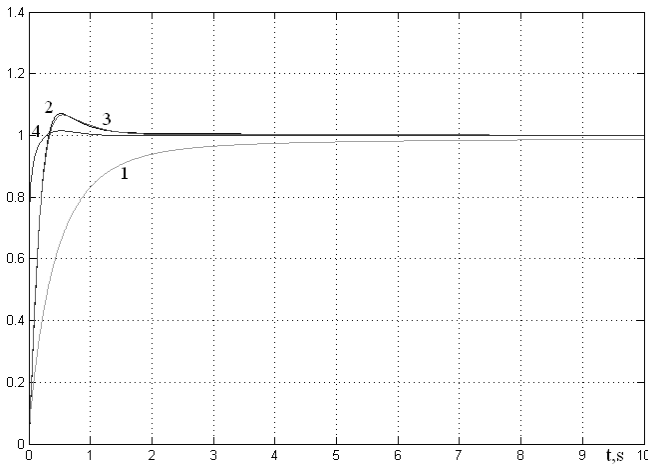


Рис.2. Перехідні функції: крива «1» об'єкт керування - ПФ(5); крива «2» дробова стандартна форма - ПФ(2); крива «3» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(6); крива «4» МРЧ за використання характерних точок - ПФ (7).

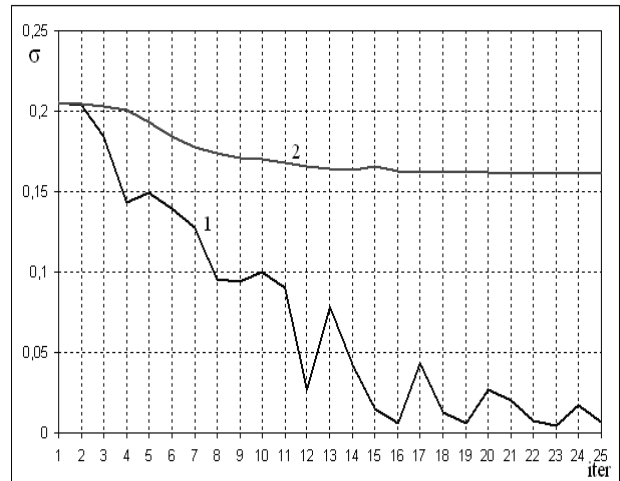


Рис.3. Залежність абсолютного середньоквадратичного відхилення σ від номера ітерації МРЧ: крива «1» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(6); крива «2» МРЧ за використання характерних точок - ПФ(7).

Застосувавши розроблене програмне забезпечення, отримано ПФ дробового порядку для двох варіантів пошуку параметрів регулятора швидкості методом рою частинок і перехідні процеси, які вони реалізують в даній ЕМС і показані на рис.2:

- крива «2» перехідна функція, яка відповідає дробовій стандартній формі з ПФ (2);
- крива «3» - результат отриманий МРЧ за використання перехідної функції бажаної стандартної дробової форми з ПФ дробового ПІД-регулятора, абсолютне середньоквадратичне відхилення після 25-ї ітерації, $\sigma < 0,00685$,

$$W_p(s) = 5.5337 + 11.5921s^{-1.0801} - 2.3295s^{0.1462}; \quad (6)$$

- крива «4» - результат отриманий МРЧ за використання характерних точок перехідної функції бажаної стандартної дробової форми з ПФ дробового ПІД-регулятора, абсолютне середньоквадратичне відхилення σ : після 25-ї ітерації, $\sigma < 0,1614$

$$W_p(s) = 8.8958 + 81.6247s^{-0.9723} + 5.9899s^{0.4586}. \quad (7)$$

Основні параметри (характерні точки) перехідних функцій визначаються автоматично в процесі розрахунку у програмному середовищі MATLAB.

На рис.3. показані результати досліджень, проведених автором, які показують залежності абсолютного середньоквадратичного відхилення σ параметрів кожного елемента рою отриманих перехідних функцій з вибраною стандартною формою в залежності від номера ітерації, відповідно: крива «1» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(6); крива «2» МРЧ за використання характерних точок - ПФ(7).

Приклад 2. Для об'єкта керування ЕМС з ПФ

$$W(s) = \frac{1}{0.8s^{2.2} + 0.5s^{0.9} + 1} \quad (8)$$

на рис.4. (крива «1») показано його перехідну функцію.

Застосувавши розроблене програмне середовище, отримано, як і у попередньому прикладі, ПФ дробового порядку і перехідні процеси, для двох варіантів налагодження параметрів регулятора швидкості методом рою частинок, які показані на рис.4:

- крива «2» перехідна функція, яка відповідає дробовій стандартній формі ПФ (2);
- крива «3» - результат отриманий МРЧ за використання перехідної функції бажаної стандартної дробової форми (2) з ПФ дробового ПІД-регулятора, абсолютне середньоквадратичне відхилення після 20-ї ітерації $\sigma < 0,0157$

$$W_p(s) = 7.0171 + 13.54s^{-1.3972} + 7.63s^{1.0205}; \quad (9)$$

- крива «4» - результат отриманий МРЧ за використання характерних точок перехідної функції бажаної стандартної дробової форми і функції якості J після 20-ї ітерації, $J < 0,00049$

$$W_p(s) = 15.3692 + 27.2496s^{-1.1566} + 9.4120s^{1.1852}. \quad (10)$$

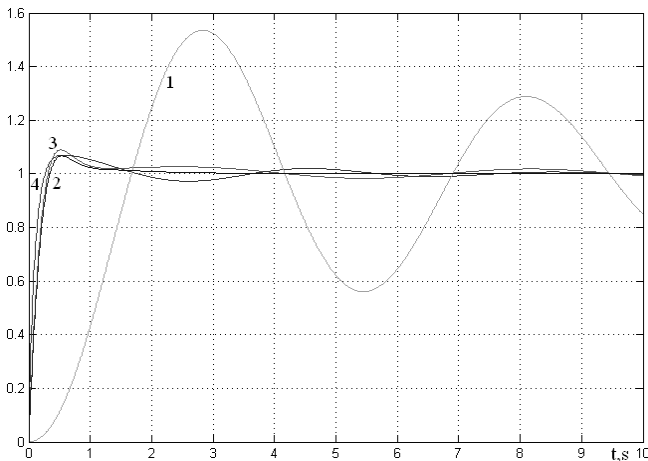


Рис. 4. Перехідні функції: крива «1» об'єкт керування - ПФ(8); крива «2» дробова стандартна форма - ПФ (2); крива «3» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(9); крива «4» МРЧ за використання характерних точок - ПФ(10).

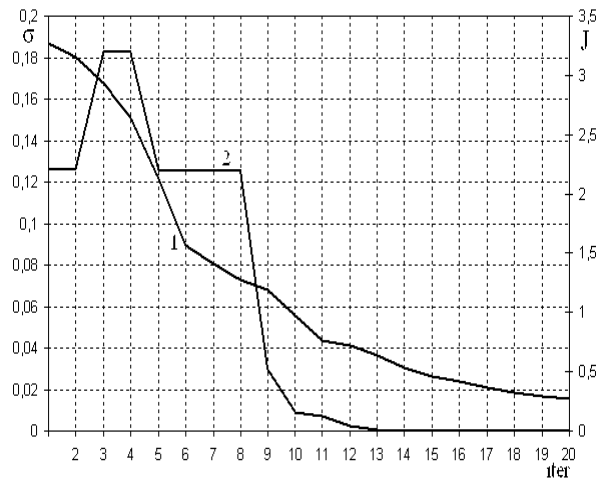


Рис.5.Залежність абсолютного середньо-квадратичного відхилення від номера ітерації МРЧ: крива «1» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(9); крива «2» МРЧ за використання характерних точок і функції якості J - ПФ(10).

На рис.5. показані результати досліджень залежності ступені розбіжностей параметрів кожної частинки рою отриманих перехідних функцій з вибраною стандартною формою в залежності від номера ітерації, відповідно: крива «1» залежність $\sigma = f(\text{iter})$ МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(9); крива «2» залежність $J = f(\text{iter})$ МРЧ за використання характерних точок - ПФ(10).

ВИСНОВКИ:

1. Аналіз запропонованих підходів до самоналагодження цифрового як дробового, так і цілочисельного ПІД-регулятора швидкості ЕМС методом рою частинок показав їх придатність для практичної реалізації у перетворювачах частоти типу MFC710 за використання комп'ютера або спеціалізованої опції програмованого логічного контролера.

2. Запропонований алгоритм самоналагодження дробового ПІД-регулятора за використання характерних точок перехідної функції бажаної стандартної дробової форми і функції якості J для оцінки ступеня розбіжності прискорює цей процес і забезпечує його задовільну точність.

Список літератури: 1. Тверд М. Преобразователь частоты с векторным управлением и расширенными функциональными возможностями / М. Тверд, И. Зеленский, Л. С. Копчак, Б. Л. Копчак // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2005. – Вип 45. – С. 382–383. 2. Копчак Б. Л. Апроксимація перехідних функцій поліномами дробового порядку / Б. Л. Копчак // Одеський національний політехнічний університет. Науково-технічний журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – К: Техніка, 2014. – №14 (90). – С. 20– 27. 3. Maiti D. Design of a Fractional Order PID Controller Using Particle Swarm Optimization Technique / D. Maiti, S. Biswas, A. Konar // Proceeding 2nd - National Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS-08). – 2008. – 5с. 4. Марущак Я.Ю. Дробові стандартні форми для синтезу електромеханічних систем. / Я. Ю. Марущак Б.Л.Копчак // Одеський національний політехнічний університет. Науково-технічний журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – К: Техніка, 2014. – №15 (91). – С. 57– 60. 5. Barbosa R.S. Fractional Descibing Function Analysis of Systems with Backlash and Impact Phenomena / R. S. Barbosa, J. A. T. Machado // Proceeding 6th International Conference of Intelligent engineering Systems (INES'2002).).– С. 521–526. 6. Dzieliński A. Some applications of fractional order calculus / A.Dzieliński, D. Sierociuk, G. Sarwas // Bulletin Of Polish Academy Of Sciences. – Warsaw: Technical Sciences, 2010. – Vol. 58 (4). – С. 583–592.

Bibliography: 1. Twerd, M., Zelenskii, I., Kopchak, L. S. and Kopchak B. L. "Preobrazovatel' chastoty s vektornym upravleniem i rasshirennymi funktsional'nymi vozmozhnostyami" // *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu "Harkivs'kyj politehničnyj instytut". Problemy avtomatyzovanogo elektropryvodu. Teorija i praktyka.* Vyp. 45. 2005. 382–383. Print. 2. Kopchak, B. L. "Aproksymacija perehidnyh funkcij polinomamy drobovogo porjadku" // *Odes'kyj nacional'nyj politehničnyj universytet. Naukovo-tehničnyj zhurnal «Elektrotehnični ta komp'juterni systemy».* №14 (90). 2014. 20–27. Print. 3. Maiti, D., Biswas, S. and Konar, A. "Design of a Fractional Order PID Controller Using Particle Swarm Optimization Technique" // *Proceeding 2nd - National Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS-08).* 2008. 5. Print. 4. Marushhak, Ja.Ju. and Kopchak, B.L. "Drobovi standartni formy dlja syntezy elektromehanichnyh system." // *Odes'kyj nacional'nyj politehničnyj universytet. Naukovo-tehničnyj zhurnal «Elektrotehnični ta komp'juterni systemy».* №15 (91). 2014. 57– 60. Print. 5. Barbosa, R.S. and Machado, J. A. T. "Fractional descibing function analysis of systems with backlash and impact phenomena // *Proceeding 6th International Conference of Intelligent engineering Systems (INES'2002).* 2002. 521–526. Print. 6. Dzieliński, A., Sierociuk, D. and Sarwas, G. "Some applications of fractional order calculus" // *Bulletin of Polish Academy of Sciences.* – Warsaw: Technical Sciences. Vol. 58 (4). 2010. 583–592. Print.

Надійшла (received) 18.06.2015