ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ТРАЄКТОРНА ЧУТЛИВІСТЬ ВАРІАНТІВ ПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

С. С. Старостін, Л. О. Роткевич

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: sergii.starostin7@gmail.com

Виконано дослідження варіантів позиційних електромеханічних систем, які є основою автоматизації технологічних процесів, з метою порівняння їх динамічних властивостей. Аналіз та моделювання систем виконано із застосуванням математичного опису систем у просторі станів. Визначено, що типова система з пропорційно-інтегральним регулятором швидкості електроприводу має гірші динамічні характеристики, але менш чутлива до змін параметрів, ніж система з еталонною моделлю контуру регулювання та пропорційним регулятором швидкості. Зазначено, що корекція сигналу позиційного задання у функції першої та другої похідної від цього сигналу забезпечує швидкодію типової системи практично однаковою відносно до системи з еталонною моделлю, однак система стає більш чутливою до змін параметрів. Отримані результати досліджень дають підстави щодо вибору варіанту позиційної системи для практичного використання залежно від вимог до технологічного процесу.

Ключові слова: електромеханічна система, позиціонування, динамічні властивості, чутливість.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРАЕКТОРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВАРИАНТОВ ПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. С. Старостин, Л. А. Роткевич

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: sergii.starostin7@gmail.com

Выполнены исследования вариантов позиционных электромеханических систем, которые являются основой автоматизации технологических процессов, с целью сравнения их динамических свойств. Анализ и моделирование систем выполнено с помощью математического описания систем в пространстве состояний. Определено, что типовая система с пропорционально-интегральным регулятором скорости электропривода имеет худшие динамические характеристики, но менее чувствительна к изменению параметров, чем система с эталонной моделью контура регулирования и пропорциональным регулятором скорости. Отмечено, что коррекция сигнала позиционного задания в функции первой и второй производных от этого сигнала обеспечивает быстродействие типовой системы практически одинаковое относительно системы с эталонной моделью, но система становится более чувствительной к изменению параметров. Результаты исследований дают основания для выбора варианта позиционной системы для практического применения в зависимости от требований технологического процесса.

Ключевые слова: электромеханическая система, позиционирование, динамические свойства, чувствительность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Позиційні електромеханічні системи мають суттєве значення для автоматизації технологічних процесів. Сучасний підхід до реалізації таких систем полягає в формуванні заданої траєкторії руху, яку має як найкраще відслідковувати позиційний електропривод [1, 2]. Зазвичай позиційні системи виконують з пропорційно-інтегральним регулюванням швидкості електроприводу, підпорядкованого пропорційному регулятору переміщення [1]. У [2] розглянуто варіант позиційної системи з еталонною моделлю контуру регулювання та пропорційним регулятором швидкості. Виходячи з властивостей підпорядкованого регулювання така система матиме підвищену швидкодію, що важливо для забезпечення зменшення динамічної похибки слідування. Крім того, наявність еталонної моделі надає системі ознаки адаптивності [3]. Між тим, у [2] є відсутнім порівняльний аналіз варіантів систем щодо їх динамічних характеристик. Отже, доцільно заповнити цей пробіл, виконавши відповідні дослідження.

Метою роботи є аналіз динамічних властивостей варіантів позиційних електромеханічних систем, у тому числі, на основі визначення чутливості до

змінювання параметрів систем регулювання.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Структурні схеми порівнюваних позиційних систем, зображені на рис. 1 і рис. 2. Типову структурну схему (рис. 1) складають: ланка K_m , яка характеризує динамічні властивості формування обертового моменту двигуна M^* , регулятор швидкості електроприводу з пропорційною ($k_{R\omega}$) та інтегральною (R_ω) частинами, фільтр відносно задання швидкості ($F_{\omega S}$) і пропорційний регулятор кута повороту вала двигуна ($k_{R\phi 1}$) [1]. Зв'язок моменту двигуна M^* з кутовою швидкістю ω^* та кутом повороту вала ϕ_1^* відображають відповідно інтегральні ланки S_ω та S_ϕ . У схемі враховано вплив моменту технологічного навантаження M_{τ^*} . Інший варіант позиційної системи (рис. 2) відрізняється застосуванням у контурі регулювання швидкості тільки пропорційного регулятора $k_{R\omega}$ та відсутністю фільтра після регулятора кута повороту вала $k_{R\phi 2}$. Інтегральна ланка R_ω забезпечує корекцію похибки за швидкістю $\Delta\omega^*$ у функції різниці між виходом еталонної моделі $K_{\omega S}$ і швидкістю двигуна [2].

Рисунок 1 – Структурна схема позиційної системи з пропорційно-інтегральним регулятором швидкості

Рисунок 2 – Структурна схема позиційної системи з пропорційним регулятором швидкості та еталонною моделлю

Еталонна модель відтворює бажані динамічні властивості контуру регулювання швидкості завдяки відповідній передавальній функції:

$$K_{\omega S}(s) = \frac{k_{R\omega} K_m S_{\omega}}{1 + k_{R\omega} K_m S_{\omega}}. \quad (1)$$

Збурення в контурі регулювання швидкості (рис. 2) в результаті варіацій параметрів ланок або змінення навантаження призводять до відхилення фактичної швидкості двигуна від сигналу з еталонної моделі, що активує формування сигналу корекції інтегральною ланкою R_{ω} .

Структурні схеми (рис. 1, 2) подані у відносних величинах, враховуючи базисні номінальні швидкість ω_N і момент двигуна M_N . Отже, маємо таке: $M^* = M/M_N$, $\omega^* = \omega/\omega_N$. Стала часу T_J характеризує механічну інерційність електроприводу та дорівнює $T_J = J_S \omega_N / M_N$, де J_S – сумарний момент інерції об'єкта регулювання, зведений до вала двигуна.

Передавальні функції варіантів позиційних систем згідно з формулою Мейсона [3] дорівнюють:

$$K_{\phi 1}(s) = \frac{k_{R\phi 1} F_{\omega S} k_{R\omega} K_m S_{\omega} S_{\phi} (1 + R_{\omega})}{1 + k_{R\omega} K_m S_{\omega} (1 + R_{\omega}) (1 + k_{R\phi 1} F_{\omega S} S_{\phi})}; \quad (2)$$

$$K_{\phi 2}(s) = \frac{k_{R\phi 2} k_{R\omega} K_m S_{\omega} S_{\phi} (1 + K_{\omega S} R_{\omega})}{1 + k_{R\omega} K_m S_{\omega} [1 + R_{\omega} + k_{R\phi 2} S_{\phi} (1 + K_{\omega S} R_{\omega})]}. \quad (3)$$

Параметри систем регулювання обирають на основі модульного критерію оптимізації [4, 5], у результаті чого мають місце такі вирази:

$$K_m = \frac{1}{T_m s + 1}; k_{R\omega} = \frac{T_J}{2T_m}; R_{\omega} = \frac{1}{T_{R\omega} s}; T_{R\omega} = 4T_m; \quad (4)$$

$$F_{\omega S} = \frac{1}{T_{R\omega} s + 1}; k_{R\phi 1} = \frac{1}{8T_m}; k_{R\phi 2} = \frac{1}{4T_m},$$

де T_m – стала часу формування обертового моменту двигуна; $T_{R\omega}$ – стала інтегрування у контурі регулювання швидкості.

За таких параметрів передавальна функція еталонної моделі згідно з (1) дорівнюватиме:

$$K_{\omega S}(s) = \frac{1}{2T_m^2 s^2 + 2T_m s + 1}. \quad (5)$$

На рис. 3 відображені результати моделювання варіантів позиційних систем, які характеризують їх динамічні властивості.

Рисунок 3 – Часові діаграми реагування позиційних систем на стрибки задання й навантаження

Позначення змінних на рис. 3 відповідає позначенням на структурних схемах систем (рис. 1, 2). Надані результати свідчать, що швидкодія другої системи приблизно в 2 рази є вище за цей показник для першої системи. Друга система також краще реагує на накидання навантаження $M_{т*}$ з максимальним динамічним відхиленням від заданої величини $\Delta\varphi_{2*}$, яке становить $0,74 \Delta\varphi_{1*}$.

Для порівняння властивостей систем регулювання важливою є оцінка чутливості до зміння параметрів як об'єкта, так і регуляторів. Існує багато методів дослідження чутливості систем, розглянутих у [6–8]. Більшість з методів характеризується відносною складністю, що відзначено в [9], де надано результати огляду різних методів. Зазначено, що простотою та наочністю відрізняється метод траєкторної чутливості, який дозволяє оцінити вплив відхилень параметрів систем від їх початкових значень.

Доцільним є використання метода траєкторної чутливості на основі аналізу систем у просторі станів, ураховуючи відомий опис динамічної системи у векторно-матричній формі [10]:

$$\begin{cases} s\mathbf{x}(v) = \mathbf{A}(v)\mathbf{x}(v) + \mathbf{B}(v)u; \\ y(v) = \mathbf{C}(v)\mathbf{x}(v), \end{cases} \quad (6)$$

де $\mathbf{x}$ – вектор стану системи; $\mathbf{A}$ – системна матриця; $\mathbf{B}$ – вектор керування; $\mathbf{C}$ – вектор виходу; y – вихідна змінна; $v = v_0 + \delta v$ – змінюваний параметр з початковим значенням v_0 та прирощенням δv ; s – оператор Лапласа.

За умови $\delta v \rightarrow 0$ матиме такі вирази [9]:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(v) = \mathbf{x}(v_0 + \delta v) = \mathbf{x}(v_0) + \frac{\partial \mathbf{x}(v)}{\partial v} \delta v; \\ y(v) = y(v_0 + \delta v) = y(v_0) + \frac{\partial y(v)}{\partial v} \delta v. \end{cases} \quad (7)$$

Похідні $\sigma_x = \partial \mathbf{x}(v) / \partial v$ та $\sigma_y = \partial y(v) / \partial v$ визначають функції траєкторної чутливості відносно стану та виходу системи відповідно. У просторі станів цім функціям відповідають рівняння [9]:

$$\begin{cases} s\sigma_x = \mathbf{A}_v \mathbf{x} + \mathbf{A} \sigma_x + \mathbf{B}_v u; \\ \sigma_y = \mathbf{C} \sigma_x + \mathbf{C}_v \mathbf{x}, \end{cases} \quad (8)$$

де матриця та вектори дорівнюють:

$$\mathbf{A}_v = \frac{\partial \mathbf{A}(v)}{\partial v}; \quad \mathbf{B}_v = \frac{\partial \mathbf{B}(v)}{\partial v}; \quad \mathbf{C}_v = \frac{\partial \mathbf{C}(v)}{\partial v}. \quad (9)$$

З системи рівнянь (8) випливає, що отримання функцій чутливості базовано на математичному описі системи регулювання (6). Ураховуючи це, у загальному вигляді матиме систему векторно-матричних рівнянь:

$$\begin{cases} s \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \sigma_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_v & \mathbf{A} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \sigma_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}_v \end{bmatrix} u; \\ \begin{bmatrix} y \\ \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_v & \mathbf{C} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \sigma_x \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (10)$$

Комп'ютерне моделювання на основі (10) з урахуванням одиничного стрибка керуючого сигналу u дає результати щодо динамічних властивостей системи у вигляді перехідної функції системи та функції траєкторної чутливості відносно зміння конкретного параметра.

Матриці та вектори системи (10) формують на основі передавальної функції досліджуваної системи регулювання, яку в загальному вигляді описує вираз:

$$K(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}. \quad (11)$$

Конкретизація векторно-матричного опису систем у просторі станів має низку варіантів [10]. Досвід дослідження систем відносно до їх чутливості свідчить, що доцільно використовувати представлення системи у формі спостереження стану, для якої зв'язок системної матриці та векторів з коефіцієнтами передавальної функції (11) характеризують вирази:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \Lambda & 0 & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \Lambda & 0 & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M \\ 0 & 0 & \Lambda & 1 & 0 & -a_{n-2} \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ M \\ b_m \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad \Lambda \quad 0 \quad 0 \quad 1].$$

Застосування форми спостереження дозволяє здійснювати масштабування результатів у процесі візуалізації, змінюючи значення останнього елемента у векторі $\mathbf{C}$.

Як приклад розглянемо отримання функції чутливості відносно сталої інерції T_J для позиційної системи з пропорційно-інтегральним регулятором швидкості (рис. 1), яка має передавальну функцію:

$$K_{\phi 1}(s) = \frac{\Phi_{1*}}{\Phi_{s*}} = \frac{b_0}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + s^4}, \quad (13)$$

де $a_0 = k_{R\phi 1} k_{R\omega} / (T_J T_m T_{R\omega})$; $a_1 = k_{R\omega} / (T_J T_m T_{R\omega})$; $a_2 = k_{R\omega} / (T_J T_m)$; $a_3 = 1 / T_m$; $b_0 = a_0$.

Урахування параметрів передавальної функції (13) у матриці $\mathbf{A}$ та векторах $\mathbf{B}$ і $\mathbf{C}$ згідно з (12) після виконання операції диференціювання дає результат, необхідний для визначення функції чутливості:

$$\mathbf{A}_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_0/T_J \\ 0 & 0 & 0 & a_1/T_J \\ 0 & 0 & 0 & a_2/T_J \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_v = \begin{bmatrix} -b_0/T_J \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_v = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

На основі цього, взявши до уваги (10) і виконавши моделювання, отримано результати, подані на рис. 4, а, де відображено перехідну функцію $h_{\varphi 1}$ та функцію траєкторної чутливості σ_{J1} відносно до сталої T_J , а також перехідну функцію $h_{\varphi 1\sigma}$ за умови збільшення сталої T_J на 50 % для позиційної системи з пропорційно-інтегральним регулятором швидкості (система 1). Позиційну систему з пропорційним регулятором швидкості та еталонною моделлю (система 2) характеризують результати моделювання, зображені на рис. 4,б, отримані за аналогічних умов.

Рисунок 4 – Часові діаграми щодо чутливості позиційних систем до варіацій сталої інерції T_J

Отже, система 2 з еталонною моделлю є більш чутливою до варіації сталої інерції T_J . Аналогічні висновки було зроблено на основі результатів моделювання щодо чутливості відносно до варіацій сталої T_m та коефіцієнта регулятора швидкості $k_{R\omega}$. Інший результат отримано для коефіцієнта позиційного регулятора $k_{R\varphi}$, що характеризує рис. 5.

Рисунок 5 – Часові діаграми щодо чутливості позиційних систем до варіацій коефіцієнта позиційного регулятора $k_{R\varphi}$

Чутливість $\sigma_{R\varphi 2}$ до змінення цього параметру для системи 2 є трохи меншою ніж для системи 1.

Швидкодію позиційного регулювання типової системи (рис. 1) можна підвищити на основі корекції сигналу задання, додаючи першу та другу похідні від цього сигналу з відповідними ваговими коефіцієнтами [1]. У результаті передавальна функція позиційної системи матиме вираз:

$$K_{\varphi 3}(s) = \frac{\varphi_{3*}}{\varphi_{s*}} = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + s^4}, \quad (15)$$

де $b_1 = k_{S1} b_0$; $b_2 = k_{S2} b_0$.

У передавальній функції (15) коефіцієнти a_0 , a_1 , a_2 , a_3 та b_0 є ідентичними коефіцієнтами у виразі (13). Коефіцієнти k_{S1} і k_{S2} визначають з двох умов оптимізації передавальної функції (15) на основі модульного критерію [1, 4], що дає результат:

$$k_{S1} = 4\sqrt[4]{2} T_m; \quad k_{S2} = 8\sqrt{2} T_m^2. \quad (16)$$

Знаходження векторно-матричних компонентів для дослідження траєкторної чутливості системи з передавальною функцією (15) і наступне моделювання дає характерні результати, подані на рис. 6, 7.

Рисунок 6 – Часові діаграми щодо чутливості до варіацій сталої інерції T_J для позиційної системи з корекцією задання

Рисунок 7 – Часові діаграми щодо чутливості до варіацій коефіцієнта позиційного регулятора $k_{Rφ}$ для позиційної системи з корекцією задання

Порівняння отриманих результатів (рис. 6, 7) з часовими діаграмами, зображеними на рис. 4, 5, свідчить, що швидкодія такого варіанта системи є практично такою самою як у другому варіанті системи (рис. 2). Чутливість є гіршою ніж у системі 1, але кращою ніж у системі 2 за винятком реагування на відхилення коефіцієнта позиційного регулятора $k_{Rφ}$ від оптимальної величини (рис. 7).

Слід зазначити, що оскільки корегування стосується тільки сигналу задання і не торкається системи регулювання, то реагування системи 3 на накид навантаження є незмінним (рис. 3, крива Φ_1^*).

ВИСНОВКИ.

1. Динамічні властивості позиційної системи з пропорційним регулятором швидкості електроприводу та еталонною моделлю є кращими ніж типової системи з пропорційно-інтегральним регулятором швидкості,

враховуючи приблизно в 2 рази вищу швидкодію реагування на стрибок задання та на 26 % менше динамічне змінення кута повороту вала двигуна за умови накиду навантаження.

2. Система з пропорційним регулятором швидкості та еталонною моделлю є більш чутливою до змін основних параметрів за винятком приблизно однакової чутливості до змінювання коефіцієнта пропорційного позиційного регулятора.

3. Корекція сигналу позиційного задання у функції першої та другої похідної від цього сигналу забезпечує реагування типової системи на сигнал задання зі швидкодією, практично однаковою з порівняною системою з еталонною моделлю, але така система стає більш чутливою ніж вихідна типова система до змінення усіх основних параметрів системи регулювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коцегуб П.Х., Толочко О.І., Светличний А.В., Губарь Ю.В. Система позиционного электропривода с задатчиком положения // Известия вузов. Электромеханика. – 1982. – № 3. – С. 331–337.
2. Gross H. Electrical feed drives in automation / H. Gross, J. Hamann, G. Wiegärtner. – Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2001. – 336 p.
3. Лукас В.А. Теория управления техническими системами. – Екатеринбург: Изд-во УГТГА, 2002. – 675 с.
4. Коцегуб П.Х. Синтез вентильных приводов постоянного тока. – Київ: ІЗМН, 1997. – 122 с.
5. Riefenstahl U. Elektrische Antriebssysteme. – Wiesbaden: Teubner, 2006. – 443 p.
6. Кокотович П. Метод точек чувствительности в исследовании и оптимизации линейных систем управления // Автоматика и телемеханика, 1964. – Том XXV. – № 12. – С. 1670–1676.
7. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – Москва: Наука, 1981. – 464 с.
8. Толочко О.І. Аналіз та синтез електро-механічних систем зі спостерігачами. – Донецьк: Норд-Прес, 2004. – 298 с.
9. Толочко О.І., Старостин С.С., Коцегуб П.Х. Использование метода траекторной чувствительности при исследовании систем управления электромеханическими объектами // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Електротехніка, електроніка та електропривод». Тем. випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 30. – С. 99–102.
10. Unbehauen H. Regelungstechnik II. Zustandsregelung, digitale und nichtlineare Regelsysteme. – Braunschweig: Vieweg, 1993. – 274 p.

DYNAMIC PROPERTIES AND TRAJECTORY SENSITIVITY OF VARIANTS OF POSITION ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

S. Starostin, L. Rotkevich

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: sergii.starostin7@gmail.com

Relevance. Positional electromechanical systems are essential for an automation of technological processes. The existing approach to the implementation of such systems consists in the generating of motion trajectory, which has to track the positional electric drive. Usually, positional systems perform with proportional-integral speed control of an electric drive, subordinated to the proportional position controller. Such system can be referred as typical one. As other approach is the variant of the alternative position system with the reference model of the control loop and the proportional speed controller. Based on the properties of cascade control, such system will have less response time, which is important to ensure a reduction in the tracking transient error. But it hasn't any comparative information about dynamic properties of these systems. **Purpose.** The research is carried out to analyze the dynamic properties of variants of positional electromechanical systems, including the sensitivity evaluation to parameter changing of control systems. **Methodology.** The analysis and simulation of systems is performed using mathematical description of systems in the state space observable form. Such approach gives the possibility to scale the results for visualization. The parameters of speed and position controllers were determined with the help of the modulus criterion of optimization. **Results.** It has been determined that a typical system with a proportional-integral speed controller for an electric drive has worse dynamic characteristics. The computer simulation demonstrates that the alternative system has the response time approximately in 2 times better, and the maximum of dynamic error at the load step increasing is less on 26 % than in the typical system. Also the dynamics quantities have been evaluated based on the trajectory sensitivity of both systems. As a result, the lower sensitivity to changing in the main parameters was obtained for the typical system. An exception is the position control coefficient, the sensitivity to changing of which is approximately the same in both cases. It is noted that the correction of positional reference signal as a function of the first and second derivatives of this signal provides the typical system reference performances almost the same as for the system with the reference model, but the system becomes more sensitive to parameter changes. **Practical value.** The research results provide a basis for variant choice of the positional system for practical application, depending on the requirements of technological process. References 10, figures 7.

Key words: electromechanical systems, positioning, dynamic properties, sensitivity.

REFERENCES

1. Kotsegub, P., Tolochko, O., Svetlichnyi, A. and Hubar, J. (1982), "System of a positional electrical drive with a position set-pointer", *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, no. 3, pp. 331–337. (in Russian)
2. Gross, H., Hamann, J. and Wiegärtner, G. (2001), "Electrical feed drives in automation", Publicis Corporate Publishing, Erlangen.
3. Lukas, V.A. (2002), *Teoriya upravleniya tekhnicheskimi sistemami* [Control theory of technical systems], UGGGA Publishing, Yekaterinburg. (in Russian)
4. Kotsegub, P.Kh. (1997), *Sintez ventilnikh privodiv postynogo strumu* [Synthesis of SCR DC drives], IZMN Publishing, Kyiv. (in Ukrainian)
5. Riefenstahl, U. (2006), "Elektrische Antriebs-systeme", Teubner, Wiesbaden.
6. Kokotovitch, P. (1964), "Method of sensitivity points in the research and optimization of linear control systems", *Avtomatika i telemekhanika*, Vol. XXV, no. 12, pp. 1670–1676. (in Russian)
7. Rozenwasser, E. and Yusupov, R. (1981), *Chuvstvitel'nost sistem upravleniya* [Sensitivity of control systems], Nauka, Moscow. (in Russian)
8. Tolochko, O.I. (2004), *Analiz ta sintez elektromekhanichnikh sistem zi sposterigachami* [Analysis and the synthesis of electromechanical systems with state-space observers], Nord, Donetsk. (in Ukrainian)
9. Tolochko, O., Starostin, S. and Kotsegub, P. (2008), "Application of the method of trajectory sensitivity to the research of control systems for electromechanical objects", *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universitetu "Kharkivskii Politekhichnyi Instytut". Seriya "Elektrotekhnika, elektronika ta elektropryvod". Tematychnyi vypusk "Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka"*, Vol. 30, pp. 99–102. (in Russian)
10. Unbehauen, H. (1993), "Regelungstechnik II. Zustandsregelung, digitale und nichtlineare Regelungssysteme", Vieweg, Braunschweig.

Стаття надійшла 18.10.2018.