

УДК 621.3.01

МЕТОД СИНТЕЗУ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СЛІДКУВАЛЬНИХ СИСТЕМ**Б.І. Кузнецов**^{1*}, докт. техн. наук, **А.М. Туренко**^{2**}, докт. техн. наук, **Т.Б. Нікітіна**^{2***}, докт. техн. наук, **І.В. Бовдуй**^{1****}, канд. техн. наук, **В.В. Коломієць**^{2*****}, канд. техн. наук¹ – Інститут технічних проблем магнетизму НАН України,
вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна,
e-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com² – Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна

Розроблено метод багатокритеріального синтезу нелінійних робастних електромеханічних слідкувальних систем з параметричною невизначеністю. Матриці коефіцієнтів підсилення нелінійних зворотних зв'язків регулятора та нелінійного спостерігача визначаються на основі рішень рівнянь Гамільтона – Якобі – Беллмана – Айзекса. Вектор мети робастного керування визначається на основі рішення задачі векторного нелінійного програмування, в якій компонентами векторної цільової функції є прями показники якості, які пред'являються до системи в різних режимах роботи. Наведено результати моделювання та експериментальних досліджень динамічних характеристик синтезованої нелінійної електромеханічної слідкувальної системи. Бібл. 10.

Ключові слова: нелінійна робастна електромеханічна слідкувальна система, багатокритеріальний синтез, динамічні характеристики.

Вступ. Наявність в електромеханічних слідкувальних системах пружних елементів між приводним двигуном і робочим органом, невизначеність параметрів об'єктів керування, зміна масоінерційних характеристик, складні кінематичні схеми, невідомі зовнішні й внутрішні збурення [1] не дають змоги отримувати потенційно високі динамічні характеристики, які притаманні сучасним електромеханічним системам [2–4]. До слідкувальних систем висуваються різноманітні вимоги у разі їх роботи в різних режимах. Як правило, накладаються певні обмеження на якість перехідних процесів – задаються час першого узгодження, час регулювання, перерегулювання. Також задається максимальна дисперсія помилки стеження або стабілізації у разі випадкових задавальних і збурюючих дій [1]. Метод багатокритеріального синтезу лінійних регуляторів для лінійних слідкувальних систем розроблено в [5]. Проте динамічні характеристики синтезованих систем значною мірою визначаються нелінійностями елементів об'єкта керування. В режимі малих швидкостей руху вала двигуна і робочого органу показники якості визначаються моментами тертя на валах двигуна і робочого органу. А в режимі великих переміщень у разі розгону двигуна від нульової до номінальної швидкості показники якості визначаються обмеженнями за моментом двигуна і максимальною швидкістю обертання вала двигуна. Тому розробка методу синтезу нелінійних регуляторів для керування нелійними невизначеними об'єктами так, щоб синтезована система задовольняла низці критеріїв, які пред'являються до її роботи у різних режимах, є актуальною задачею.

Метою роботи є розробка методу багатокритеріального синтезу нелінійних електромеханічних слідкувальних систем, які задовольняють пропонованим вимогам у різних режимах роботи системи з урахуванням невизначеності параметрів об'єкта керування.

Метод синтезу. Запишемо нелінійну модель дискретного об'єкта робастного керування багатомасової електромеханічної слідкувальної системи з вектором стану x_k у вигляді різницевого рівняння стану:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, \omega_k, \eta_k), \quad (1)$$

де u_k – вектор керування; ω_k і η_k – вектори зовнішніх сигнальних і параметричних збурень; f – нелінійна функція.

© Кузнецов Б.І., Туренко А.М., Нікітіна Т.Б., Бовдуй І.В., Коломієць В.В., 2019

ORCID ID: * <http://orcid.org/0000-0002-1100-095X>; ** <http://orcid.org/0000-0002-5773-1846>;*** <http://orcid.org/0000-0002-9826-1123>; **** <http://orcid.org/0000-0003-3508-9781>;***** <http://orcid.org/0000-0002-9073-5793>

У математичній моделі (1) враховуються нелінійні залежності тертя на валах приводного двигуна, редуктора і робочого органу, люфти між зубцями ведучої і веденої шестерні, обмеження за керуванням, струмом, моментом і швидкістю обертання двигуна, а також зміни моменту інерції об'єкта керування.

Задачею синтезу є визначення такого регулятора, який на підставі вимірюного виходу вихідної системи

$$y_k = Y(x_k, \omega_k, u_k) \quad (2)$$

формує керування u за допомогою динамічної системи, що описується рівнянням стану і виходу:

$$\xi_{k+1} = f(\xi_k, u_k, \omega_k, \eta_k) + \sum_{i=1}^3 G_i (y_k - Y(\xi_k, \omega_k, u_k)); \quad (3)$$

$$u_k = \sum_{i=1}^3 U_i(\xi_k, y_k), \quad (4)$$

де i – порядок форм G_i і U_i .

Синтез робастного регулятора (4) зводиться до визначення матриць форм U_i коефіцієнтів підсилення регулятора [3], який мінімізує норму вектора цілі

$$z_k = \sum_{i=2}^4 Z_i(x_k, u_k, \eta_k), \quad (5)$$

за вектором керування u_k , але максимізує цю ж норму за вектором невизначеності об'єкта керування η_k для найгіршого випадку (worst – case disturbance) [7].

Синтез робастного спостерігача (3) зводиться до визначення матриць форм G_i , коефіцієнтів підсилення спостерігача [6], який мінімізує норму вектора помилки відновлення вектора стану x_k вихідної нелінійної системи (1), але максимізує цю ж норму вектора помилки за вектором невизначеності об'єкта керування η_k і вектором зовнішніх сигнальних впливів ω_k , що також відповідає найгіршому випадку (worst – case disturbance) [8].

Матриці коефіцієнтів форм підсилення регулятора U_i і спостерігача G_i знаходяться з наближених рішень рівнянь Гамільтона – Якобі – Беллмана – Айзекса [9], причому матриці лінійних форм U_1 і G_1 знаходяться з рішень чотирьох рівнянь Ріккати, що відповідає стандартному «4 – Ріккати» підходу до синтезу лінійних робастних або анізотропних регуляторів [5].

Синтезована система у вигляді нелінійного об'єкта керування (1), який замкнутий робастним регулятором (4), (5), має певні динамічні характеристики, що визначаються моделлю об'єкта керування вихідної системи (1), зовнішніми параметричними збуреннями, параметрами вимірювальних пристроїв (6) і вектором цілі (7). Для коректного визначення вектора цілі (7) введемо вектор шуканих параметрів $\chi = \{Z_i(x_k, u_k, \eta_k)\}$, компонентами якого є шукані вагові матриці норм $Z_i(x_k, u_k, \eta_k)$. Введемо векторну цільову функцію, компонентами якої $F_i(\chi)$ є прямі показники якості, які висуваються до системи в різних режимах її роботи, а саме час першого узгодження, час регулювання, перерегулювання та ін. у наступному виді:

$$F(\chi) = [F_1(\chi), F_2(\chi) \dots F_m(\chi)]^T. \quad (6)$$

Для обчислення векторів цільової функції (6) і обмежень на змінні стану та керування виконується моделювання вихідної нелінійної системи (1), яка замкнута синтезованим нелінійним регулятором (2)...(4) у різних режимах роботи, за різних вхідних сигналів і різних значень параметрів об'єкта керування [5].

Для знаходження рішення багатокритеріальної задачі (6) з парето-оптимальних рішень з урахуванням відносин переваг побудовано алгоритм стохастичної мультиагентної оп-

тимізації на основі безлічі роїв частинок [9], причому кількість роїв дорівнює кількості компонентів m векторного критерію (6). Рух i -ї частинки j -го рою описується такими виразами:

$$v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) [y_j^*(t) - x_{ij}(t)]; \quad (7)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (8)$$

де $x_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ – положення і швидкість i -ї частинки j -го рою.

Тут $y_{ij}(t)$ і y_j^* найкращі локальне і глобальне положення i -ї частинки, які знайдені відповідно тільки однією i -ю частинкою і всіма частинками j -го рою. Позитивні константи c_1 і c_2 , випадкові числа $r_{1j}(t)$ і $r_{2j}(t)$, коефіцієнти інерції w_j і функції перемикування H є параметрами алгоритму, які настраюються [3].

Результати комп'ютерного моделювання. Наведемо результати дослідження динамічних характеристик і чутливості до зміни параметрів об'єкта керування нелінійної двомасової електромеханічної системи [5] з синтезованими нелінійними робастними регуляторами. В існуючій системі використовуються ПД регулятори, які реалізовані за допомогою гіроскопічного датчика кута та гіроскопічного датчика кутової швидкості, оскільки введення інтегральної складової призводить до виникнення незгасаючих коливань у режимі відпрацювання заданих кутів положення робочого органу, що обумовлено наявністю сухого тертя на валах приводного двигуна і робочого органу [1]. За допомогою синтезованих нелінійних робастних регуляторів вдалося забезпечити стійку роботу системи з урахуванням всіх істотних нелінійностей, які притаманні елементам цієї системи, у разі введення в контур керування двох інтегруючих ланок. Така синтезована нелінійна робастна система має астатизм 2-го порядку і з урахуванням всіх нелінійностей і моменту інерції робочого органу, який змінюється в ході роботи системи, дала змогу більш ніж у 3,7 разу підвищити плавність руху об'єкта керування у разі наведення на малих швидкостях. Плавність руху визначається максимальним відхиленням положення об'єкта керування від заданого у разі його руху на малій швидкості. Зауважимо, що цей показник значною мірою визначає потенційну точність роботи електромеханічної слідкувальної системи в одному з найбільш відповідальних режимів її роботи. Крім того, наявність астатизму другого порядку дала змогу суттєво зменшити помилку системи у типовому режимі роботи у разі слідкування за об'єктами, що рухаються з постійною швидкістю.

Застосування синтезованих нелінійних робастних регуляторів дало змогу також зменшити більш ніж у 5,3 разу час перехідних процесів у режимі відпрацювання малих кутів у порівнянні з існуючою системою. Причому у разі зміни моменту інерції робочого механізму на 30 %, час першого узгодження, час регулювання та перерегулювання перехідних процесів змінюються менш ніж на 5 %.

Синтезована система дала змогу також у 2,7...3,3 разу зменшити помилку відпрацювання гармонічних впливів заданого діапазону частот, у 2,5...3,8 разу зменшити помилку компенсації випадкової зміни моменту зовнішніх збурень, що підвищило ефективність роботи системи, яка встановлена на основі, що рухається нерівною поверхнею з заданою швидкістю і заданими параметрами нерівностей поверхні.

Крім того, за допомогою синтезованих нелінійних регуляторів загальні коефіцієнти підсилення зворотних зв'язків за змінними стану розподіляються між лінійними, квадратичними та кубічними формами, що дає змогу зменшити окремі коефіцієнти підсилення і завдяки цьому спростити реалізацію системи.

Результати експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних досліджень розроблено макет двомасової електромеханічної системи. Він складається з двох електричних машин, вали яких з'єднані пружним елементом. Параметри його підібрані таким чином, щоб власні частоти механічних пружних коливань макета збігалися з експериментально отриманими механічними коливаннями реальної системи. За допомогою другої машини імітується момент збурення, який діє на робочий орган системи. Для різних режимів роботи системи цей момент збурення має ступеневий, лінійно зростаючий, гармонічний або випадковий вид. Відхилення динамічних характеристик, отриманих експериментально на макеті

для різних режимів роботи слідкувальної системи, не перевищує 7 % відносно комп'ютерного моделювання. Також були проведені експериментальні дослідження повномасштабного стенду електромеханічної слідкувальної системи, які в цілому підтвердили правильність результатів комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень макета системи.

Висновки. 1. Розроблено метод багатокритеріального синтезу нелінійних робастних регуляторів для керування нелійними багатомасовими електромеханічними слідкувальними системами з параметричною невизначеністю на основі вибору вектора цілі робастного керування шляхом вирішення відповідної задачі багатокритеріального нелінійного програмування, в якій компонентами вектора цільової функції є прямі показники якості, що висуваються до системи в різних режимах її роботи. Обчислення векторної цільової функції і обмежень носить алгоритмічний характер і пов'язане з синтезом нелінійних робастних регуляторів і моделюванням синтезованої замкнутої системи для різних режимів роботи, за різних вхідних сигналів і для різних значень параметрів об'єкта керування.

2. Синтез нелінійних робастних регуляторів і нелінійних робастних спостерігачів зводиться до вирішення системи рівнянь Гамільтона – Якобі – Беллмана – Айзекса, в яких матриці лінійних зворотних зв'язків і матриці коефіцієнтів підсилення лінійних спостерігачів знаходяться з рішень чотирьох рівнянь Ріккати, що відповідає стандартному «4–Ріккати» підходу до синтезу лінійних робастних регуляторів.

3. Результати досліджень динамічних характеристик синтезованої слідкувальної електромеханічної системи показали, що застосування синтезованих нелінійних робастних регуляторів дало змогу підвищити плавність руху об'єкта керування у разі наведення на малих швидкостях більше ніж у 3,7 разу, зменшити час перехідних процесів у режимі відпрацювання малих кутів більше ніж у 5,3 разу, зменшити помилку відпрацювання гармонічних впливів заданого діапазону частот у 2,7...3,3 разу та знизити чутливість системи до зміни параметрів об'єкта керування порівняно з існуючою системою.

4. Подальше підвищення точності синтезованої слідкувальної електромеханічної системи можливо отримати у разі відновлення за допомогою спостерігача вектора невизначених параметрів об'єкта керування і вектора зовнішніх сигнальних збурень та побудови на їх основі комбінованої системи керування.

1. Александров Е.Е., Богаенко И.Н., Кузнецов Б.И. Параметрический синтез систем стабилизации танкового вооружения. Київ: Техніка, 1997. 112 с.
2. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пашин М.О., Васюк В.В. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 83–88.
3. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Романенко В.І., Білик О.А. Розрахункове дослідження асинхронних генераторів з двома статорними обмотками в складі зварювальних комплексів з широтно-імпульсними регуляторами струму. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 83–84.
4. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinsky N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 48–56.
5. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Татарченко М.О., Хоменко В.В. Многокритериальный синтез анизотропных регуляторов многомассовых электромеханических систем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 105–107.
6. Wilson J. Rugh Nonlinear System Theory. The Volterra Wiener Approach. The Johns Hopkins University Press, 2002. 330 p.
7. Ray S., Lowther D.A. Multi-objective optimization applied to the matching of a specified torque-speed curve for an internal permanent magnet motor. *Magnetics, IEEE transactions*. 2009. No. 45. Pp. 1518–1521.
8. Ren Z., Pham M.-T., Koh C.S. Robust global optimization of electromagnetic devices with uncertain design parameters: comparison of the worst case optimization methods and multiobjective optimization approach using gradient index. *Magnetics, IEEE transactions*. 2013. No. 49. Pp. 851–859.
9. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. Cambridge University Press, 2009. 504 p.
10. William M. McEneaney. Max-plus methods for nonlinear control and estimation. Birkhäuser Boston Basel Berlin, 2006. 256 p.

УДК 621.3.01

Б.И. Кузнецов¹, докт. техн. наук, **А.Н. Туренко²**, докт. техн. наук, **Т.Б. Никитина²**, докт. техн. наук, **И.В. Бовдуй¹**, канд. техн. наук, **В.В. Коломиец²**, канд. техн. наук¹ – Институт технических проблем магнетизма НАН Украины,
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина² – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, 61002, Украина**МЕТОД СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ**

Разработан метод многокритериального синтеза нелинейных робастных электромеханических следящих систем с параметрической неопределенностью. Матрицы коэффициентов усиления нелинейных обратных связей регулятора и нелинейного наблюдателя определяются на основе решений уравнений Гамильтона – Якоби–Беллмана – Айзекса. Вектор цели робастного управления определяется на основе решения задачи векторного нелинейного программирования, в которой компонентами векторной целевой функции являются прямые показатели качества, предъявляемые к системе в различных режимах работы. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований динамических характеристик синтезированной нелинейной электромеханической следящей системы. Библ. 10.

Ключевые слова: нелинейная робастная электромеханическая следящая система, многокритериальный синтез, динамические характеристики.

B.I. Kuznetsov¹, **A.N. Turenko²**, **T.B. Nikitina²**, **I.V. Bovdуй¹**, **V.V. Kolomiets²**,¹ – Institute of Technical Problems of Magnetism National Academy of Sciences of Ukraine,
19, Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine² – Kharkiv National Automobile and Highway University,
25, Yaroslava Mudrogo st., Kharkiv, 61002, Ukraine**METHOD OF SYNTHESIS OF NONLINEAR ELECTROMECHANICAL SERVO SYSTEMS**

A method of multiobjective synthesis of nonlinear robust electromechanical servo systems with parametric uncertainty is developed. Matrices of the nonlinear feedbacks regulator and the nonlinear observer are determined on the basis of the Hamilton-Jacobi-Bellman-Isaacs equations solutions. The goal vector of robust control is determined on the basis of the vector nonlinear programming problem solution, the vector objective function components are the direct quality indicators that are presented to the system in different modes of operation. The results of modeling and experimental research of the dynamic characteristics of a synthesized nonlinear electromechanical servo system are presented. References 10.

Key words: nonlinear robust electromechanical servo system, multiobjective synthesis, dynamic characteristics.

1. Aleksandrov E.E., Bogaenko I.N., Kuznetsov B.I. Parametric synthesis of tank weapon stabilization systems. Kyiv: Tekhnika, 1997. 112 p. (Rus)
2. Kondratenko, I.P., Zhylytsov, A.V., Pashchyn, N.A., Vasyuk, V.V. Selecting induction type electromechanical converter for electrodynamic processing of welds. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 83–88 (Rus).
3. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Romanenko V.I., Bilyk O.A. Numerical investigation of induction generators with two stator windings in welding complexes with pwm current regulators. *Technical Electrodynamics*. 2012. No 3. Pp. 83–84. (Ukr)
4. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinskyi N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 2. C. 48–56.
5. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Tatarchenko M.O., Khomenko V.V. Multicriterion anisotropic regulators synthesis by multimass electromechanical systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2014. No 4. Pp. 105–107 (Rus).
6. Wilson J. Rugh. *Nonlinear System Theory. The Volterra Wiener Approach*. The Johns Hopkins University Press, 2002. 330 p.
7. Ray S., Lowther D.A. Multi-objective optimization applied to the matching of a specified torque-speed curve for an internal permanent magnet motor. *Magnetics, IEEE transactions*. 2009. No 45. Pp. 1518–1521.
8. Ren Z., Pham M.-T., Koh C.S. Robust global optimization of electromagnetic devices with uncertain design parameters: comparison of the worst case optimization methods and multiobjective optimization approach using gradient index. *Magnetics, IEEE transactions*. 2013. No 49. P. 851–859.
9. Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 2009. 504 p.
10. William M. McEneaney. *Max-plus methods for nonlinear control and estimation*. Birkhauser Boston Basel Berlin, 2006. 256 p.

Надійшла 21.12.2018

Recieved 21.12.2018