

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

Обруч Ігор Володимирович

УДК 681.511.4

ДИСЕРТАЦІЯ

СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ ТА ФРИКЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи
14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

*Ідентичність як змісту
с корисним припущенням
дисертації як свідую.*

Вчений секретар спе-

*сіалізації Харківського
політехнічного інституту*

05.09.04

Володимир В.В.

10.01.2019



І. В. Обруч

Науковий керівник
Клепиков Володимир Борисович,
доктор технічних наук,
професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Обруч І. В. Синтез електромеханічних систем з нейронною мережею та фрикційним навантаженням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, Харків, 2019.

Дисертацію присвячено синтезу одномасових та двомасових електромеханічних систем з нейронною мережею типу персептрон (PERCEPTRON) і фрикційним навантаженням, яке у реальних електроприводах носить нелінійний характер. Таке навантаження в електромеханічних системах може проявлятися у вигляді фрикційних автоколивань. Фрикційні автоколивання – особливий режим роботи електроприводу, що негативно позначається на його функціонуванні. Цей режим може виникати, за певних умов (буксування, юз, просковзування), у різних електроприводах машин і механізмам, наприклад, обтискні прокатні стани, шахтні й магістральні локомотиви, поздовжньо-фрезерні, зубофрезерні, горизонтально-розточувальні, шліфувальні, токарські верстати, механізми переміщення кранів і ін. При цьому, такий режим роботи електроприводів погіршує якість технологічного процесу (точність і чистоту оброблюваної поверхні деталі), точність позиціонування, призводять до збільшення втрат в електроприводі, а, іноді, до поломок кінематичних ланок.

Існують різні способи усунення фрикційних автоколивань в електроприводі, які мають ті або інші переваги і недоліки. У даній роботі, на основі проведених досліджень, запропоновано нову методику усунення фрикційних автоколивань і поліпшення динамічних властивостей електромеханічних систем за допомогою нейрорегуляторів, які побудовані на базі багат шарових прямоспрямованих нейронних мереж типу персептрон.

Для застосування нейронних мереж у якості регуляторів електромеханічних систем їх необхідно навчати. Процес навчання може бути реалізовано за допомогою різних методів, наприклад, методів зворотного поширення помилки або генетичного алгоритму. Для навчання нейронних мереж для роботи у складі систем керування, раніш зазначених типів електроприводів, запропоновано використовувати метод генетичного алгоритму. В зв'язку з цим, була розроблена нова модифікація середньоквадратичного критерію навчання нейронних мереж. Відмінність запропонованої модифікації від класичного критерія середньоквадратичного відхилення полягає в тому, що в підінтегральній вираз добувається фактор часу, при цьому, таке модифікування дозволило зменшити час навчання нейронної мережі та поліпшити динамічні та статичні показники роботи одно- та двомасових електромеханічних систем, які в розімкнутому стані нестійкі, або в цих системах виникають автоколивання.

Методика синтезу нейромережевих регуляторів електромеханічних систем спочатку була розроблена для систем, лінеаризованих у точці статичної рівноваги. Обґрунтовано вибір структури і методу навчання нейронної мережі, вибір зворотних зв'язків автоматизованої системи управління, отримані математичні моделі одномасової і двухмассовой електромеханічних систем з нейромережевим регулятором в безрозмірних узагальнених параметрах. Проведено аналіз впливу параметрів об'єкта управління на динамічні режими роботи синтезованих одно- і двомасових електромеханічних систем з нейронною мережею.

Далі, у дисертаційній роботі обґрунтовано вибір структури і методу навчання нейронної мережі, вибір зворотних зв'язків автоматизованої системи управління, отримані математичні моделі одномасової і двухмассовой електромеханічних систем з нейромережевим регулятором в безрозмірних узагальнених параметрах з урахуванням нелінійності механічної характеристики навантаження. Проведено аналіз впливу параметрів об'єкта управління на динамічні режими роботи синтезованих одно- і двомасових електромеханічних систем з нейронною мережею. Слід зауважити, що електромеханічні системи з нейрон-

ною мережею, яка побудована без урахування нелінійності механічної характеристики навантаження, можуть не потребувати її перенавчання, оскільки, регулятори, побудовані на базі нейронних мереж, мають властивості (наприклад, здатність до навчання, узагальнення, універсальної апроксимації), яких не мають класичні П-, ПІ- та ПІД-регулятори.

Розроблена методика апробована на прикладах синтезу різних електроприводів постійного і змінного струму конкретних машин і механізмів з нелінійною характеристикою навантаження. При цьому використовувалися реальні дані приводів, таких як електропривод подачі токарного верстату з двигуном постійного струму незалежного збудження, в якому виникають зривні автоколювання, електропривод рудникового електровозу АРП14 з двигуном послідовного збудження, позиціонуючий електропривод стрілочного переводу СП-6 з двигуном послідовного збудження, а також електропривод з асинхронним двигуном. Крім цього, була розроблена нейромережева система керування лінійним двигуном електромагнітного типу та побудовано відповідний лабораторний стенд, на якому є можливість порівняти роботу класичних систем керування з нейромережевими.

Наведені в дисертаційній роботі приклади пов'язані з виконанням бюджетних тем за планами МОН України і ініціативної тематики за запитамі підприємств. Показана ефективність використання нейронних мереж для широкого різноманіття електроприводів машин і механізмів. В роботі вирішена важлива науково-практична задача усунення фрикційних автоколювань першого і другого роду за рахунок використання нейронних мереж та створеної методики їх синтезу.

Ключові слова: електропривод, електромеханічна система, нейронна мережа, активаційна функція, генетичний алгоритм, нелінійне фрикційне навантаження.

Список опублікованих праць:

1. Клепиков В. Б., Осичев А. В., Донець Ю. Г., Клепиков А. В., Обруч І. В. Формы автоколебаний в электромеханических системах с отрицательным вяз-

ким трением. Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье», (Харьков, 30 – 31 мая 1996). Харьков: ХГПУ, 1996. Ч. 1. С. 83 – 84.

2. Клепиков В. Б., Махотило К. В., Обруч И. В., Осичев А. В., Наджи Камаль. Нейронное управление электромеханической системой с отрицательным вязким трением. Тр. конф. с междунар. участием «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», (Алушта, 16 – 21 сентября 1996). Харьков: Основа, 1996. С. 283 – 286.

3. Клепиков В. Б., Махотило К. В., Обруч И. В. Синтез нейросетевой системы управления одномассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при ограничении координат электропривода. Тр. конф. с междунар. участием «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», (Алушта, 15 – 20 сентября 1997). Харьков: Основа, 1997. С. 19 – 21.

4. Клепиков В. Б., Обруч И. В., Осичев А. В., Дипак Кумар. Синтез устойчивых двухмассовых электромеханических систем с отрицательным вязким трением с заданным быстродействием. Вестник Харьковского государственного политехнического института. Спец. выпуск. Харьков: ХГПУ. 1998. С. 46 – 48.

5. Клепиков В. Б., Махотило К. В., Обруч И. В., Наджи Камаль. Нейросетевая система управления двухмассовой электромеханической системой с отрицательным вязким трением. Вестник Харьковского государственного политехнического института. Спец. выпуск. Харьков: ХГПУ. 1998. С. 378 – 380.

6. Клепиков В. Б., Сергеев С. А., Махотило К. В., Обруч И. В. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами. Электротехника. Москва: Изд. «Знак». 1999. № 5. С. 2 – 6.

7. Клепиков В. Б., Обруч И. В. Исследование влияния вида активационной функции на показатели качества регулирования электромеханической системы при нейроконтроллерном управлении. Вестник Харьковского государст-

венного политехнического института. Харьков: ХГПУ, 2000. Вып. 113. С. 369 – 371.

8. Обруч И. В. Выбор размера скрытого слоя нейроконтроллера при управлении электромеханической системой с отрицательным вязким трением. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. Вып. 10. С. 435 – 437.

9. Обруч И. В. Нейросетевое управление двухмассовой электромеханической системой с зазором в кинематических передачах. Вестник Национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Т. 1, Харьков: НТУ «ХПИ». 2002. № 5, С. 302 – 304.

10. Обруч И. В. Влияние параметров одномассовой электромеханической системы с нейроконтроллером на точность регулирования. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Харьков: НТУ «ХПИ». 2004. Вып. 43. С. 185 – 187.

11. Клепиков В. Б., Асмолова Л. В., Обруч И. В. Устранение нейрору́правления срывных фрикционных автоколебаний в электромеханических системах с зазором. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Харьков: НТУ «ХПИ». 2005. Вып. 45. С. 489 – 492.

12. Клепиков В. Б., Асмолова Л. В., Обруч И. В. Влияние параметров электромеханической системы с нейрору́правлением, предотвращающим срывные фрикционные автоколебания, на ее динамические показатели. Электромашиностроение и электрооборудование (Одесский национальный политехнический университет). Киев: Техника. 2006. Вып. 66. С. 374 – 377.

13. Клепиков В. Б., Асмолова Л. В., Обруч И. В. Срывные фрикционные автоколебания в электромеханических системах и их устранение. Технічна електродинаміка. Київ: ІЕД НАНУ. 2007. № 2. С. 35 – 41.

14. Буряковский С. Г., Обруч И. В., Смирнов В. В. Системы скалярного и нейросетевого управления электроприводом стрелочного перевода. Вісник На-

ціонального технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ», 2010, № 28. С. 574 – 576.

15. Обруч И. В., Кутовой Ю. Н. Замкнутые системы управления электроприводом с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения на базе нейронных сетей. Вестник Национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков: НТУ "ХПИ". 2013. № 36 (1009). С. 488 – 490.

16. Обруч И. В., Кутовой Ю. Н. Нейросетевая система управления электропривода электровоза. Электротехнические и компьютерные системы. Киев: Техника. 2014. № 15 (91). С. 132 – 135.

17. Обруч И. В. Хорева А. В. Новая модель двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Харьков: НТУ «ХПИ». 2015. Вып. 12 (1121). С. 160 – 163.

18. Обруч И. В., Кутовой Ю. Н. Нейросетевая система управления электропривода электровоза АРП14 с учетом упругости кинематических связей. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Харьков: НТУ «ХПИ». 2015. Вып. 12 (1121). С. 248 – 250.

19. Обруч И. В., Кутовой Ю. Н. Нейросетевая система управления тяговым электроприводом переменного тока трамвая. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Харьков: НТУ «ХПИ». 2017. Вып. 27 (1249). С. 436 – 439.

20. Kutovoi Yurii N., Obruch Ihor V., Kunchenko Tatiana Yu. Development of control systems for movement mechanisms of electric drives based on neural networks. Acta Technica. Institute of Thermomechanics CAS, v.v.i. Praha: Czech Academy of Sciences. Czech Republic. 2018. Vol. 63. № 5. P. 641 – 655.

ANNOTATION

Obruch I. V. Synthesis of electromechanical systems with a neural network and frictional loading. – Qualification scientific manuscript copyright.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems" – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2018.

The dissertation is devoted to the synthesis of one-mass and two-mass electromechanical systems with perceptron type neural network (PERCEPTRON) and frictional load, which in real electric drives is nonlinear. Such a load in electromechanical systems can be manifested in the form of frictional self-oscillations. Frictional self-oscillation is a special mode of operation of the electric drive, which negatively affects its functioning. This mode may occur under certain conditions (pushing, pushing, slipping), in various electric drives of machines and mechanisms, for example, compressive rolling mills, mine and main locomotives, longitudinal milling, milling machines, horizontal boring, grinding, turning machines, mechanisms moving cranes, etc. At the same time, such a mode of operation of electric drives impairs the quality of the technological process (accuracy and purity of the processed surface of the part), the accuracy of positioning, leads to an increase in losses in the electric drive, and, sometimes, to breakdowns of kinematic links.

There are various ways to eliminate frictional self-oscillations in an electric drive that have certain advantages or disadvantages. In the given work, on the basis of the conducted researches, the new method of elimination of frictional self-oscillations and improvement of dynamic properties of electromechanical systems with the help of neuro-regulators, which are constructed on the basis of multilayer straight-line neural networks of type perceptron is offered.

To use neural networks as regulators of electromechanical systems, they need to be taught. The learning process can be implemented using various methods, such as reverse error propagation techniques or a genetic algorithm. To train neural net-

works for work in the control systems, earlier mentioned types of electric drives, it is proposed to use the method of genetic algorithm. In this regard, a new modification of the mean-square criterion for training neural networks was developed. The difference between the proposed modification and the classical criterion of the mean square deviation is that the time factor is included in the subunit expression, while this modification allowed to reduce the training time of the neural network and to improve the dynamic and static performance of one- and two-mass electromechanical systems that are unstable in the open state, or there are self-oscillations in these systems.

The method of synthesis of neural network regulators of electromechanical systems was originally developed for systems linearized at the point of static equilibrium. The choice of the structure and method of teaching the neural network, the choice of feedback links of the automated control system, the mathematical models of onemass and twomass electromechanical systems with a neural network controller in dimensionless generalized parameters are obtained. The analysis of the influence of the parameters of the control object on the dynamic modes of the synthesized single- and double-mass electromechanical systems with the neural network is carried out.

Further, the choice of the structure and method of teaching the neural network, the choice of feedback links of the automated control system, the mathematical models of one-mass and two-mass electromechanical systems with a neural network controller in dimensionless generalized parameters taking into account the nonlinearity of the mechanical load characteristics are obtained. The analysis of the influence of the parameters of the control object on the dynamic modes of the synthesized single- and double-mass electromechanical systems with the neural network is carried out. It should be noted that electromechanical systems with a neural network, which are constructed without regard to the nonlinearity of the mechanical characteristics of the load, may not need to be re-taught because regulators built on the basis of neural networks have properties (for example, the ability to study, generalization, universal approximation), which do not have classical P-, PI- and PID-regulators.

The developed method is tested on the examples of synthesis of various electric drives of constant and alternating current of specific machines and mechanisms with nonlinear load characteristics. It used real data of drives, such as the electric drive of a lathe with a DC motor of independent excitation, in which there are breakdown oscillations, an electric drive of the mine electric locomotive ARP14 with a motor of successive excitation, a positioning electric drive of the switching of the SP-6 with the engine of successive excitation, and also the electric drive with an asynchronous motor. In addition, a neural network control system for a linear motor of an electromagnetic type was developed and an appropriate laboratory bench was built on which it is possible to compare the work of classical control systems with neural networks.

The examples presented in the dissertation are related to the implementation of budget themes under the plans of the Ministry of Education and Science of Ukraine and the initiative subjects on the requests of enterprises. The efficiency of using neural networks for a wide variety of electric drives of machines and mechanisms is shown. The important scientific and practical task of elimination of frictional self-oscillations of the first and second kind by the use of neural networks and the established method of their synthesis was solved in this work.

Keywords: electric drive, electromechanical system, neural network, activation function, genetic algorithm, nonlinear friction load.

List of published works:

1. Klepikov V. B., Osichev A. V., Donets Yu. G., Klepikov A. V., Obruch I. V. Formy avtokolebanii v elektromekhanicheskikh sistemakh s otritsatel'nym vyazkim treniem. Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Informatsionnye tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, obrazovanie, zdorov'e», (Khar'kov, 30 – 31 maya 1996). Khar'kov: KhGPU, 1996. Ch. 1. S. 83 – 84.

2. Klepikov V. B., Makhotilo K. V., Obruch I. V., Osichev A. V., Nadzhi Kamal'. Neironnoe upravlenie elektromekhanicheskoi sistemoi s otritsatel'nym vyazkim treniem. Tr. konf. s mezhdunar. uchastiem «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika», (Alushta, 16 – 21 sentyabrya 1996). Khar'kov: Osnova, 1996. S. 283 – 286.

3. Klepikov V. B., Makhotilo K. V., Obruch I. V. Sintez neirosetevoi sistemy upravleniya odnomassovoi elektromekhanicheskoi sistemy s otritsatel'nym vyazkim treniem pri ogranichenii koordinat elektroprivoda. Tr. konf. s mezhdunar. uchastiem «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika», (Alushta, 15 – 20 sentyabrya 1997). Khar'kov: Osnova, 1997. S. 19 – 21.

4. Klepikov V. B., Obruch I. V., Osichev A. V., Dipak Kumar. Sintez ustoichivyykh dvukhmassovykh elektromekhanicheskikh sistem s otritsatel'nym vyazkim treniem s zadannym bystrodeistviem. Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta. Spets. vypusk. Khar'kov: KhGPU. 1998. S. 46 – 48.

5. Klepikov V. B., Makhotilo K. V., Obruch I. V., Nadzhi Kamal'. Neurosetevaya sistema upravleniya dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi sistemoi s otritsatel'nym vyazkim treniem. Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta. Spets. vypusk. Khar'kov: KhGPU. 1998. S. 378 – 380.

6. Klepikov V. B., Sergeev S. A., Makhotilo K. V., Obruch I. V. Primenenie metodov neuronnykh setei i geneticheskikh algoritmov v reshenii zadach upravleniya elektroprivodami. Elektrotehnika. Moskva: Izd. «Znak». 1999. № 5. S. 2 – 6.

7. Klepikov V. B., Obruch I. V. Issledovanie vliyaniya vida aktivatsionnoi funktsii na pokazateli kachestva regulirovaniya elektromekhanicheskoi sistemy pri neirokontrollernom upravlenii. Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta. Khar'kov: KhGPU, 2000. Vyp. 113. S. 369 – 371.

8. Obruch I. V. Vybory razmera skrytogo sloya neirokontrollera pri upravlenii elektromekhanicheskoi sistemoi s otritsatel'nym vyazkim treniem. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskii politekhnicheskii institut». Khar'kov: NTU «KhPI», 2001. Vyp. 10. S. 435 – 437.

9. Obruch I. V. Neurosetevoe upravlenie dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi sistemoi s zazorom v kinemacheskikh peredachakh. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI»: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika». T. 1, Khar'kov: NTU «KhPI». 2002. № 5, S. 302 – 304.

10. Obruch I. V. Vliyanie parametrov odnomassovoi elektromekhanicheskoi sistemy s neirokontrollerom na tochnost' regulirovaniya. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskii politekhnicheskii institut». Khar'kov: NTU «KhPI». 2004. Vyp. 43. S. 185 – 187.

11. Klepikov V. B., Asmolova L. V., Obruch I. V. Ustranenie neiroupravleniem sryvnykh friktsionnykh avtokolebaniy v elektromekhanicheskikh sistemakh s zazorom. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskii politekhnicheskii institut». Khar'kov: NTU «KhPI». 2005. Vyp. 45. S. 489 – 492.

12. Klepikov V. B., Asmolova L. V., Obruch I. V. Vliyanie parametrov elektromekhanicheskoi sistemy s neiroupravleniem, predotvrashchayushchim sryvnye friktsionnye avtokolebaniya, na ee dinamicheskie pokazateli. Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie (Odesskii natsional'nyi politekhnicheskii universitet). Kiev: Tekhnika. 2006. Vyp. 66. S. 374 – 377.

13. Klepikov V. B., Asmolova L. V., Obruch I. V. Sryvnye friktsionnye avtokolebaniya v elektromekhanicheskikh sistemakh i ikh ustranenie. Tekhnichna elektrodinamika. Kiïv: IED NANU. 2007. № 2. S. 35 – 41.

14. Buryakovskii S. G., Obruch I. V., Smirnov V. V. Sistemy skalyarnogo i neirosetevogo upravleniya elektroprivodom strelochnogo perevoda. Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu «Kharkivs'kii politekhnicheskii institut». Kharkiv: NTU «KhPI», 2010, № 28. S. 574 – 576.

15. Obruch I. V., Kutovoi Yu. N. Zamknutyie sistemy upravleniya elektroprivodom s dvigatelem postoyannogo toka posledovatel'nogo возбuzhdeniya na baze neironnykh setei. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI»: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika». Khar'kov: NTU "KhPI". 2013. № 36 (1009). S. 488 – 490.

16. Obruch I. V., Kutovoi Yu. N. Neurosetevaya sistema upravleniya elektroprivoda elektrovoza. Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy. Kiev: Tekhnika. 2014. № 15 (91). S. 132 – 135.

17. Obruch I. V. Khoreva A. V. Novaya model' dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi sistemy v obobshchennykh parametrah. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskii politekhnicheskii institut». Khar'kov: NTU «KhPI». 2015. Vyp. 12 (1121). S. 160 – 163.

18. Obruch I. V., Kutovoi Yu. N. Neurosetevaya sistema upravleniya elektroprivoda elektrovoza ARP14 s uchetom uprugosti kinematicheskikh svyazei. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskii politekhnicheskii institut». Khar'kov: NTU «KhPI». 2015. Vyp. 12 (1121). S. 248 – 250.

19. Obruch I. V., Kutovoi Yu. N. Neurosetevaya sistema upravleniya tyagovym elektroprivodom peremennogo toka tramvaya. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskii politekhnicheskii institut». Khar'kov: NTU «KhPI». 2017. Vyp. 27 (1249). S. 436 – 439.

20. Kutovoi Yurii N., Obruch Ihor V., Kunchenko Tatiana Yu. Development of control systems for movement mechanisms of electric drives based on neural networks. Acta Technica. Institute of Thermomechanics CAS, v.v.i. Praha: Czech Academy of Sciences. Czech Republic. 2018. Vol. 63. № 5. P. 641 – 655.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	11
1.1 Фрикційні автоколивання в механічних і електромеханічних системах та їх усунення засобами електроприводу	11
1.2 Нейронні мережі та їх використання для управління технічними об'єктами	21
1.3 Методи синтезу нейронних мереж. Метод генетичних алгоритмів	25
1.4 Визначення мети і завдань досліджень.....	29
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ ОДНОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ С НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ І ВІД'ЄМНИМ В'ЯЗКИМ ТЕРТЯМ... 	31
2.1 Математична модель.....	31
2.2. Визначення раціонального критерію при навчанні нейронної мережі	38
2.3 Вплив розміру прихованого шару і виду активаційної функції на показники якості регулювання	44
2.4 Вплив параметрів електроприводу на показники якості регулювання	59
2.5 Висновки по розділу	66
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ПРУЖНИМИ КІНЕМАТИЧНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ З НЕГАТИВНИМ В'ЯЗКИМ ТЕРТЯМ.....	67
3.1 Розробка модифікованої системи в узагальнених параметрах і побудова математичної моделі.....	67
3.2 Навчання нейронної мережі.....	75
3.3 Вплив розміру прихованого шару і виду активаційної функції на показники якості регулювання	78
3.4 Вплив параметрів електроприводу на показники якості регулювання	92
3.5 Висновки по розділу	98

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМ ТЕРТЯМ. УСУНЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ АВТОКОЛИВАНЬ	99
4.1 Математичні та комп'ютерні моделі електромеханічних систем з нелінійним тертям.....	99
4.2 Усунення фрикційних автоколивань в електромеханічних системах з нелінійної характеристикою тертя, що містить «падаючу» ділянку	104
4.3 Методика синтезу.....	107
4.4 Висновки по розділу	110
РОЗДІЛ 5. ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧИ СИНТЕЗУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ З НЕЙРОКЕРУВАННЯМ	111
5.1 Усунення зривних автоколивань в електромеханічних системах з нейронною мережею	111
5.2 Синтез електромеханічної системи з нейронною мережею електроприводу рудникового електровоза з двигуном постійного струму послідовного збудження	121
5.3 Синтез нейронної мережі електроприводу стрілочного переводу	127
5.4 Синтез електромеханічної системи з нейронною мережею і асинхронним двигуном.....	135
5.5 Нейромережева система керування лінійним двигуном.....	139
5.6 Висновки по розділу	145
ВИСНОВОК	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	148
ДОДАТОК А.....	160
ДОДАТОК Б	177
ДОДАТОК В	179
ДОДАТОК Г	185
ДОДАТОК Д.....	186