

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ОБРУЧ ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 681.511.4

**СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
З НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ
ТА ФРИКЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Клепиков Володимир Борисович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри автоматизованих
електромеханічних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Інститут технічних проблем магнетизму
Національної академії наук України,
м. Харків, завідувач відділом проблем
управління магнітним полем;

кандидат технічних наук
Маслій Артем Сергійович,
Український державний університет
залізничного транспорту,
доцент кафедри електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки.

Захист відбудеться « 6 » _____ червня _____ 2019 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресом: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресом: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий « 25 » _____ квітня _____ 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. В. Івахно

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Існує широкий клас машин і механізмів, зокрема, прокатні стани, металорізальні верстати, електровози, механізми переміщення кранів, роботи та маніпулятори і багато інших, у яких в нормальних або аномальних режимах роботи виникають так звані «фрикційні автоколювання» (АКФ). Автоколювання мають місце, якщо навантаженням є «пара тертя» з нелінійною характеристикою, що містить «падаючу» ділянку, на якій збільшення швидкості проковзування супроводжується зменшенням коефіцієнта тертя. АКФ, як правило, негативно впливають на технологічний процес, погіршуючи його важливі показники: точність та чистоту обробки, продуктивність, ККД, знижують динамічну стійкість кінематичних ланок, а, іноді, призводять до їх поломок. Явище фрикційних автоколювань вивчалось багатьма вітчизняними і закордонними вченими – Релейем (Rayleigh J.), Боуденом (Bowden F.), Лебеном (Leben L.), Папенхаузенем (Papenhausen P.), академіками: Стрелковим С. П., Ішлинським А. Ю., Целіковим А. І., Кононенко В.О., Фроловим К. В., професорами: Кайдановським Н. Л., Крагельським І. В., Хайкіним С.Э., Толстим Д. М., Штейнвольфом Л. І., Ренгевичем А. А., Шахтарем П. С. та іншими.

Усунення фрикційних автоколювань в таких електромеханічних системах (ЕМС) можливо засобами регульованого електроприводу. Для виконання цієї задачі раніше використовувалися класичні системи керування, побудовані, наприклад, за допомогою алгоритмів підлеглого регулювання з нетрадиційним налаштуванням регуляторів, модального керування зі спостерігачами стану або без їх, і ін. Основною складністю при реалізації таких систем керування є те, що всі ці системи чутливі до зміни параметрів в електроприводі або вимагають додаткових відомостей про механізм, які в реальних умовах отримати важко.

Регулятори, побудовані на базі штучної нейронної мережі (НМ), дають можливість досить просто реалізувати адаптивні алгоритми управління і дозволяють демпфірувати автоколювання у всьому заданому діапазоні роботи електроприводу і тим самим забезпечити його стійку роботу. При цьому системи керування електроприводами, реалізовані за допомогою нейронних мереж мають ряд переваг, у порівнянні з системами управління з класичними регуляторами – менш чутливі до параметричних і структурних змін об'єкта управління, більш прості для реалізації і побудови АСК ТП і ін. Таким чином, розробка теорії, методів, методик і алгоритмів керування, що усувають автоколювальні режими в типових одне і двомасових електромеханічних системах за допомогою нейронних мереж, є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти та науки України: «Розробка принципів і алгоритмів керування енергетичними та електромеханічними системами із застосуванням штучних нейроподібних мереж і генетичних алгоритмів» (ДР № 0197U001893), «Дослідження і поліпшення характеристик електроприводів машин і механізмів з від'ємним в'язким тертям» (ДР № 0103U001509), «Розвиток методів нейронних мереж, фазі-логіки і гене-

тичного алгоритму для керування електротехнічними системами» (ДР № 0103U001510), «Синтез нелінійних електромеханічних систем на основі методів гібридних нейронних мереж» (ДР № 0103U001510), «Розробка енергоресурсозберігаючого електроприводу електромобіля з мікропроцесорним керуванням для навчального процесу і наукових досліджень» (ДР № 0113U000435).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є усунення фрикційних автоколивань в електроприводах машин і механізмів введенням в електромеханічну систему нейроконтролера. Для цього необхідно:

- обґрунтувати доцільність керування електроприводами з нелінійним тертям, характеристика якого містить «падаючу» ділянку, за допомогою нейрорегуляторів, що виконані базі багат шарових прямоспрямованих НМ типу персептрон, синтезованих методом генетичного алгоритму, що дозволило поліпшити якість регулювання ЕМС.

- побудувати математичні і комп'ютерні моделі одно- і двомасових електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям і нейронною мережею;

- визначити критерій оптимізації при синтезі параметрів нейронної мережи в електромеханічних системах з від'ємним в'язким тертям;

- визначити вплив розміру прихованого шару НМ, виду активаційної функції (АФ) нейронів даного шару і параметрів електромеханічної системи на показники якості перехідного процесу в одномасовій і двомасовій ЕМС з негативним в'язким тертям;

- виконати моделювання динамічних режимів висхідно нестійких одномасових та двомасових електромеханічних систем з нелінійною характеристикою тертя при керуванні їх за допомогою НМ;

- створити методіку синтезу стійких електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям, керованих за допомогою нейроконтролера та перевірити ефективність розробленої методіки в умовах нелінійності механічної характеристики навантаження;

- вирішити прикладні задачі синтезу НМ для електроприводів постійного і змінного струму різного призначення.

Об'єкт дослідження: динамічні процеси в електромеханічних системах з фрикційним навантаженням та нейронною мережею.

Предмет дослідження: електромеханічні системи з нелінійним фрикційним навантаженням, механічна характеристика якого містить ділянку від'ємного в'язкого тертя, та нейронною мережею, яка забезпечує усунення фрикційних автоколивань.

Методи дослідження. При виконанні поставлених в дисертаційній роботі завдань використовувалися: методи теорії електроприводу і теорії автоматичного керування для аналізу ЕМС; теорія диференціальних рівнянь і перетворення Лапласа для математичного опису динамічних процесів в досліджуваних системах, теорія НМ для побудови нейрорегуляторів, метод генетичного алгоритму для визначення параметрів НМ. Синтез нейронної мережи виконувався за допомогою програм Mendel 4 та Lazarus, а експериментальна перевірка основних теоретичних положень з використанням моделювання – в математичних пакетах Octave та Scilab.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше запропоновано використання штучних нейронних мереж для синтезу стійких одно- і двомасових ЕМС з від'ємним в'язким тертям та обґрунтовано вибір багат шарової штучної НМ типу персептрон висхідно нестійких одно- і двомасових ЕМС і методу генетичного алгоритму для синтезу її параметрів, що дозволило поліпшити якість регулювання ЕМС;

– вперше запропоновано структуру штучної НМ, визначені раціональні координати електроприводу, за якими здійснюється зворотний зв'язок, встановлено вплив параметрів НМ (кількості нейронів прихованого шару, виду активаційної функції), а також параметрів ЕМС на динамічні показники якості регулювання, що дозволяє побудувати нейрорегулятори мінімально достатньої структури;

– вперше запропоновано модифіковане сполучення безрозмірних узагальнених параметрів для 2-хмассової ЕМС з від'ємним в'язким тертям як об'єкта управління, яке дозволяє спростити співставлення одномасової ЕМС з двомасовою з точки зору впливу їх параметрів на збудження фрикційних автоколивань;

– вперше розроблені математичні та комп'ютерні моделі одно- і двомасових ЕМС з нейронною мережею та з нелінійним фрикційним навантаженням з використанням безрозмірних узагальнених параметрів, які, на відміну від існуючих, надають більші можливості по співставленню впливу на динаміку загальних параметрів для одномасової та двомасової систем;

– вперше запропоновано модифікований критерій середньоквадратичної похибки при синтезі параметрів штучних НМ для отримання стійких одно- і двомасових ЕМС з нелінійним фрикційним навантаженням, що дозволило забезпечити більш високу швидкість синтезу нейронної мережі електромеханічних систем з фрикційним навантаженням, характеристика якого містить ділянку «від'ємного в'язкого тертя»;

– вперше створена методика синтезу електромеханічних систем з нейронною мережею, які забезпечують усунення фрикційних автоколивань, та підтверджена її ефективність на прикладі електроприводів постійного та змінного струму, що дозволило показати можливість використання нейронної мережі у вигляді персептрону виду NN3-10-1 з сигмоїдальною активаційною функцією нейронів прихованого шару і зворотного зв'язку за координатою швидкості електродвигуна із затримкою у якості нелінійного адаптивного регулятора.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання при розробці та модернізації широкого класу електроприводів машин і механізмів у яких в нормальному або аномальному режимі роботи виникають АКФ розробленої методики синтезу електромеханічних систем з нейронною мережею. Ефективність методики підтверджена вирішенням прикладних задач для електроприводу рудникового електровозу АРП14-900, електроприводу стрілочного переводу СП-6, електроприводу механічної подачі металорізального верстата та ін. Результати, які отримані в ході виконання дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем НТУ «ХПІ» у розділах лекційних курсів «Інтелектуальні системи керування», «Інтелектуальні системи керування у мехатроніці» та

при проведенні лабораторних робіт та практичних занять за курсом «Теорія електроприводу» при підготовці фахівців в галузі електромеханічних систем автоматизації та електроприводу, мехатроніки та робототехніки.

Особистий внесок здобувача. Усі положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: запропоновано використання штучних нейронних мереж для синтезу стійких одно- і двомасових ЕМС з від'ємним в'язким тертям та обґрунтовано вибір багатошарової штучної НМ типу персептрон висхідно нестійких одно- і двомасових ЕМС і методу генетичного алгоритму для синтезу її параметрів; запропоновано структуру штучної НМ, визначені раціональні координати електроприводу, за якими здійснюється зворотний зв'язок, встановлено вплив параметрів НМ (кількості нейронів прихованого шару, виду активаційної функції), а також параметрів ЕМС на динамічні показники якості регулювання; запропонована модифіковане сполучення безрозмірних узагальнених параметрів для 2-масової ЕМС з від'ємним в'язким тертям як об'єкта управління, яке спрощує співставлення одномасової ЕМС з двомасовою з точки зору впливу їх параметрів на збудження фрикційних автоколиваний; розроблені математичні та комп'ютерні моделі одно- і двомасових ЕМС з нейронною мережею та з нелінійним фрикційним навантаженням з використанням безрозмірних узагальнених параметрів; запропоновано модифікований критерій середньоквадратичної похибки при синтезі параметрів штучних НМ для отримання стійких одно- і двомасових ЕМС з нелінійним фрикційним навантаженням; створена методика синтезу електромеханічних систем з нейронною мережею, які забезпечують усунення фрикційних автоколиваний, та підтверджена її ефективність на прикладі електроприводів постійного та змінного струму.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися и обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта, 1996, 1997, 1998; м. Одеса, 2006; м. Харків, 2013, 2015, 2017).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 20 наукових працях, з яких: 7 статей у наукових фахових виданнях України, 2 – у закордонних періодичному фаховому виданні (Scopus), 11 статей у інших виданнях України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації становить 188 сторінки основного тексту, включаючи: 126 рисунків по тексту, 5 таблиць по тексту, списку 126 найменувань використаних джерел на 12 сторінках, 5 додатків на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з Державними програмами і бюджетними темами, сформульовані мета та основні задачі досліджень, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі виконано огляд літературних джерел, що описують різні типи фрикційного навантаження. Відзначено, що механічна характеристика тертя носить нелінійний характер і містить так звану «падаючу» ділянку «від'ємного в'язкого тертя», вплив якої на динаміку ЕМС виявляється у можливості виникнення фрикційних автоколивань. Режим АКФ погіршує якість технологічного процесу: точність і чистоту оброблюваної поверхні деталі, точність позиціонування, призводить до збільшення втрат в електроприводі, а, іноді, і до поломок кінематичних ланок. Були розглянуті відомі технічні рішення щодо усунення фрикційних автоколивань засобами електроприводу, наприклад, за допомогою традиційних зворотних зв'язків по його координатах. Зроблено висновок про доцільність використання інтелектуальних методів керування, зокрема за допомогою нейронних мереж. На підставі огляду літератури були визначені мета і задачі роботи.

У другому розділі були проведені дослідження, пов'язані з виконанням необхідної умови виникнення автоколивального режиму, а саме, зміни знаку функції дисипації в продовж періоду колювання. Така умова виникає, якщо робоча точка електромеханічної системи переходить на ділянку від'ємного в'язкого тертя. По-перше, були проведені дослідження одномасової ЕМС з нейронною мережею при переміщенні робочої точки на «падаючу» ділянку характеристики тертя. Отримана математична модель одномасової ЕМС в узагальнених параметрах з нейронною мережею і фрикційним навантаженням, яка у вигляді структурної схеми зображена на рис. 1, а. В цій моделі $b = \beta_c / \beta$ тобто відношення жорсткості механічної характеристики навантаження до модуля жорсткості механічної характеристики електродвигуна, а $m = T_m / T_e$. Відносні значення координат відповідають наступним базовим значенням ω_0 – швидкість неробочого ходу, $M_0 = M_{кз}$, а $p^* = p / T_e$. На рис. 1, а пунктиром показані можливі зворотні зв'язки, які можуть бути застосовані для реалізації замкнених систем керування з НМ.

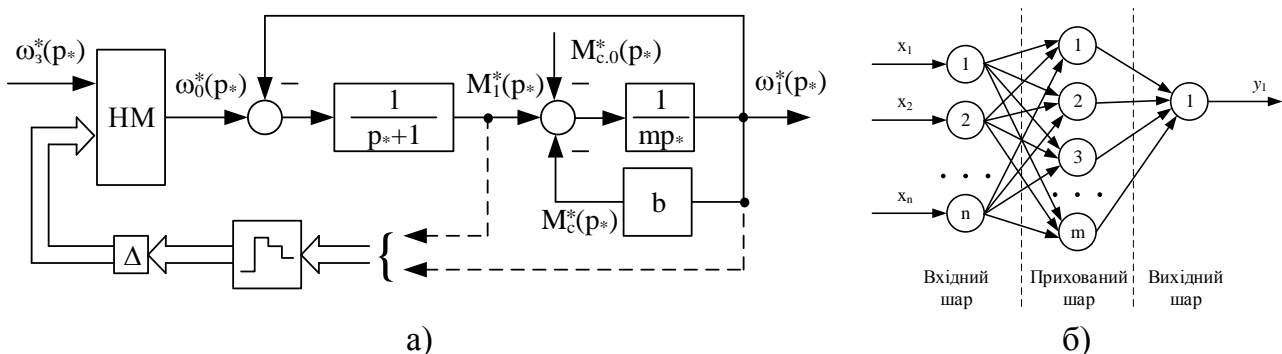


Рисунок 1 – Структурна схема одномоваї ЕМС в узагальнених параметрах з НМ і фрикційним навантаженням: а – структурна схема, б – нейронна мережа

В розділі обґрунтована доцільність використання нейронної мережі у вигляді прямоспрямованого тришарового персептрону (рис. 1, б) з одним прихованим шаром. Для навчання НМ була застосована диплоїдна схема генетичного алгоритму, на ефективність роботи якої сильно впливає критерій навчання. Аналіз існуючих критеріїв навчання привів до висновку про доцільність створення модифікованого критерію, який був запропонований автором у вигляді

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_{max}^*} \sqrt{\int_{t^*=0}^{t^*=t_{max}^*} [(\omega_3^* - \omega_1^*) \cdot t^*]^2 dt^*}, \quad (1)$$

де N – кількість тестових сигналів, ω_3^* – задане відносне значення швидкості електродвигуна, ω_1^* – поточне відносне значення швидкості електродвигуна, t^* – поточний відносний час, t_{max}^* – відносний час перехідного процесу.

Дослідження підтвердили, що критерій (1) забезпечує зменшення часу синтезу мережи та зменшення коливальності електромеханічної системи. Якість закону керування електромеханічною системою, що формує нейронна мережа, залежить від кількості нейронів в прихованому шарі штучної НМ. Для того, щоб з'ясувати раціональну кількість нейронів в прихованому шарі штучної НМ, було проведено ряд комп'ютерних експериментів, результати яких зведені у табл. 1. На базі цих результатів запропоновано використовувати НМ структури NN3-10-1 (тобто 3 нейрона вхідного шару, 10 нейронів прихованого шару і 1 – вихідного).

Таблиця 1 – Показники навчання і якості перехідних процесів одномасової системи з різною структурою НМ

NN 3-N-1	$t_{нав}, \text{XB}$	I	$t_{рег}^*$	$\Delta\omega_1^*, \%$	$\sigma, \%$	$M_{1,max}^*$
NN3-5-1	6,83	0,022	3,1	1,12	18	1,62
NN3-10-1	9,32	0,016	1,62	1,08	17	1,69
NN3-15-1	12,15	0,011	1,07	0,94	21	2,21
NN3-20-1	15,00	0,013	1,23	1,62	16	1,87
NN3-25-1	17,46	0,016	2,05	3,58	32	2,37
NN3-30-1	19,97	0,013	1,76	2,58	20	2,03
NN3-35-1	22,70	0,012	1,58	2,87	19	2,22
NN3-40-1	25,32	0,012	1,09	2,38	33	2,71
NN3-45-1	27,47	0,013	0,74	4,30	30	3,07
NN3-50-1	29,57	0,023	1,67	8,30	74	3,99

Досліджено вплив виду активаційної функції на показники якості регулювання наведених у табл. 2. Було розглянуто шість найпоширеніших активаційних функцій, зокрема, порогові, сигмоїдальні, кусочно-лінійні (позитивні і знакозмінні). Встановлено, що кращі результати забезпечуються використанням активаційної функції знакозмінного сигмоїдального виду. Ефективність використання НМ проілюстровано на рис. 2. З нього видно, що розімкнена ЕМС висхідно нестійка (рис. 2, а), а система з синтезованою НМ забезпечує усунення процесу, що розходиться (рис. 2, б).

При навчанні одномасової ЕМС з НМ прийнято допущення, що параметри системи незмінні. Однак, внаслідок механічного зносу змінюються коефіцієнти тертя в підшипниках, діаметри коліс колісних пар механізмів пересування, величини зазорів в редукторах та ін. Що стосується статичних навантажень електропривода, то вони можуть бути не детермінованими величинами, наприклад, для електроприводу електровозу і трамвая їх значення може істотно змінюватися в залежності від стану рейкового шляху.

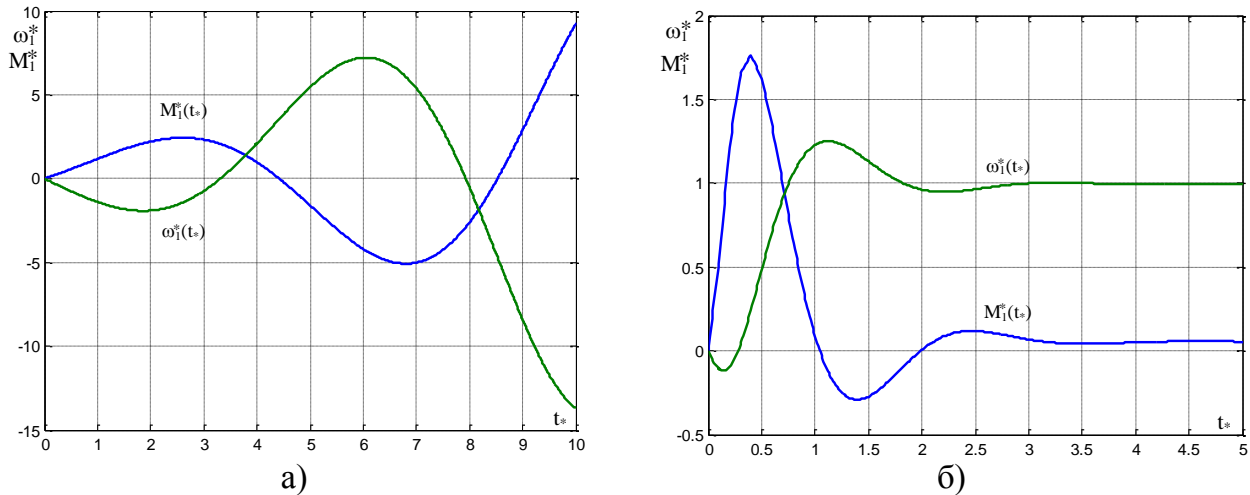


Рисунок 2 – Перехідні процеси в одномасовій ЕМС в узагальнених параметрах з фрикційним навантаженням: а – розімкнута система, б – система з НМ

Таблиця 2 – Показники навчання і якості перехідних процесів одномасової ЕМС з НМ структури NN3-10-1 з різними АФ нейронів прихованого шару

Вид АФ	$t_{\text{нав}}, \text{хв}$	I	$t_{\text{рег}}^*$	$\Delta\omega_1^*, \%$	$\sigma, \%$	$M_{1,\text{max}}^*$
	8,52	0,17	Автоколивальний режим			
	9,18	0,22	Автоколивальний режим			
	9,18	0,59	Нестійка система			
	9,32	0,016	1,62	1,08	17	1,69
	8,50	0,008	0,84	0,10	7	2,04
	8,15	0,0019	0,98	5,89	4	1,68

Такі зміни в параметрах електроприводу можуть чинити істотний вплив на його роботу і експлуатаційні характеристики. Компенсувати такі зміни, що виникають в процесі експлуатації електроприводів, можливо шляхом їх врахування при проведенні процедури навчання ЕМС з НМ. В процесі навчання може бути невідомий діапазон таких змін, і для гарантованої роботи електроприводу, доведеться враховувати цей діапазон в досить широких межах. Для встановлення цього впливу, була змодельована одномасова ЕМС з параметрами прийнятими при навчанні – $m=0,5$, $b=-0,7$, $M_{c0}^*=0,75$, які змінювались в досить широкому діапазоні. Результати цих досліджень у вигляді поверхонь якості перехідних процесів (статичних помилок регулювання та перерегулювання) при зміні параметра m у діапазоні $[0,45..4,5]$ зображені на рис. 3, а при зміні параметра b у діапазоні $[-0,75..0,75]$ – на рис. 4.

Варто зауважити, що при зміні параметру m у наведеному раніше діапазоні при незмінності параметру $b=-0,7$, динаміка розімкнutoї системи істотно змінюється. Так, якщо $0 < m \leq 0,2$ – в розімкнutoї системі будуть спостерігатися нестійкі аперіодичні перехідні процеси, при $0,2 < m \leq 0,7$ – нестійкі коливальні, при $0,7 < m \leq 2,39$ – стійкі коливальні та при $m > 2,39$ – стійкі аперіодичні. При зміні параметра b та незмінності параметра $m=0,5$ динаміка розімкнutoї системи

теж змінюється: при $-0,75 \leq b < -0,5$ в розімкнутій системі будуть спостерігатися нестійкі коливальні процеси, а при $-0,5 < b < 0,75$ – стійкі коливальні.

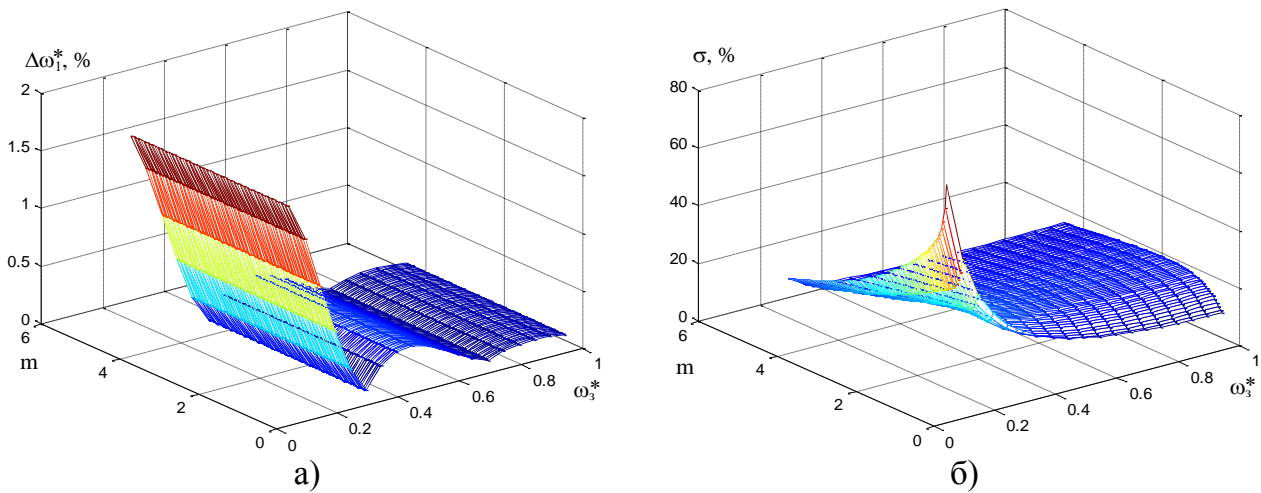


Рисунок 3 – Поверхні якості регулювання одномасової ЕМС з НМ в залежності від величини вхідного сигналу і параметра m в діапазоні $[0,45..4,5]$: а – поверхня помилок, б – поверхня перерегулювання

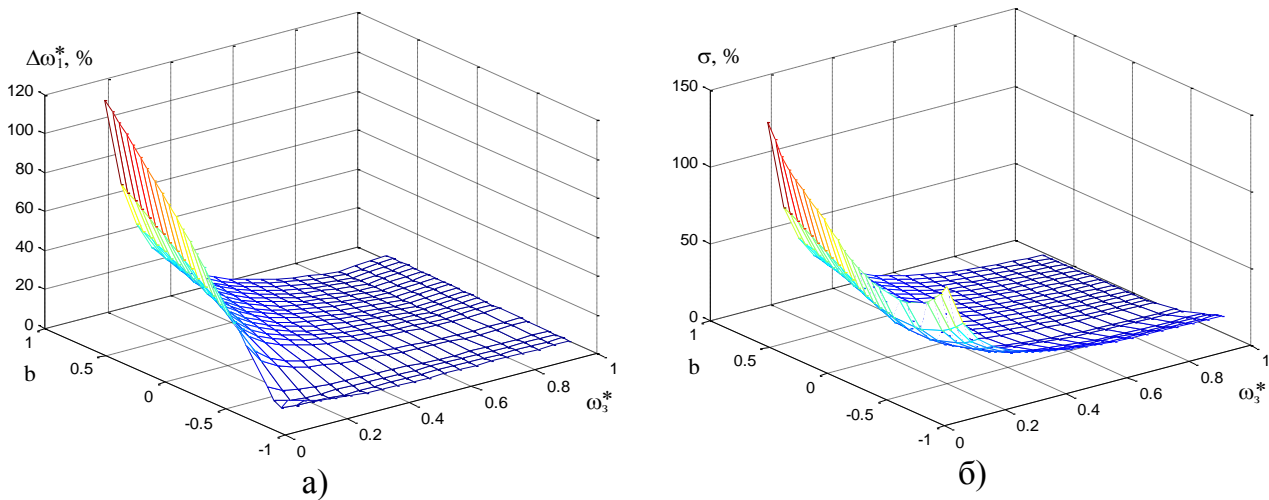


Рисунок 4 – Поверхні якості регулювання одномасової ЕМС з НМ в залежності від величини вхідного сигналу і параметра b в діапазоні $[-0,75..0,75]$: а – поверхня помилок, б – поверхня перерегулювання

Таким чином, вище описані зміни параметрів m і b ускладнюють роботу синтезованих електроприводів з фрикційним навантаженням, але ці зміни несуттєво впливають на показники якості регулювання в досить широкому діапазоні таких змін.

Третій розділ присвячений синтезу двомасових ЕМС в узагальнених параметрах з НМ та фрикційним навантаженням. Двомасова ЕМС, містить пружний зв'язок між масами, що обумовлює виникнення АКФ. Структурна схема такої системи зображена на рис. 5. При розробці структурної схеми двомасової ЕМС, зображеною на рис. 5, було запропоновано нове сполучення безрозмірних узагальнених параметрів. Схема (рис. 5) відрізняється від існуючої тим, що замість відомого з теорії електроприводу параметру $T_{m1}^* = T_{m1} \Omega_{1.2}$ введено параметр $m = T_m / T_e$. Запропонована схема вірна також для лінеаризованої по типових ділянках характеристики тертя нелінійною «у великому», що при моделюванні потребує лише зміни значення параметру b при переході робочої точки з однієї

ділянки на іншу.

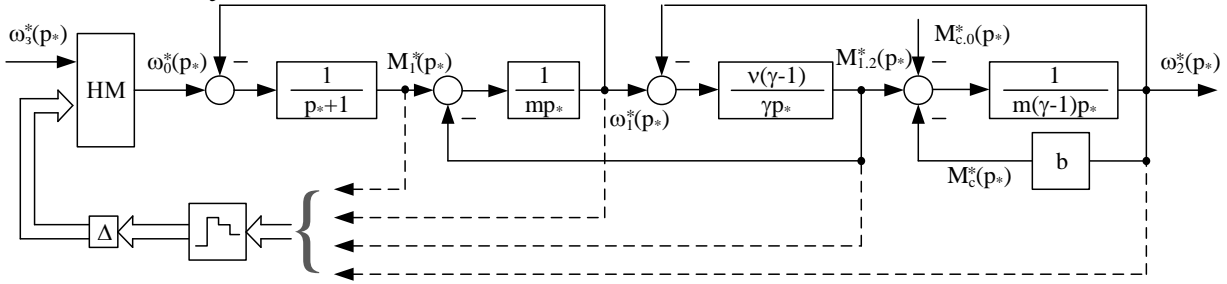


Рисунок 5 – Структурна схема двомасової ЕМС в узагальнених параметрах з НМ і фрикційним навантаженням

В розділі, синтез нейронної мережі здійснюється з метою усунення необхідної умови виникнення АКФ, тобто забезпечення стійкості ЕМС з нейронною мережею при знаходженні робочої точки на ділянці від'ємного в'язкого тертя. Для навчання НМ, яка була використана для керування двомасовою ЕМС, застосовано критерій (1), у якому швидкість двигуна ω_1 була змінена на швидкість робочого органу ω_2 , тобто

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_{\max}^*} \sqrt{\int_{t^*=0}^{t_{\max}^*} [(\omega_3^* - \omega_2^*) \cdot t^*]^2 dt^*} . \quad (2)$$

На рис. 6, а наведені перехідні процеси в розімкненій двомасовій ЕМС, яка працює автоколивальному режимі. Для реалізації замкнених систем керування можливо використовувати різні набори зворотних зв'язків. На рис. 6,б показані перехідні процеси в двомасовій ЕМС з НМ та зворотним зв'язком по швидкості електродвигуна ω_1^* та її затримкою.

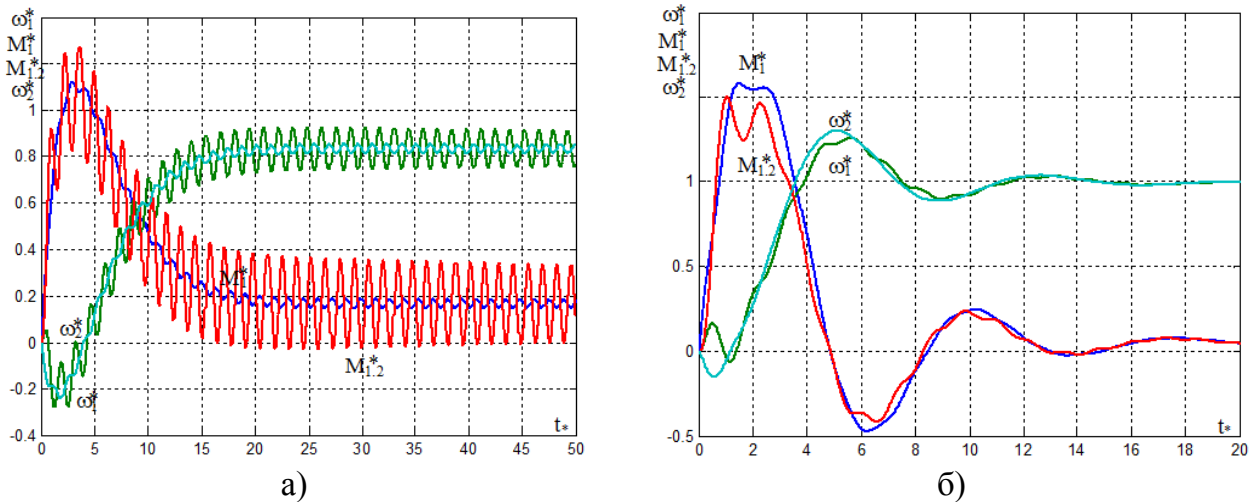


Рисунок 6 – Перехідні процеси в двомасовій ЕМС в узагальнених параметрах з фрикційним навантаженням: а – розімкнена система, б – система з НМ зі зворотним зв'язком по ω_1^* та її затримкою




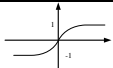
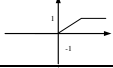

Проведені дослідження показали, що такого зворотного зв'язку цілком достатньо для забезпечення стійкості електромеханічної системи за допомогою нейронної мережі. В розділі проведені дослідження з аналізу впливу структури НМ – розміру прихованого шару (табл. 3), виду АФ нейронів прихованого шару (табл. 4), і параметрів двомасової ЕМС (рис. 7 – 10) на показники якості регу-

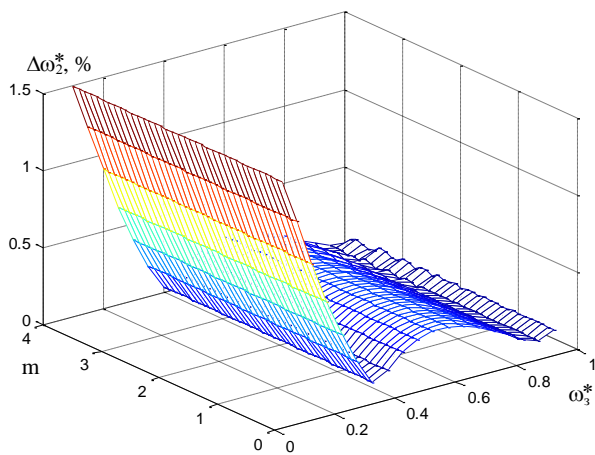
лювання.

Таблиця 3 – Показники навчання і якості перехідних процесів нейромережевої двомасової ЕМС з різною структурою нейрорегулятора

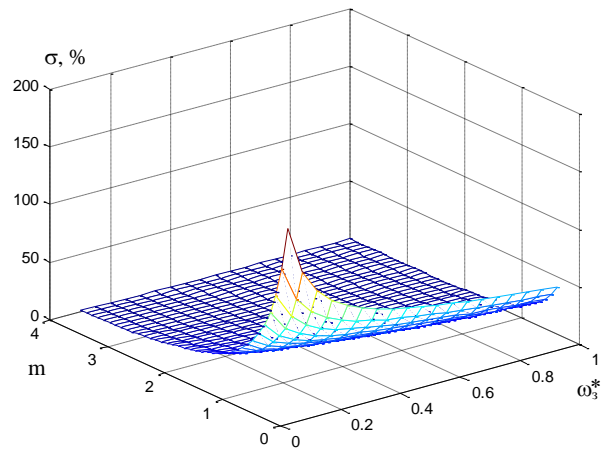
NN 3-N-1	$t_{\text{нав}}, \text{XB}$	I	$t_{\text{рег}}^*$	$\Delta\omega_2^*, \%$	$\sigma, \%$	$M_{1.\text{max}}^*$	$M_{1.2.\text{max}}^*$
NN3-5-1	31,78	0,023	10	0,1	48	2,50	2,21
NN3-10-1	42,7	0,027	10	0,1	30	1,58	1,50
NN3-15-1	54,52	0,046	10	1,0	75	3,55	2,90
NN3-20-1	67,00	0,037	13	1,5	69	3,40	2,84
NN3-25-1	77,45	0,032	13	2,0	54	2,73	2,40
NN3-30-1	87,65	0,046	14	2,0	89	4,10	3,20
NN3-35-1	97,53	0,084	17	2,0	72	3,35	2,84
NN3-40-1	109,03	0,110	25	1,0	84	3,84	3,09
NN3-45-1	119,63	0,110	17	2,4	73	3,35	2,82
NN3-50-1	209,92	0,130	26	3,0	79	3,65	3,10

Таблиця 4 – Показники навчання і якості перехідних процесів нейромережевої двомасової системи з різними АФ нейронів прихованого шару нейрорегулятора структури NN3-10-1

АФ	$t_{\text{нав}}, \text{XB}$	I	$t_{\text{рег}}^*$	$\Delta\omega_2^*, \%$	$\sigma, \%$	$M_{1.\text{max}}^*$	$M_{1.2.\text{max}}^*$
	42,60	0,780	Автоколивальний режим				
	42,90	0,240	Автоколивальний режим або нестійка система				
	44,22	0,025	15	0,1	39	2,0	1,85
	42,70	0,027	10	0,1	30	1,58	1,50
	41,08	0,170	Автоколивальний режим				
	37,90	0,031	11	0,2	62	3,05	2,6



а)



б)

Рисунок 7 – Поверхні якості регулювання двомасової ЕМС з НМ в залежності від величини вхідного сигналу і параметра m в діапазоні $[0,3..4,5]$: а – поверхня помилок, б – поверхня перерегулювання

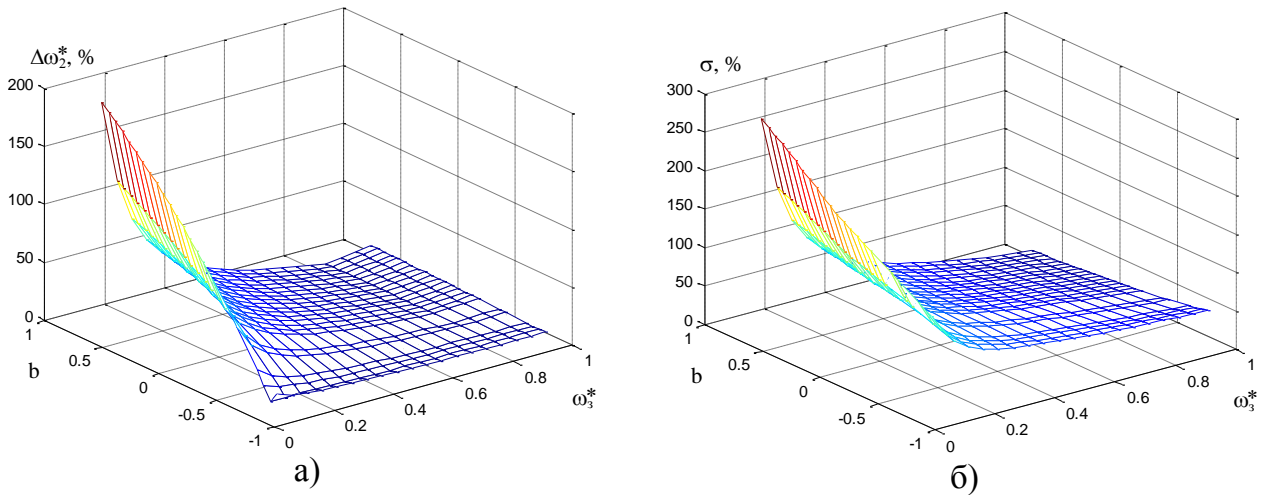


Рисунок 8 – Поверхні якості регулювання двомасової ЕМС з НМ в залежності від величини вхідного сигналу і параметра b в діапазоні $[-0,75..0,75]$: а – поверхня помилок, б – поверхня перерегулювання

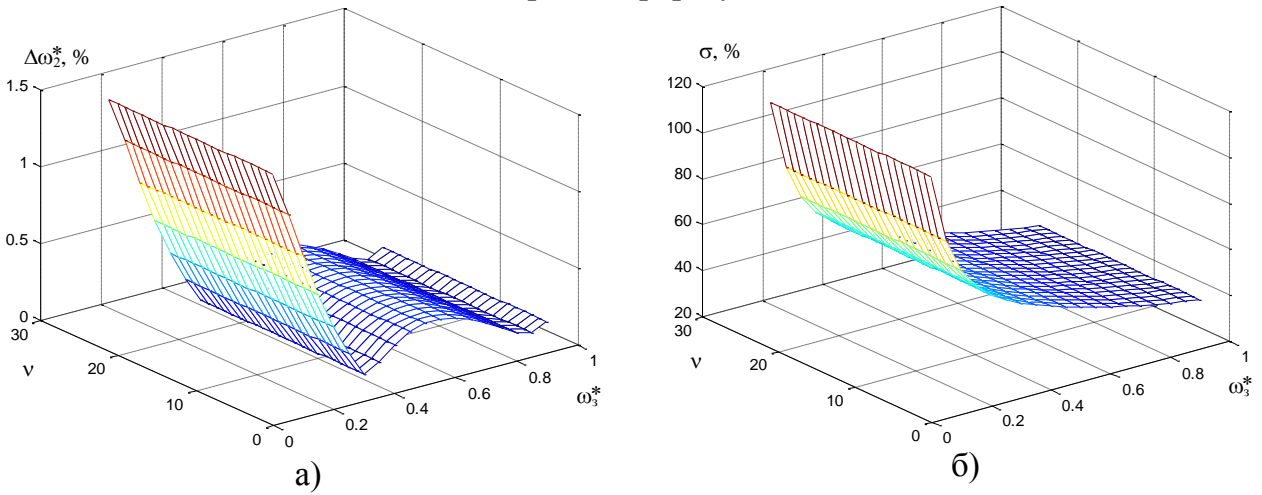


Рисунок 9 – Поверхні якості регулювання двомасової ЕМС з НМ в залежності від величини вхідного сигналу і параметра v в діапазоні $[4..25]$: а – поверхня помилок, б – поверхня перерегулювання

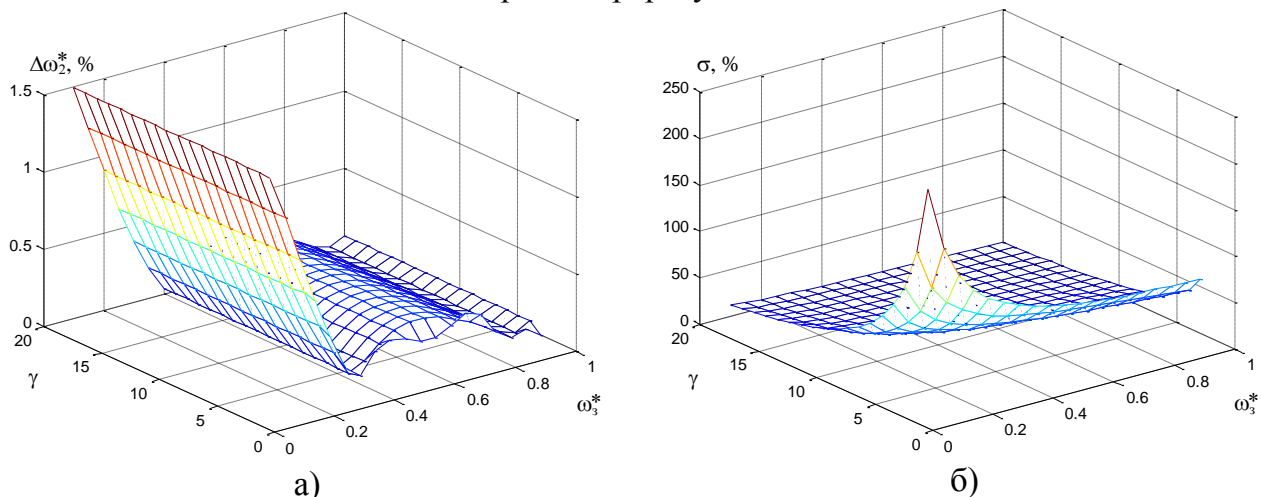


Рисунок 10 – Поверхні якості регулювання двомасової ЕМС з НМ в залежності від величини вхідного сигналу і параметра γ в діапазоні $[3..20]$: а – поверхня помилок, б – поверхня перерегулювання

Таким чином, для забезпечення стійкості двомасової ЕМС при зміні її параметрів в достатньо широкому діапазоні можливо застосувати НМ структури

NN3-10-1 при використанні одного зворотного зв'язку по швидкості електродвигуна.

У четвертому розділі проведені дослідження одномасових та двомасових ЕМС з урахуванням нелінійності характеристики тертя «у великому». При цьому була застосована кусково-лінійна апроксимація типових ділянок механічної характеристики тертя (рис. 11, б), яка містить також ділянку від'ємного в'язкого тертя. Внаслідок нелінійності «у великому» у порівнянні з рис. 2, а динамічний процес, що розходиться, стає автоколивальним (рис. 11, а). Фазова траєкторія та механічні характеристики навантаження та електродвигуна наведені на рис. 11, б.

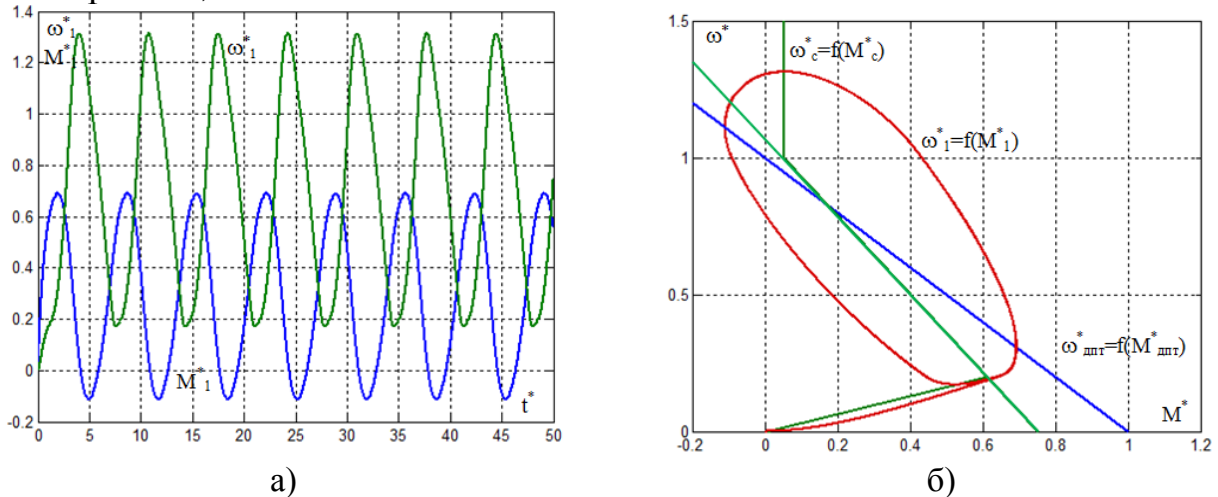


Рисунок 11 – Перехідні процеси і механічні характеристики розімкненої одномасової ЕМС з нелінійним тертям: а – перехідні процеси, б – механічні характеристики

Введення НМ, синтезованої методом генетичного алгоритму, забезпечує стійкість ЕМС і усуває АКФ (рис. 12, а і 12, б).

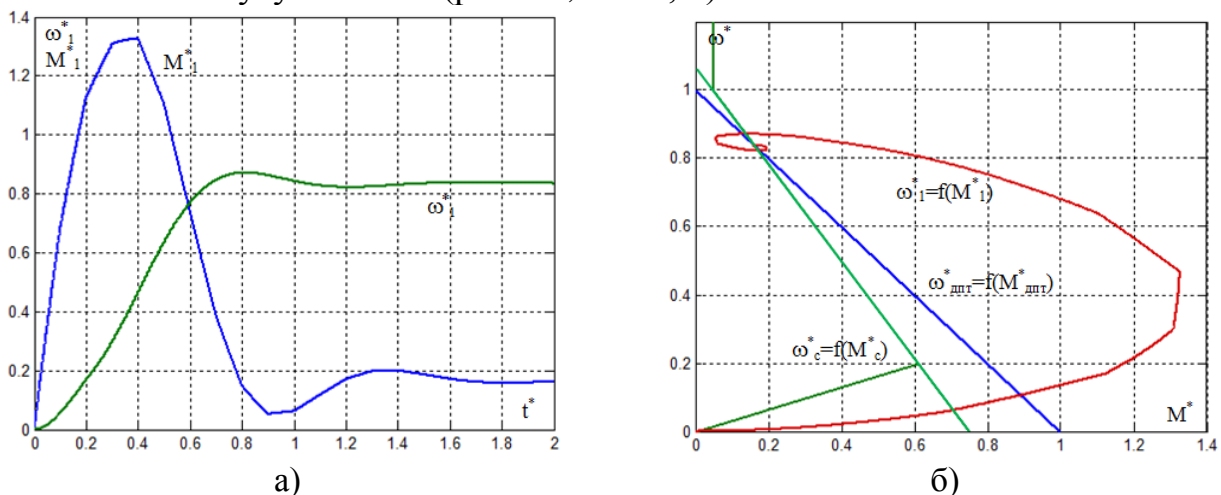


Рисунок 12 – Прямий пуск одномасової ЕМС з нейронною мережею: а – перехідні процеси, б – механічні характеристики

Введення НМ забезпечило наступні показники регулювання: статична помилка – $\Delta\omega_1^* = 0,07\%$, перерегулювання – $\sigma = 4,2\%$, час перехідного процесу – $t_{п.п} \approx 0,6T_e$.

Результати моделювання двомасової ЕМС з НМ та нелінійним тертям надані на рис. 13, а і 13, б. Як видно, введення нейронної мережи також забезпе-

чило усунення фрикційних автоколивань і наступні показники регулювання: статична помилка регулювання – $\Delta\omega_2^* = 0,12\%$, перерегулювання – $\sigma = 25,4\%$ та час перехідного процесу – $t_{п.п} \approx 11T_e$.

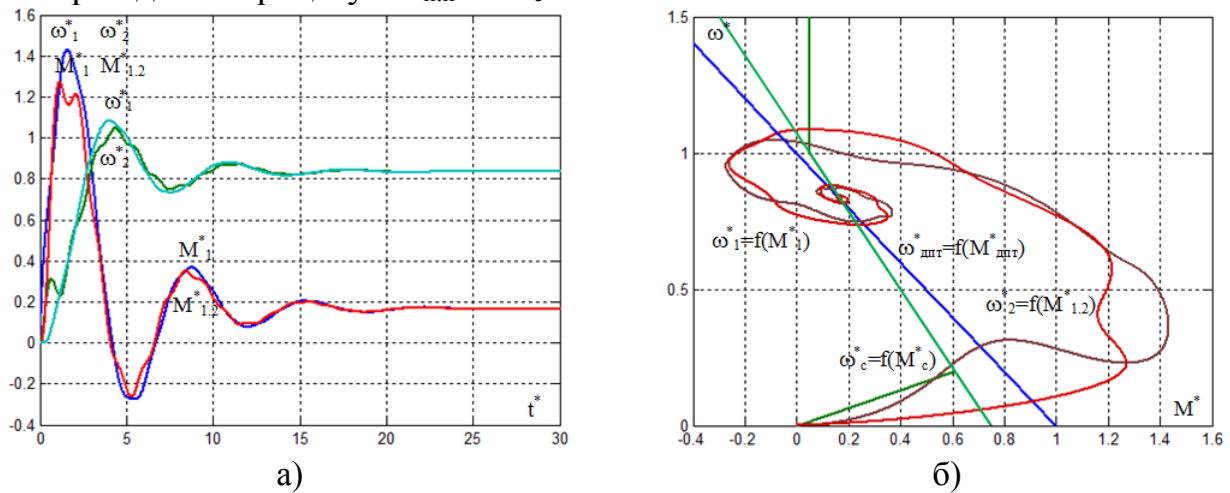


Рисунок 13 – Перехідні процеси і механічні характеристики в двомасовій ЕМС з нелінійним тертям і НМ: а – перехідні процеси, б – механічні характеристики

На підставі проведених досліджень розроблені методики синтезу для одномасової і двомасової ЕМС з нейронною мережею при фрикційному навантаженні. Методики базуються на використанні нейронної мережи у вигляді багаточарового перцептронну виду NN3-10-1, сигмоїдальної активаційної функції нейронів прихованого шару, наявності сигналів зсуву та наванчання НМ за допомогою диглоїдної схеми методу генетичного алгоритму.

П'ятий розділ присвячений вирішенню ряду прикладних задач та перевірці запропонованих методик синтезу нейронних мереж для електроприводів постійного та змінного струму: з навантаженням типу «пара тертя», електроприводу рудникового акумуляторного електровозу АРП14-900 с електродвигуном послідовного збудження, електроприводу стрілочного переводу СП-6, електроприводу з асинхронним та лінійним електродвигунами. Для електроприводу механізму подачі металорізального верстата, в якому при повільних переміщеннях мали місце зривні автоколивання (stick-sleep), враховувалось також наявність зазору, що хоча і ускладнювало задачу поліпшення динаміки електроприводу за допомогою синтезованою НМ, надало задовільні результати. Розглянуті ЕМС відображають електроприводи конкретних машин і механізмів, при синтезі яких використовуються відповідні їм реальні дані. Одержано підтвердження ефективності використання НМ для поліпшення динаміки широкого класу електроприводів машин і механізмів, в тому разі для лінійного електроприводу електромагнітного типу.

У **додатках** наводяться матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальній процес, вихідний код бібліотеки на мові Pascal, який застосовувався при синтезі ЕМС з НМ і від'ємним в'язким тертям, а також наведено порівнювальний аналіз роботи класичних систем керування електроприводів з двигуном постійного струму з послідовним збудженням і асинхронним порівняно з електроприводами з нейронною мережею та список публікацій здобувача.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена важлива науково-практична задача усунення фрикційних автоколивань першого і другого роду за рахунок використання нейронних мереж та створеної методики їх синтезу, при цьому отримані наступні результати:

1. Обґрунтовано доцільність керування електроприводами з нелінійним тертям, характеристика якого містить «падаючу» ділянку, за допомогою нейрорегуляторів, що виконані базі багат шарових прямокутних нейронних мереж типу перцептрон, синтезованих методом генетичного алгоритму, що дозволило поліпшити якість регулювання ЕМС.

2. Створені математичні моделі одномасової та двомасової систем з від'ємним в'язким тертям в узагальнених безрозмірних параметрах і з нейронною мережею, що дозволило для двомасової системи запропонувати модифіковане сполучення узагальнених параметрів яке, на відміну від існуючих, надає більші можливості по співставленню впливу на динаміку загальних параметрів для одномасової та двомасової систем.

3. Запропоновано критерій навчання нейронної мережи, що відрізняється від традиційного критерію MSE введенням у підінтегральній вираз величини часу, що дозволило забезпечити більш високу швидкість синтезу нейронної мережи електромеханічних систем з фрикційним навантаженням, характеристика якого містить ділянку «від'ємного в'язкого тертя».

4. Для типових електромеханічних одномасових та двомасових систем проаналізовано вплив кількості нейронів у схованому шарі нейронної мережи, вплив виду активаційної функції, а також, параметрів електроприводу на показники якості регулювання, що дозволило запропонувати раціональну структуру нейронної мережи.

5. Виконане моделювання динамічних режимів висхідно нестійких одномасових та двомасових систем з нелінійною характеристикою тертя при керуванні їх за допомогою нейронної мережи, синтезованої методом генетичного алгоритму, дозволило забезпечити стійкість системи на «падаючій» ділянці характеристики тертя та усуненню фрикційних автоколивань в системах з характеристикою тертя нелінійною «у великому».

6. Створені методики синтезу одномасової та двомасової електромеханічних систем з нейронною мережею, які забезпечують усунення фрикційних автоколивань, що негативно впливають на технологічні показники машин і механізмів. Це дозволило показати можливість використання нейронної мережи у вигляді перцептрону виду NN3-10-1 з сигмоїдальною активаційною функцією нейронів прихованого шару і зворотного зв'язку за координатою швидкості електродвигуна із затримкою.

7. Вирішено ряд прикладних задач синтезу нейронних мереж для електроприводів постійного та змінного струму: рудникового електровозу АРП14-900, стрілочного переводу СП-6, електроприводу с асинхронним та лінійним електродвигунами. Проведені комп'ютерне моделювання ЕМС та експеримен-

ти на випробувальному стенді дозволили підтвердити теоретичні положення дисертаційної роботи.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальному процесі кафедри автоматизованих електромеханічних систем у розділах лекційних курсів «Інтелектуальні системи керування», «Інтелектуальні системи керування у мехатроніці» при підготовці магістрів за спеціальністю 141.9 та 141.10 «Енергетика, електроніка та електромеханіка».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.

2. 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.

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

Здобувачем виконане синтез нейронної мережі та моделювання електромеханічної системи.

4. 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.

Здобувачем виконано моделювання електромеханічної системи з синтезованою нейронною мережею.

5. Буряковский С. Г., Обруч И. В., Смирнов В. В. Системы скалярного и нейросетевого управления электроприводом стрелочного перевода. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПИ», 2010, № 28. С. 574 – 576.

Здобувачем синтезована електромеханічна система стрілочного переводу з нейронною мережею та виконане її моделювання.

6. 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.

Здобувачем запропоновано новий критерій навчання нейронної мережі та перевірена можливість використання методики синтезу нейронної мережі для електроприводу з двигуном послідовного збудження.

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

Здобувачем синтезована нейронна мережа для електроприводу з двигуном послідовного збудження з від'ємним в'язким тертям.

8. 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.

Здобувачем виконано синтез нейронної мережі.

9. 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.

Здобувачем виконано синтез нейронної мережі і моделювання динамічних процесів.

10. Клепиков В. Б., Осичев А. В., Донец Ю. Г., Клепиков А. В., Обруч И. В. Формы автоколебаний в электромеханических системах с отрицательным вязким 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.

Здобувачем проведено моделювання автоколивальних режимів.

11. 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.

Здобувачем виконано синтез нейронної мережі електромеханічної системи у фізичних параметрах.

12. 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.

Здобувачем запропоновано врахування обмежень по моменту електродвигуна при синтезі нейронної мережі.

13. 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.

Проведено аналіз впливу зворотних з'язків за різними координатами електроприводу.

14. 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.

Здобувачем виконано синтез нейронної мережі.

15. Клепиков В. Б., Обруч И. В. Исследование влияния вида активационной функции на показатели качества регулирования электромеханической системы при нейроконтроллерном управлении. Вестник Харьковского государственного политехнического института. Харьков: ХГПУ, 2000. Вып. 113. С. 369 – 371.

Здобувачем запропоновано набір видів активаційних функцій та проаналізовані показники регулювання.

16. 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.

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

Здобувачем побудованні діаграми якості динамічних процесів в електро-механічній системі з нейронною мережею при повільних переміщеннях.

18. 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.

Здобувачем запропонована модифікована система параметрів узгоджених з узагальненими параметрами одномасової системи.

19. 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.

Здобувачем перевірена можливість використання нейронної мережі, синтезованої для одномасової системи, для електро-механічної системи з пружними ланками.

20. 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.

Здобувачем виконано синтез та моделювання електроприводу.

АНОТАЦІЇ

Обруч І. В. Синтез електромеханічних систем з нейронною мережею та фрикційним навантаженням. – 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», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена синтезу електромеханічних систем з нейронною мережею типу перцептрон та фрикційним навантаженням, яке в реальних електроприводах носить нелінійний характер і проявляється в електромеханічних системах у вигляді фрикційних автоколивань. АКФ – особливий режим роботи електроприводів, негативно впливає на його функціонування. Існують різні способи усунення фрикційних автоколивань в електроприводі. В даній роботі, на основі проведених досліджень, запропонована нова методика усунення фрикційних автоколивань та вдосконалення динамічних властивостей електромеханічних систем за допомогою нейрорегуляторів, які побудовані на базі багатопарових прямоспрямованих нейронних мереж типу перцептрон, синтезованих з використанням методу генетичного алгоритму.

В дисертаційній роботі обґрунтовано вибір структури та методу навчання нейронної мережі, вибір зворотних зв'язків автоматизованої системи управління, отримані математичні моделі одномасові та двомасової електромеханічних систем з нейромережевим регулятором в безрозмірних параметрах, а також отримані моделі електроприводів з урахуванням нелінійності механічних характеристик навантаження. Проведено аналіз впливу параметрів об'єкта управління на динамічні режими роботи синтезованих одно- та двомасових електромеханічних систем з нейронною мережею.

Запропоновано новий критерій навчання нейронних мереж та розроблена методика синтезу нейромережевих регуляторів електромеханічних систем з нелінійним тертям. Розроблена методика апробована на прикладах синтезу різних електроприводів постійного та змінного струму конкретних машин і механізмів з використанням відповідних їм реальних даних. Приведені в дисертаційній роботі приклади пов'язані з виконанням бюджетних питань за планами МОН України та ініціативної тематики за запитамі підприємств. Показана ефективність використання нейронних мереж для широкого різноманіття електроприводів машин і механізмів.

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

Обруч І. В. Синтез электромеханических систем с нейронной сетью и фрикционной нагрузкой. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» – Националь-

ный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2019.

Диссертационная работа посвящена синтезу электромеханических систем с нейронной сетью типа персептрон (PERCEPTRON) и фрикционной нагрузкой, которая в реальных электроприводах носит нелинейный характер и проявляется в электромеханических системах в виде фрикционных автоколебаний. Фрикционные автоколебания – особый режим работы электроприводов, негативно сказывающийся на технологическом процессе, ухудшая его показатели, например, точность и чистоту обработки поверхностей деталей металлорежущих станков, производительность, КПД, повышая динамические нагрузки в кинематических звеньях, ухудшая качество переходных процессов и устойчивость, а, иногда, приводя к поломкам кинематических передач.

Существуют различные способы устранения фрикционных автоколебаний в электроприводе. В настоящей работе, на основе проведенных исследований, предложена методика устранения фрикционных автоколебаний и улучшения динамических свойств электромеханических систем с помощью нейрорегуляторов, которые построены на базе многослойных прямонаправленных нейронных сетей типа персептрон, синтезированных с применением метода генетического алгоритма.

В диссертационной работе обоснован выбор структуры и метода обучения нейронной сети, выбор обратных связей автоматизированной системы управления, получены математические модели одномассовой и двухмассовой электромеханических систем с нейросетевым регулятором в безразмерных обобщенных параметрах, а также получены модели электроприводов с учетом нелинейности механической характеристики нагрузки. Для описания динамических процессов, протекающих в двухмассовой электромеханической системе, предложено новое сочетание обобщенных параметров. Такое сочетание обобщенных параметров позволяет сопоставить результаты расчета электроприводов, представленных в виде одномассовой и двухмассовой расчетной схемы. Проведен анализ влияния параметров объекта управления на динамические режимы работы синтезированных одно- и двухмассовых электромеханических систем с нейронной сетью.

Предложен новый критерий обучения нейронных сетей и разработана методика синтеза нейросетевых регуляторов электромеханических систем с нелинейным трением. Новый критерий обучения нейронных сетей позволил существенно уменьшить время синтеза электроприводов с нейронной сетью. Разработанная методика апробирована на примерах синтеза различных электроприводов постоянного и переменного тока конкретных машин и механизмов с использованием соответствующих им реальных данных. Приведенные в диссертационной работе примеры связаны с выполнением бюджетных тем по планам МОН Украины и инициативной тематике по запросам предприятий. Показана эффективность использования нейронных сетей для широкого многообразия электроприводов машин и механизмов. Предложенная методика синтеза нейронных сетей для управления электроприводами была проверена при помощи разработанного испытательного стенда с линейным электродвигателем.

Ключевые слова: электропривод, электромеханическая система, нейронная сеть, активационная функция, генетический алгоритм, нелинейная фрикционная нагрузка.

Obruch I. V. Synthesis of electromechanical systems with a neural network and frictional loading. – Manuscript.

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, 2019.

The thesis is devoted to the synthesis of electromechanical systems with a perceptron neural network and frictional load, which is nonlinear in real electric drives and materialize in electromechanical systems in the form of friction self-oscillations. Friction self-oscillations is a special electric drives operation mode, adversely affecting its functioning. There are various ways to eliminate the friction self-oscillations in the electric drive. A new technique for eliminating of frictional self-oscillations and electromechanical systems dynamic properties improving by using neuro-regulators, which are based on multi-layer head-on neural perceptron network, synthesized by the genetic algorithm method, is proposed in the thesis.

The choice of structure, neural network teaching method, and the choice of the automated control system feedbacks is motivated. Mathematical models of one-mass and two-mass electromechanical systems with a neural network controller in dimensionless generalized parameters, and also models of electric drives taking into account the load mechanical characteristic nonlinearity are obtained. The control object parameters influence analysis on the dynamic modes of the synthesized one- and two-mass electromechanical systems with a neural network is carried out.

A new criterion for neural networks teaching has been proposed and a technique for the electromechanical systems with nonlinear friction neural network regulators synthesis has been developed. The developed technique was tested by synthesis of various DC and AC electric drives of specific machines and mechanisms using the corresponding real data. The examples cited in the thesis are related to the researches according to the plans of the Ministry of Education and Science of Ukraine and the initiative themes requested by enterprises. The efficiency of neural networks using for a wide variety of electric drives of machines and mechanisms is shown.

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



Відповідальний за випуск
д.т.н., проф. вчений секретар НТУ «ХП»
Заковоротний О. Ю.

Підписано до друку 16.04.2019 р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 19042202
Надруковано у копі-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М. В., свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354

