

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Варфоломієв Олексій Олексійович**

УДК 681.51.011

**СИНТЕЗ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО УПРАВЛІННЯ  
СИСТЕМОЮ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ**

Спеціальність 05.13.03 – системи і процеси керування

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків-2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі систем управління технологічними процесами і об'єктами Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Кузнецов Борис Іванович**,  
Українська інженерно-педагогічна академія,  
професор кафедри систем управління  
технологічними процесами і об'єктами

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Рогачев Олександр Іванович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри автоматичного управління  
в технічних системах

кандидат технічних наук  
**Слюсаренко Юрій Олексійович**,  
КП «Харківське конструкторське бюро  
по машинобудуванню ім. О.О. Морозова»,  
начальник сектору

Захист відбудеться « 21 » січня 2010 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 17 » грудня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ліберг І.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасна класична теорія управління містить теорію адаптивного і оптимального управління, яка дозволяє розробити оптимальні системи, в ході функціонування яких мінімізується або максимізується вибраний наперед критерій якості. Не дивлячись на величезну кількість робіт, обмеження, що накладаються різноманітним видів нелінійностей, динамічними властивостями об'єктів, їх нестационарністю, а також наявністю зовнішніх збурень і помилок вимірювань, не дозволяють створити єдиний підхід до побудови систем управління. Крім того, як класична, так і сучасна теорія управління ґрунтуються на ідеї лінеаризації систем. Проте, при рішенні практичних задач такий підхід може не забезпечити необхідні показники якості управління, оскільки модель, яка побудована на припущенні про лінійність системи, може не відображати її дійсних властивостей.

Останнім часом багатообіцяючою альтернативою класичним методам побудови систем управління нелінійними об'єктами є штучні нейронні мережі (ШНМ). Важливою властивістю ШНМ є їх здібність до навчання, що дозволяє отримати простіші рішення для складних задач управління. Крім того, наявність в структурі ШНМ нейронів з нелійними функціями активації дозволяє використовувати їх для вирішення задач управління нелінійними об'єктами, тоді як традиційні методи не забезпечують рішення подібних задач. Побудова системи управління на основі нейрорегулятора зводиться до послідовного вирішення задачі ідентифікації керованого об'єкта шляхом побудови його нейромоделі, а потім до побудови алгоритму управління відповідно до вибраної цілі управління і критерію якості управління.

Системи наведення і стабілізації характеризуються нелійними залежностями, складними динамічними властивостями, наявністю неконтрольованих завад і шумів, що не дозволяє досягти потрібних показників якості функціонування систем з традиційними стратегіями управління. Тому тема дисертаційної роботи, яка присвячена розробці нейромережевої системи наведення і стабілізації, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до плану науково-дослідних робіт Української інженерно-педагогічної академії в рамках державної науково-технічної теми МОН України "Розробка методів моделювання та проектування багатоканальних систем з урахуванням взаємних зв'язків між каналами", (ДР № 0104U000942), в якій здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка методів синтезу систем наведення і стабілізації для підвищення точності систем на основі нейромережевих регуляторів. Досягнення поставленої мети здійснюється рішенням наступних основних задач.

1. Аналіз існуючих систем наведення і стабілізації, а також можливостей і перспектив застосування нейромережевих систем.
2. Розвиток математичної моделі динаміки об'єкту управління системи наведення і стабілізації.
3. Розробка структурних схем систем наведення і стабілізації з нейромережевим регулятором.

4. Синтез нейромережових систем із застосуванням нейрорегулятора з прогнозом, які відповідають заданим технічним характеристикам.

5. Моделювання розроблених систем на ЕОМ.

6. Експериментальна перевірка отриманих результатів.

*Об'єктом дослідження є динамічні процеси в системах наведення і стабілізації з урахуванням пружних елементів, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів у кінематичних ланках.*

*Предметом дослідження є моделі і методи синтезу нейромережових систем наведення і стабілізації з урахуванням пружних елементів, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів в кінематичних ланках.*

*Методи дослідження.* Всі теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії автоматичного управління. Методи математичного моделювання використані для побудови математичних моделей роботи систем. Методи теорії штучних нейронних мереж дозволили синтезувати нейромережову модель об'єкту управління і вибрати процедуру його навчання. Методи нейроуправління стали основою синтезу нейромережових систем. Імітаційне моделювання дозволило проаналізувати якість функціонування систем і підтвердило ефективність отриманих результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна результатів, одержаних в процесі виконання дисертаційної роботи, полягає в наступному.

1. Вперше отримано наукове обґрунтування доцільності використання нейромережових структур з предиктивним управлінням для систем наведення і стабілізації.

2. Вперше запропоновані і синтезовані нейромережові системи наведення і стабілізації з пропорційним і пропорційно-диференціальним регуляторами в контурі положення, а також з передуправлінням за швидкістю, за допомогою яких вдалося задовольнити вимогам, які пред'являються до систем наведення і стабілізації.

3. Вперше запропонована математична модель системи наведення і стабілізації з урахуванням пружних елементів, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів в кінематичних ланках у вигляді багаточислової прямонаправленої мережі – багаточислового перцептрона.

4. Здійснений подальший розвиток математичних моделей об'єктів управління систем наведення і стабілізації з складними кінематичними зв'язками у вигляді двомасових електромеханічних систем з урахуванням нелінійних характеристик зовнішнього тертя в об'єктах управління і у виконавчих пристроях.

5. Одержали подальший розвиток методи синтезу нейромережових структур з прогнозом для систем наведення і стабілізації з математичними моделями у вигляді двомасових електромеханічних систем з нелінійними характеристиками зовнішнього тертя.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробці нейромережових систем наведення і стабілізації, що забезпечують високу якість регулювання з урахуванням нелінійних характеристик зовнішнього тертя в об'єктах управління і у виконавчих пристроях при різних вхідних діях і тридцятипроцентній зміні параметрів об'єкту регулювання, а також наявності збурюючих дій і шумів вимірювань.

Результати, одержані внаслідок виконання дисертаційної роботи, а саме: методика і результати синтезу нейромережевої системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів, результати випробування стенда електромеханічної слідкуючої системи з нейромережевим регулятором, впроваджені на НВП "Хартрон-АРКОС" (м. Харків). Застосування розробленої нейромережевої системи дозволило підвищити швидкодню і якість управління системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів з урахуванням нелінійних залежностей об'єкту управління, наявності випадкових зовнішніх дій і шумів вимірювання.

Основні положення дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри систем управління технологічними процесами і об'єктами Української інженерно-педагогічної академії при викладанні курсів "Автоматизовані системи управління типових промислових устаткувань", "Автоматизовані системи управління спеціального призначення", "Автоматизований електропривод типових промислових устаткувань" та при виконанні дипломних проектів.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, одержані здобувачем особисто. Серед них: розвинута математична модель динаміки об'єкту управління системи наведення і стабілізації; розроблені структурні схеми системи наведення і стабілізації з нейромережевим регулятором; розроблена модель системи наведення і стабілізації з урахуванням пружних елементів, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів в кінематичних ланках у вигляді багатопарової прямонаправленої мережі; синтезований нейромережевий регулятор з прогнозом, що використовує нейромережеву модель системи; виконано моделювання нейромережевих систем і проведено аналіз отриманих результатів; проведено експериментальні дослідження нейромережевої системи з використанням двоступеневого імітатора кутового руху.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та наукові результати були апробовані на: міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" (Алушта, 2005р., 2008р.); міжнародних науково-технічних конференціях "Машинобудування і техносфера XXI століття" (Севастополь, 2005р., 2008р.); 12 міжнародній конференції з автоматичного управління (Харків, 2005р.); міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми інформатики і моделювання" (Харків, 2008р.); XXXVIII, XXXIX, XLI і XLII науково-практичних конференціях науково-педагогічних працівників, аспірантів і співробітників УПА (Харків, 2005р., 2006р., 2008р., 2009р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 23 наукові роботи, з них 15 у наукових фахових виданнях ВАК України.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертація складається з вступу, 4 розділів основної частини, висновків, додатків і списку використаних літературних джерел. Повний об'єм дисертації складає 238 сторінок, серед них: 81 рисунок за текстом, 47 рисунків на 42 окремих сторінках, 7 таблиць, з яких 1 на повній сторінці, 7 додатків на 29 сторінках, список літературних джерел з 181 найменування на 17 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначені об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету і задачі дослідження, викладені положення, що визначають новизну і практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** розглянуті та проаналізовані перспективи застосування нейромережових систем наведення і стабілізації на сучасних бойових машинах піхоти і бойових колісних машинах, що модернізуються. Аналіз систем управління озброєнням легкоброньованих машин показав, що недоліки традиційного підходу до синтезу таких систем в значній мірі можуть бути подолані за рахунок застосування нейромережових технологій.

Виконано загальний огляд робіт, присвячених застосуванню штучних нейронних мереж в задачах управління. Проаналізовані нейромережові підходи до рішення задачі управління. Нейромережові технології управління дозволяють подолати багато складнощів, що виникають при роботі з нелінійними об'єктами або з об'єктами невідомої структури, які не можуть бути розв'язні за допомогою звичайних методів адаптивного управління.

Здібність штучних нейронних мереж до самонавчання дозволяє використовувати нейрорегулятори навіть в умовах істотних невизначеностей, тоді як для реалізації традиційних методів адаптивного управління необхідною умовою є наявність великого об'єму апріорної інформації про об'єкт управління. Простота реалізації нейронних мереж і їх здібність до навчання забезпечують їх особливу привабливість при управлінні складними нелінійними об'єктами в реальному часі.

Показана ефективність використання мережі типу багат шаровий перцептрон для побудови нейромережової моделі об'єкту управління. Багат шаровий перцептрон є універсальним апроксиматором-класифікатором і належить в сьогоднішній практиці до найбільш використовуваних нейронних мереж.

Проведено аналіз існуючих методів опису нелінійних динамічних об'єктів і розглянуто принципи побудови нейромережових NARX моделей, які відіграють фундаментальну роль при дослідженні нелінійних об'єктів за допомогою штучних нейронних мереж. Вибрано алгоритм навчання мережі. По результатам оцінки методів нейромережового управління сформульовані задачі дослідження.

У **другому розділі** розроблені структурні схеми системи наведення і стабілізації з нейромережовим регулятором.

Стабілізатори озброєння є складними багатоконтурними системами, які повинні забезпечувати необхідні показники якості, такі як точність стабілізації, плавність наведення, необхідний діапазон регулювання швидкості та ін. При рішенні задачі синтезу алгоритмів управління, що забезпечують необхідні показники якості, необхідно знати рівняння основних елементів стабілізатора озброєння і, перш за все, рівняння його виконавчих і вимірювальних пристроїв. Виконавчий пристрій стабілізатора озброєння складається з підсилювача потужності (ПП), приводного двигуна (ПД) і кінематичного пристрою сполучення (КПС). Кінематична схема системи наведення і стабілізації містить пружні елементи, наявність яких ускладнює розрахун-

кову схему механічної частини системи, перетворюючи її на багатомасову. Дослідження показали, що з достатньою для практичних розрахунків точністю, механічна частина системи може бути представлена у вигляді двомасової системи. Тоді процеси у виконавчому пристрої описуються наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} L_{\dot{y}} \frac{dI_{\dot{y}}}{dt} &= U_{\dot{a}} - R_{\dot{y}} I_{\dot{y}} - \tilde{n}_o \omega_{\dot{a}}; \\ J_{\dot{a}} \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} &= M_{\dot{a}} - \frac{M_{\dot{i}\delta}}{N} - M_{\dot{o}\dot{a}}; \\ J_{\dot{i}} \frac{d\omega_{\dot{i}}}{dt} &= M_{\dot{i}\delta} - M_{\dot{o}\dot{i}} - M_{\dot{n}}, \end{aligned}$$

де  $U_{\dot{a}} = k_{\dot{i}\dot{i}} \cdot U_{\dot{a}\dot{o}}$  - напруга, що поступає на якірну обмотку ПД;  $U_{\dot{a}\dot{o}}$  - величина вхідної дії;  $k_{\dot{i}\dot{i}}$  - коефіцієнт передачі ПП;  $M_{\dot{a}} = I_{\dot{y}} \cdot \tilde{n}_o$  - електромагнітний момент двигуна;  $I_{\dot{y}}$  - струм якоря ПД;  $c_{\Phi} = k_d \Phi$ ;  $k_d$  - конструктивний коефіцієнт ПД;  $\Phi$  - магнітний потік ПД;  $\omega_d$  - швидкість обертання валу ПД;  $\omega_m$  - швидкість обертання навантаження стабілізатора озброєння;  $R_{\dot{y}}$ ,  $L_{\dot{y}}$  - опір та індуктивність якірної обмотки ПД;  $J_d$  - момент інерції ротора ПД;  $J_m$  - момент інерції навантаження стабілізатора озброєння;  $N$  - передавальне число КПС;  $M_{\dot{t}\dot{d}}$  - момент сухого тертя в підшипниках ПД;  $M_{\dot{t}\dot{m}}$  - момент тертя КПС;  $M_c$  - збурюючий момент, обумовлений коливаннями корпусу носія;  $M_{\dot{i}\delta}$  - момент пружності КПС:

$$M_{\dot{i}\delta} = \begin{cases} \tilde{n} \cdot (\Delta\varphi_1 - 0,5\sigma) & \Delta\varphi_1 > 0,5\sigma; \\ 0 & -0,5\sigma < \Delta\varphi_1 < 0,5\sigma; \\ \tilde{n} \cdot (\Delta\varphi_1 + 0,5\sigma) & \Delta\varphi_1 < -0,5\sigma; \end{cases}, \text{ і } \delta \in$$

$c$  - коефіцієнт жорсткості елементів трансмісії;  $\sigma$  - величина люфту між зубами провідної і відомої шестерні;  $\Delta\varphi_1$  - різниця між кутами повороту валу двигуна  $\varphi_{\dot{a}}$  і робочого механізму  $\varphi$ , що описується рівнянням стану

$$\frac{d(\Delta\varphi_1)}{dt} = \frac{\omega_{\dot{a}}}{N} - \omega_{\dot{i}}.$$

При русі машин по пересіченій місцевості виникають коливання корпусу, які зумовлюють збурюючі моменти, що діють на озброєння. Оскільки спектральна щільність цих дій відома, доцільно формувати випадкові зміни збурюючого моменту  $M_c(t)$  від джерела випадкового сигналу типу білого шуму  $V_{\text{бш}}$  інтенсивністю  $\nu$  за допомогою формуючого фільтру з передавальною функцією коливальної ланки  $W(p) = k_{\dot{A}} \cdot \omega_{\dot{a}}^2 / (p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_{\dot{a}} \cdot p + \omega_{\dot{a}}^2)$ , де  $\omega_b$  - резонансна частота власних коливань;  $\xi$  - коефіцієнт демпфування;  $k_b$  - коефіцієнт посилення формуючого фільтру.

Запропоновано систему підлеглого регулювання з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою стабілізатора озброєння в контурі регулювання швидкості з використанням у контурі положення П-регулятора, ПД-регулятора або П-регулятора з передуправлінням за швидкістю.

Структурна схема пропонованої системи з П-регулятором і з передуправлінням за швидкістю приведена на рис. 1. Коефіцієнт посилення П-регулятора положення позначений  $k_p$ , а коефіцієнт передуправління –  $k_n$ . Електрична частина приводу представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з коефіцієнтом посилення  $1/R_y$  і постійною часу, що дорівнює електромагнітній постійній часу якірного ланцюга  $T_a = L_y / R_y$ .

Рис. 1. Структурна схема двоконтурної нейромережевої системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором в контурі швидкості

Також запропоновано одноконтурну систему з включенням нейрорегулятора на вхід замкнутого контуру положення. В цьому випадку компенсація наявних нелінійностей здійснюється на рівні задаючої дії, а не на рівні керуючої дії на об'єкт. У контур положення включений П-регулятор. Схема зазначеної нейромережевої системи представлена на рис. 2. Згідно з отриманими результатами досліджень нейромережеві системи підлеглого регулювання з включенням нейрорегулятора в контур швидкості мають кращі показники якості.

Рис. 2. Структурна схема системи наведення і стабілізації з включенням нейрорегулятора на вхід замкнутого контуру положення



Проведено синтез системи наведення і стабілізації з ПД-регулятором. Як показали дослідження, ПД-регулятори не можуть забезпечити задані технічні характеристики систем наведення і стабілізації.

Виконано аналіз структур систем нейрорегулювання, що використовуються на теперішній час, і вибрано принцип нелінійного предиктивного регулювання при побудові нейромережевого регулятора системи наведення і стабілізації.

Розглянута ефективна реалізація узагальненого управління з прогнозом з використанням багатошарової прямонаправленої нейронної мережі, як нелінійної моделі об'єкту управління. Показано, що завдяки використанню оптимізаційного алгоритму Ньютона-Рафсона, число ітерацій, необхідних для збіжності, значно менше, ніж при використанні інших методів, внаслідок чого алгоритм є швидшим за інші методи, і може використовуватися для управління в режимі реального часу.

**Третій розділ** присвячений синтезу нейрорегулятора з прогнозом NN Predictive Controller з використанням системи MATLAB.

Проаналізовані принципи побудови нейрорегуляторів, реалізованих в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB: нейрорегулятор з прогнозом NN Predictive Controller, нейрорегулятор на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім NARMA-L2 Controller і нейрорегулятор на основі еталонної моделі Model Reference Controller. Для системи наведення і стабілізації вибраний нейрорегулятор NN Predictive Controller, оскільки застосування нейрорегуляторів NARMA – L2 і Model Reference Controller не дає позитивних результатів.

Проектування нейрорегуляторів складається з двох етапів: етапу ідентифікації керованого об'єкту і етапу синтезу закону управління. При ідентифікації розробляється модель керованого об'єкту у вигляді нейронної мережі, яка в подальшому використовується для синтезу регулятора. Для кожного з трьох нейронрегуляторів використовується одна і та ж сама процедура ідентифікації, проте етапи синтезу істотно розрізняються.

Рис. 3. Нейронна мережа регулятора об'єкту управління

Нейронна мережа регулятора об'єкту управління представлена на рис. 3. Вона має 2 шари нейронів і використовує лінії затримки (ЛЗ), щоб запам'ятати попередні значення входів і виходів об'єкту для прогнозування майбутнього значення виходу. Налаштування параметрів цієї мережі виконується в режимі offline з використанням заздалегідь згенерованої навчальної послідовності.

Рис. 4. Схема системи з регулятором, що використовує принцип управління з прогнозом

Схема на рис. 4 ілюструє процес управління з прогнозом. Регулятор склада-

ється з нейромережевої моделі керованого об'єкту і блоку оптимізації, який визначає значення пробного керуючого сигналу  $u'$ , що мінімізує критерій якості управління

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [y_r(t+j) - y_m(t+j)]^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} [u'(t+j-1) - u'(t+j-2)]^2, \quad (1)$$

де константи  $N_1$ ,  $N_2$  і  $N_u$  задають межі, усередині яких обчислюються помилки стеження і потужність керуючого сигналу;  $y_r$ ,  $y_m$  – бажана і дійсна реакція моделі даної системи; величина  $\rho$  визначає внесок потужності управління в критерій якості.

Структурній схемі системи наведення і стабілізації, що приведена на рис. 1, відповідає побудована у вікні системи SIMULINK схема системи управління з нейрорегулятором NN Predictive Controlle (рис. 5).

Рис. 5. Схема системи управління з нейрорегулятором NN Predictive Controller

Ця структура містить в собі блок нейрорегулятора NN Predictive Controller і блок Subsystem, що відповідає заданому об'єкту управління (рис. 6), а також блок генерації еталонного ступінчастого сигналу з випадковою амплітудою Random Reference та блоки побудови графіків. Особливість цієї структури полягає в тому, що вона виконує не лише функції блок-схеми системи SIMULINK, а й функції графічного інтерфейсу користувача GUI.

Рис. 6. Схема підсистеми Subsystem

Шляхом варіювання параметрів сигналів, що подаються на модель виконавчого пристрою, здійснена генерація навчальної послідовності, яка в подальшому дозволила виконати тренування мережі з високим ступенем точності.

Розроблена двошарова нейронна мережа з прямою передачею сигналу (рис. 7) і виконано навчання мережі. Визначена кількість нейронів прихованого шару. По-

милка навчання мережі складає  $6,17 \cdot 10^{-11}$ , миттєві помилки на навчальній, контрольній і тестовій множині не перевищують  $1 \cdot 10^{-4}$ .

Після завершення навчання виконується побудова динамічної мережі із заданим числом затримок по входу і виходу моделі без зміни набутих значень вагів і зсувів нейронів шарів. Схема моделі динамічної мережі показана на рис. 8. Мережа відповідає наступним параметрам: розмір прихованого шару  $S = 12$ , кількість елементів запізнювання на вході моделі  $N_i = 2$  і кількість елементів запізнювання на виході моделі  $N_j = 5$ . Параметри нейромережевої моделі керованого об'єкту вводяться в блок NN Predictive Controller системи SIMULINK.

При синтезі нейрорегулятора варіюються величини  $N_2$ ,  $N_u$  і  $\rho$  (величина  $N_1$  фіксована і рівна 1), а також параметр одновимірного пошуку  $\alpha$ , який задає поріг зменшення показника якості і число ітерацій на 1 такт дискретності  $\gamma$ . Задається також процедура одновимірного пошуку.

При ідентифікації об'єкту управління найбільш важливим питанням є вибір кількості нейронів прихованого шару  $S$  і елементів запізнювання на вході  $N_i$  і виході  $N_j$  моделі. Успіх тренування мережі в значній мірі залежить від довжини навчальної вибірки  $N_B$ , такту дискретності  $\Delta t$  і кількості циклів навчання  $N_{\text{ц}}$ . Для отримання представницької вибірки необхідно правильно задати максимальне  $t_{\text{max}}$  і мінімальне  $t_{\text{min}}$  значення інтервалу ідентифікації. Встановлено, що найвищу точність ідентифікації і якість регулювання забезпечують наступні параметри:  $N_2 = 24$ ,  $N_u = 2$ ,  $\rho = 0,05$ ,  $\gamma = 2$ ;  $\alpha = 0,001$ ,  $S = 12$ ,  $N_j = 5$ ;  $N_i = 2$ ,  $t_{\text{min}} = 0,01 \text{ c}$ ,  $t_{\text{max}} = 0,1 \text{ c}$ ,  $N_{\text{с}} = 300$ .

Рис. 7. Модель статичної мережі з прямою передачею

Рис.8. Модель динамічної мережі з елементами затримок

Виконано синтез нейрорегулятора з прогнозом NN Predictive Controller для одноконтурної системи з включенням нейрорегулятора на вхід замкнутого контуру положення та синтез нейрорегуляторів NARMA-L2 Controller і Model Reference Controller для двоконтурної нейромережевої системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором в контурі швидкості.

У четвертому розділі виконано дослідження нейромережевих систем наведення і стабілізації із застосуванням синтезованих нейрорегуляторів шляхом моделювання на ЕОМ, а також проведені експериментальні дослідження розробленої системи на макеті з використанням двоступеневого імітатора кутового руху.

Проведено моделювання на ЕОМ системи наведення і стабілізації, побудованої за принципом підлеглого регулювання з синтезованим нейрорегулятором з прогнозом NN Predictive Controller у контурі швидкості і П-регулятором положення. Обґрунтовано значення коефіцієнту посилення П-регулятора положення  $k_p = 25$ , яке використовувалося у подальших дослідженнях.

На рис. 9 приведені графіки перехідних процесів змінних стану синтезованої системи. Згідно з отриманими характеристиками нейромережева система має високі показники якості функціонування. Кут  $\varphi_3 = 0,05 \text{ рад}$  відпрацьовується за  $t = 0,1 \text{ с}$ , що відповідає завданню. Перерегулювання складає 1,03%.

Рис.9. Графіки перехідних процесів змінних стану системи:

- а) – кутів  $\varphi$  і  $\varphi_c$ ; б) – напруги двигуна  $U_{\dot{a}}$ ; в) – моменту двигуна  $\dot{I}_{\dot{a}}$ ;  
г) – швидкості механізму  $\omega_1$ ; д) – швидкості двигуна  $\omega_{\dot{a}}$ ; е) – моменту пружності  $M_{\tau\delta}$

З метою усунення перерегулювання запропоновано використовувати ПД-регулятор в контурі положення. Встановлено, що кут  $\varphi$  відпрацьовується без перерегулювання при значенні коефіцієнта диференціальної складової регулятора  $k_d = 0,04$  та незмінному значенні коефіцієнту посилення пропорційної складової регулятора.

Відповідно до завдання, система повинна забезпечити високу якість регулювання при зміні параметрів об'єкту управління в ході функціонування системи. В дисертаційній роботі проведено моделювання функціонування системи при зміні параметрів об'єкту управління в широких межах. Встановлено, що зміна параметрів в межах 30% не призводить до істотного погіршення показників якості функціонування системи, що задовольняє технічним вимогам до системи.

Виконано дослідження впливу зовнішніх збурюючих дій. Схема моделі об'єкту управління з урахуванням збурюючого моменту  $\dot{I}_{\bar{n}}(t)$  приведена на рис. 10.

Рис. 10. Схема моделі об'єкту управління з урахуванням збурюючого моменту

На рис. 11 приведений графік відпрацювання заданого кута  $\varphi$  в системі з ПД регулятором, а на рис. 12 – в нейромережевій системі при реалізації збурюючого моменту  $\dot{I}_{\bar{n}}(t)$ , що приведена на рис. 13. В системі з ПД-регулятором відхилення кута  $\varphi$  від усталеного значення складають в середньому  $\pm 0,001 \text{ рад}$ , а в системі з нейрорегулятором  $\pm 0,0007 \text{ рад}$ , тобто відхилення зменшились в 1,43 рази.

Рис 11. Відрізок кута  $\varphi$  в системі з ПД - регулятором

Рис 12. Відрізок кута  $\varphi$  в системі з нейрорегулятором

Рис. 13. Збурюючий момент  $\dot{I}_{\bar{n}}(t)$

Виконано моделювання системи в режимі відпрацювання вхідної дії, що лінійно змінюється, при мінімальній швидкості наростання (зменшення) кута  $\omega_{\varphi \min} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$  і при  $\omega_{\varphi} = 0,0035 \text{ с}^{-1}$ . Встановлено, що при  $\omega_{\varphi \min} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$  відпрацювання кута здійснюється незадовільно (рис. 14).

Рис. 14. Перехідні процеси в нейромережевій системі при дії, що лінійно змінюється, при  $\omega_{\varphi \min} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$ : а) – кути  $\varphi$  і  $\varphi_c$ ; б) – швидкість двигуна  $\omega_a$ ; в) – швидкість механізму  $\omega$

Для покращення показників якості системи розроблена система, компонентами якої є: лінійний регулятор положення, нейрорегулятор з прогнозом у контурі швидкості і передуправління за швидкістю (рис. 15).

Рис. 15. Схема нейромережевої системи управління з передуправлінням

Встановлено, що коефіцієнт передуправління  $k_{\text{п}}$  істотно впливає на кінетичну помилку. Отримані апроксимуючі функції, які дозволяють визначити коефіцієнт передуправління  $k_{\text{п}}$  в залежності від швидкості наростання (зменшення) кута:

$$k_{\text{п}} = \begin{cases} 0 & \text{ї дє } \varphi'_{\zeta}(t) = 0; \\ 1 + 7,29 \cdot k1 / \exp(k - 1)^2; & k = \log(10 \cdot |\varphi'_{\zeta}(t)| / \omega_{\text{н. min}}) \text{ ї дє } \varphi'_{\zeta}(t) \neq 0, \end{cases}$$

де  $k1$  - коефіцієнт, що має наступні значення:  $k1=1$  при  $\varphi'_{\zeta}(t) \geq 0$  і  $k1=2,2$  при  $\varphi'_{\zeta}(t) < 0$ . Приведена залежність реалізована у вигляді MATLAB Fcn2 (див. рис.15).

Використання принципу передуправління дозволяє зменшити статичну і кінетичну помилки нейромережевої системи у кілька разів у порівнянні з нейромережевою системою з ПД-регулятором у контурі положення (рис. 16).

Рис. 16. Перехідні процеси в нейромережевій системі з передуправлінням при дії, що лінійно змінюється: а) –кути  $\varphi$  і  $\varphi_{\zeta}$ ; б) – швидкість двигуна  $\omega_{\text{д}}$ ; в) – швидкість механізму  $\omega_1$

Дослідження впливу люфту між зубами провідної і відомої шестерні на якість функціонування системи проводилося шляхом введення в схему моделі об'єкту управління, розроблену в SIMULINK, ланки Dead Zone (див. рис. б) з величиною люфту  $0,5\sigma = \pm 0,75'$ . Встановлено, що люфт практично не впливає на якість функціонування системи при типових вхідних діях.

Дослідження системи з врахуванням завад вимірювання кута  $\varphi$  і швидкості  $\omega_1$  показали, що при ступінчастій і гармонійній вхідних діях завади практично не позначаються на характері перехідних процесів. При вхідній дії, що лінійно зміню-

ється, наявність завад призводить до незначного погіршення якості управління і зростанню помилок відпрацювання кута.

Одним з видів задаючої дії, яка повинна ефективно відпрацьовуватися системою, є гармонійна дія з частотою  $1 \text{ Гц}$  і амплітудою  $3^\circ$  ( $0,053 \text{ рад}$ ). Встановлено, що в нейромережевій системі з передуправлінням максимальна помилка відпрацювання кута складає  $\Delta\varphi_{\max} = 0,0003 \text{ рад}$  ( $0,017^\circ$ ), що задовольняє технічним вимогам до системи (рис. 17).

Рис. 17. Відпрацювання кута  $\varphi(t)$  в нейромережевій системі з передуправлінням при гармонійній вхідній дії

Виконано дослідження одноконтурної нейромережевої системи наведення і стабілізації з включенням нейрорегулятора на вхід замкнутого контуру положення. Показано, що показники якості функціонування цієї системи поступаються відповідним показникам якості функціонування двоконтурної системи з нейрорегулятором, включеним в контур швидкості.

Проведено дослідження нейромережевих систем з нейрорегулятором на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім NARMA-L2 Controller і нейрорегулятором на основі еталонної моделі Model Reference Controller. Показано, що перехідні процеси змінних стану систем мають незадовільні показники якості. Це не дозволяє використовувати вказані нейрорегулятори в системі наведення і стабілізації.

В результаті дослідження системи наведення і стабілізації з ПД-регулятором встановлено, що ПД-регулятор не забезпечує задані характеристики системи. Зокрема, час відпрацювання кута  $\varphi_c = 1 \text{ рад}$  складає  $t = 6 \text{ с}$ , перерегулювання дорівнює  $26\%$ , що неприпустимо для систем наведення і стабілізації.

Виконані експериментальні дослідження синтезованої нейромережевої системи з використанням двоступеневого імітатора кутового руху. Експериментальні дані відрізняються від результатів комп'ютерного моделювання системи в аналогічних режимах роботи на  $5-7\%$ , що підтверджує достовірність отриманих результатів.

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що синтезована двоконтурна нейромережева система наведення і стабілізації з нейрорегулятором NN Predictive Controller в контурі швидкості відповідає заданим технічним характеристикам.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача розробки нейромережевої системи наведення і стабілізації на основі нейрорегулятора з прогнозом, що забезпечує високоякісне регулювання з урахуванням пружних елементів, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів у кінематичних ланках, а також зовнішніх збурюючих дій і шумів вимірювання.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. В результаті аналізу систем наведення і стабілізації і з урахуванням вимог, що пред'являються до сучасних систем управління, науково обґрунтовано перспек-

тивність застосування нейромережових технологій для управління об'єктами систем наведення і стабілізації.

2. Розвинуто математичну модель динаміки об'єкту управління системи наведення і стабілізації з урахуванням пружних елементів у вигляді двомасової електро-механічної системи. Модель складена з урахуванням зовнішніх збурюючих дій, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів в кінематичних ланках.

3. Розроблені структурні схеми системи наведення і стабілізації з нейромережовим регулятором: системи підлеглого регулювання з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою стабілізатора в контурі регулювання швидкості і одноконтурна система, що реалізовує компенсацію нелінійностей на рівні сигналів завдання. Показано, що ПІД-регулятор, на відміну від розроблених систем, не може забезпечити задані технічні характеристики системи.

4. Проаналізовані принципи побудови нейрорегуляторів, реалізованих в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. В результаті порівняльного аналізу нейрорегуляторів NARMA-L2 Controller, Model Reference Controller та NN Predictive Controller обґрунтовано доцільність використання останнього у системі наведення і стабілізації.

5. Розроблена математична модель системи наведення і стабілізації з урахуванням пружних елементів, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів в кінематичних ланках у вигляді багатозарової прямонаправленої мережі – багатозарового персептрону. Розроблено двошарову нейронну мережу з прямою передачею сигналу і виконано навчання з високим ступенем точності: помилка навчання мережі складає  $6,17 \cdot 10^{-11}$ , миттєві помилки на навчальній, контрольній і тестовій множині не перевищують  $1 \cdot 10^{-4}$ .

6. Виконано синтез систем наведення і стабілізації з нейромережовим регулятором швидкості, пропорційним або пропорційно-диференціальним регулятором положення, а також системи, компонентами якої є: лінійний регулятор положення, нейромережовий регулятор швидкості та передуправління за швидкістю.

7. В результаті дослідження якості функціонування систем шляхом моделювання на ЕОМ встановлено, що синтезований нейрорегулятор з прогнозом забезпечує високу якість регулювання з урахуванням моментів сухого тертя на валу двигуна і механізму, зазорів в кінематичних ланках, зовнішніх збурюючих дій, завад вимірювання основних координат при різних вхідних діях (ступінчастій, лінійно-наростаючій, гармонійній) і тридцятипроцентній зміні параметрів об'єкту регулювання в ході його функціонування. Розроблена нейромережева система наведення і стабілізації задовольняє всім заданим вимогам: при ступінчастій вхідній дії кут в діапазоні від  $\varphi_3 = 0,01 \text{ рад}$  до  $\varphi_3 = 1 \text{ рад}$  відпрацьовується без перерегулювання, час відпрацювання кута  $\varphi_3 = 0,05 \text{ рад}$  складає  $t = 0,1 \text{ с}$ ; кут  $\varphi$  ефективно відпрацьовується при вхідній дії, що лінійно змінюється з мінімальною швидкістю  $\omega_{\varphi_{\min}} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$ ; помилка відпрацювання гармонійного сигналу з частотою  $1 \text{ Гц}$  і амплітудою  $3^\circ$  ( $0,053 \text{ рад}$ ) не перевищує  $0,017^\circ$  ( $0,0003 \text{ рад}$ ).



Показано, що показники якості одноконтурної системи при включенні нейрорегулятора на вхід замкнутого контуру положення поступаються відповідним показникам якості системи з нейрорегулятором у контурі швидкості.

8. Експериментальні дослідження синтезованої нейромережевої системи наведення і стабілізації з використанням двоступеневого імітатора кутового руху підтвердили висновки теоретичних досліджень і показали, що за допомогою синтезованого нейрорегулятора забезпечується виконання технічних вимог до системи.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено на НВП "Хартрон-АРКОС" і у навчальному процесі кафедри СУТПіО УПА.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Нейросетевое управление нелинейными электромеханическими системами при случайных воздействиях / Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, К.И. Богаенко, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Автоматизация виробничих процесів. – 2005. – №2 (21). – С. 63–66.

*Здобувачеві належить вибір параметрів нейрорегулятора для управління нелінійною електромеханічною системою і моделювання системи на ЕОМ.*

2. Управление нелинейными электромеханическими системами при случайных внешних воздействиях с помощью нейрорегуляторов / Б.И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, В. В. Коломиец, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків : НТУ "ХПІ", 2005. – Вип. 45. – С. 485–487.

*Здобувачем виконано синтез нейрорегулятора з прогнозом з використанням нейронної мережі і визначення показників якості нейромережевої системи.*

3. Варфоломеев А.А. Синтез нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин с использованием нейрорегулятора с предсказанием / Б. И. Кузнецов, А. А. Варфоломеев // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харків : ХНУРЕ, 2007. – №141. – С.81-90.

*Здобувачем розроблена структурна схема системи наведення і стабілізації, компонентами якої є: лінійний регулятор положення, нейронний регулятор швидкості і передуправління за швидкістю, проведено моделювання системи при різних видах вхідних дій.*

4. Варфоломеев А.А. Разработка нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 31–34.

*Здобувачем розроблена нейромережева модель системи наведення і стабілізації та виконано моделювання системи на ЕОМ.*

5. Варфоломієв О.О. Побудова нейромережевої системи керування нелінійною електромеханічною системою з використанням нейроконтролера з передбаченням / Б. І. Кузнецов, Т. Ю. Василець, О. О. Варфоломієв // Електроінформ. – 2008. – №1. – С. 6–10.

*Здобувачеві належить синтез нейромережевої системи управління нелінійним динамічним об'єктом з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою в контурі швидкості, з ПД – регулятором в контурі положення.*

6. Варфоломеев А.А. Управление нелинейным динамическим объектом при помощи нейроконтроллера с предсказанием / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Східно – Європейський журнал передових технологій. – 2008. – №2/2 (32). – С.67–71.

*Здобувачем розроблена структурна схема нейромережевої системи з урахуванням сухого тертя на валу двигуна і механізму і з урахуванням люфту в елементах механічної частини системи, проведено моделювання системи.*

7. Варфоломієв О.О. Система наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейромережевим регулятором / Б. І. Кузнецов, Т. Ю. Василець, О. О. Варфоломієв // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – №1(13). – С.112–116.

*Здобувачем виконано синтез нейрорегулятора з прогнозом NN Predictive Controller, проведено моделювання системи наведення і стабілізації.*

8. Варфоломеев А.А. Нейросетевая система наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Системи управління, навігації та зв'язку. – К. : Центральний наук.–дослідний ін–т навігації і управління, 2008. – вип. 1(5). – С.86–90.

*Здобувачем проведені дослідження якості функціонування нейромережевої системи наведення і стабілізації за наявності зовнішніх збурюючих дій.*

9. Варфоломеев А.А. Синтез нейроконтроллера с предсказанием для двухмассовой электромеханической системы / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А.А. Варфоломеев // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №3. – С.27-32.

*Здобувачеві належить синтез нейрорегулятора з прогнозом для двомасової електромеханічної системи, аналіз показників якості системи.*

10. Варфоломеев А.А. Нейроуправление нелинейным динамическим объектом с использованием метода обобщенного управления с предсказанием / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №4. – С. 34–41.

*Здобувачем розроблена структурна схема системи управління нелінійним динамічним об'єктом з нейромережевим регулятором і виконано дослідження якості функціонування системи в перехідних режимах.*

11. Варфоломеев А.А. Синтез и исследование динамических характеристик нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин при случайных возмущающих воздействиях / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Електротехніка і електромеханіка. – 2008.– №5. – С.20–23.

*Здобувачем запропонована схема моделі об'єкту управління з урахуванням зовнішніх збурюючих дій, проведено моделювання системи.*

12. Нейросетевое управление двухмассовой электромеханической системой / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, В. В. Коломиец, А. Е. Машнев, А. А. Варфоломеев // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків : НТУ "ХПІ", 2008. – Вип. 30. - С. 568–569.

*Здобувачем виконано моделювання і проведено аналіз системи з ПД - регулятором і з нейрорегулятором за наявності зовнішніх збурюючих дій.*

13. Варфоломеев А.А. Разработка и исследование нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Зб. наук. праць Харківського ун-ту повітряних сил. – Харків : ХУПС МО України, 2008. – Вип. 3(18). – С. 141–145.

*Здобувачем виконано синтез нейромережевої системи і проведено наліз якості функціонування системи при лінійно наростаючій вхідній дії.*

14. Варфоломієв О.О. Нейромережеве керування системою наведення і стабілізації / Б. І. Кузнецов Б.И., Т. Ю. Василець, О. О. Варфоломієв // Електроінформ. – 2009. – №1. – С.12–14.

*Здобувачем розроблена схема нейромережевої системи регулювання в системі MATLAB і проведено моделювання системи при гармонійній вхідній дії.*

15. Варфоломеев А.А. Система управления нелинейным динамическим объектом с нейрорегулятором NN Predictive Controller / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 39–42.

*Здобувачем розроблена схема системи управління нелінійним динамічним об'єктом з нейромережевим регулятором, включеним на вхід замкнутого контуру положення. Виконаний синтез нейрорегулятора і проведено моделювання системи.*

16. Управление двухмассовой электромеханической системой с помощью нейроконтроллера / Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, В. В. Коломиец, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XII междунар. науч.-техн. конф. – Донецк : Дон. НТУ, 2005. – Т. 2. – С. 170–173.

*Здобувачеві належить розробка структурної схеми системи управління двомазовою електромеханічною системою з нейрорегулятором.*

17. Синтез нейронных сетей для управления нелинейными электромеханическими системами при случайных воздействиях / Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Автоматика 2005 : матеріали 12 міжнар. конф. з автоматичного управління, 30 травня – 3 червня 2005 р. : тези доп. / Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків : НТУ "ХПИ", 2005. – Т.2. – С.68.

*Здобувачем проведено вибір методу управління нелінійними електромеханічними системами при випадкових діях.*

18. Синтез нейрорегуляторов для систем управления при случайных внешних сигналах / А. А. Варфоломеев, Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, М. Л. Кулигина, С. Н. Цвинтарная // Зб. тез доповідей XXXVIII наук.-практичної конф. наук.-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників академії. – Харків : УПА, 2005. – Ч.2. – С. 45.

*Здобувачем виконано вибір параметрів нейрорегулятора для системи управління нелінійним об'єктом при випадкових зовнішніх діях.*

19. Моделирование нейросетевых систем управления в программной среде MATLAB / В. И. Барсов, Б. И. Кузнецов, А. А. Варфоломеев., Т. Е. Василец // Зб. тез доповідей XXXIX наук.-практичної конф. наук.-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників академії. – Харків : УПА, 2006. – Ч.1. – С. 70–71.

*Здобувачем здійснено аналіз нейрорегуляторів, реалізованих в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB.*

20. Варфоломеев А.А. Идентификация объекта управления в программной среде MATLAB / В. И. Барсов, Б. И. Кузнецов, А. А. Варфоломеев, Т. Е. Василец // Зб. тез доповідей ХІІ нау.-практичної конф. наук.-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників академії. – Харків : УПА, 2008. – Ч.6. – С.13.

*Здобувачем виконана побудова моделі нелінійного об'єкту управління у вигляді двошарової нейронної мережі, що містить лінії затримки.*

21. Варфоломеев А.А. Нейросетевая система наведения и стабилизации / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Проблемы информатики і моделювання : матеріали восьмої міжнар. наук.-техн. конф., 26-28 листопада 2008 р. : тези доп. / Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків : НТУ "ХПІ", 2008. – С.70.

*Здобувачем визначені параметри нейрорегулятора системи.*

22. Синтез и исследование нейросетевой системы управления нелинейным динамическим объектом / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, В. В. Коломиец, А. Е. Машнев, А. А. Варфоломеев // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. – Донецк: Дон. НТУ, 2008. – Т. 2. – С. 165–169.

*Здобувачем встановлена залежність, що дозволяє визначити коефіцієнт передуправління нейромережевої системи у функції швидкості зміни задаючої дії.*

23. Варфоломеев А.А. Разработка структурной схемы механической части системы наведения и стабилизации / Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев, С. А. Шеховцова // Зб. тез доповідей ХІІІ нау.-практичної конф. науково-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників академії. – Харків: УПА, 2009. – Ч.6.– С. 11.

*Здобувачем розроблена схема механічної частини системи наведення і стабілізації у вигляді двомасової системи.*

## АНОТАЦІЇ

**Варфоломієв А.А. Синтез нейромережевого управління системою наведення і стабілізації.** – Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи і процеси керування. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2009.

Дисертація присвячена рішенням задачі синтезу нейромережевої системи наведення і стабілізації на основі нейрорегулятора з прогнозом, що забезпечує високоякісне регулювання з урахуванням зовнішніх збурюючих дій і шумів вимірювання.

Розроблена математична модель динаміки об'єкту управління системою наведення і стабілізації з урахуванням пружних елементів, нелінійних залежностей зовнішнього тертя і зазорів у кінематичних ланках, а також зовнішніх збурюючих дій і шумів вимірювання. Розроблені структурні схеми системи наведення і стабілізації з нейромережевим регулятором. Запропоновані системи підлеглого регулювання з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою стабілізатора озброєння в контурі регулювання швидкості і одноконтурна система, що реалізовує компенсацію нелінійностей на рівні сигналів завдання.

Синтезована за допомогою багатшарової прямонаправленої мережі модель виконавчого пристрою системи наведення і стабілізації озброєння з високою точніс-

тю ідентифікації. Використовуючи принцип предиктивного методу регулювання на основі нейромережевої моделі об'єкту, синтезований нейромережевий регулятор, що забезпечує високу якість управління.

Проведено дослідження якості функціонування систем шляхом моделювання на ЕОМ та експериментальні дослідження синтезованої нейромережевої системи наведення і стабілізації з використанням двоступеневого імітатора кутового руху, які підтверджують висновки теоретичних досліджень і свідчать про виконання технічних вимог до системи.

**Ключові слова:** синтез системи управління, процес наведення і стабілізації, нелінійне предиктивне регулювання, нейрорегулятор з прогнозом.

**Варфоломеев А.А. Синтез нейросетевого управления системой наведения и стабилизации.** – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 – системы и процессы управления. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2009.

Диссертация посвящена решению задачи синтеза нейросетевой системы наведения и стабилизации с использованием нейрорегулятора с предсказанием, которая обеспечивает высококачественное регулирование с учётом внешних возмущающих воздействий и шумов измерений.

В результате анализа применяемых в настоящее время систем наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин и с учётом требований, предъявляемым к современным системам управления, сделан вывод о перспективности применения нейросетевых технологий управления объектами систем наведения и стабилизации.

Разработана математическая модель динамики объекта управления системы наведения и стабилизации с учетом упругих элементов в виде двухмассовой электромеханической системы. Модель составлена с учетом внешних возмущающих воздействий, нелинейных зависимостей внешнего трения и зазоров в кинематических звеньях.

Проанализированы принципы построения нейрорегуляторов, реализованных в пакете прикладных программ Neural Network Toolbox системы MATLAB. Показано, что применение нейрорегуляторов NARMA-L2 Controller и Model Reference Controller не может обеспечить заданные характеристики системы наведения и стабилизации. Для рассматриваемой системы выбран нейрорегулятор с предсказанием NN Predictive Controller.

Разработаны структурные схемы системы наведения и стабилизации с нейросетевым регулятором. Предложены системы подчиненного регулирования с нейронной компенсацией нелинейностей исполнительного устройства стабилизатора вооружения в контуре регулирования скорости и одноконтурная система, которая реализовывает компенсацию нелинейностей на уровне сигналов задания.

Синтезирована с помощью многослойной прямонаправленной сети модель исполнительного устройства системы наведения и стабилизации с высокой точностью идентификации. Используя принцип предиктивного метода регулирования на

основе нейросетевой модели объекта, синтезирован нейросетевой регулятор, который обеспечивает высокое качество управления.

Выполнен синтез систем наведения и стабилизации с нейросетевым регулятором скорости, пропорциональным и пропорционально-дифференциальным регулятором положения, а также системы, компонентами которой являются: линейный регулятор положения, нейросетевой регулятор скорости и предупреждение по скорости.

Выполнено моделирование нейросетевых систем наведения и стабилизации. Установлено, что синтезированный нейрорегулятор обеспечивает высокое качество регулирования с учётом моментов сухого трения на валу двигателя и механизма, люфта между элементами механической части системы, влияния внешних возмущающих воздействий, помех измерения основных координат при различных входных воздействиях (ступенчатом, линейно – нарастающем, гармоническом) и тридцатипроцентном изменении параметров объекта регулирования в ходе его функционирования.

Выполнен синтез нейрорегулятора с предсказанием для одноконтурной системы при включении нейрорегулятора на вход замкнутого контура положения. Показано, что показатели качества такой системы уступают соответствующим показателям качества системы с нейрорегулятором, включённым в контур скорости.

Результаты экспериментальных исследований синтезированной нейросетевой системы управления с использованием двухстепенного имитатора углового движения подтвердили выводы теоретических исследований и показали, что с помощью синтезированного нейрорегулятора обеспечивается выполнение технических требований к системе.

**Ключевые слова:** синтез системы управления, процесс наведения и стабилизации, нелинейное предиктивное регулирование, нейрорегулятор с предсказанием.

**Varfolomiyev O.O.** Synthesis of the neuro-controller for the armament aiming and stabilizing system. – Script. Candidate's thesis, specialization 05.13.03 – Control Systems and Processes. National University of Technology “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2009.

Thesis describes synthesis of neural-network aiming and stabilizing system based on the NN Predictive Controller that provides high performance control subject to external disturbances and measurement noises.

Designed a mathematical model of control object dynamics for aiming and stabilizing system with resilient elements as a two-mass electromechanical system. Developed functional charts of the aiming and stabilizing system with neurocontroller.

It's synthesized a model of the armament stabilizing system's operation unit with the use of feed-forward multi-layered network provided high identification accuracy. Employing the predictive control method principle and based on the neural-network object's model, it's synthesized neurocontroller, insured high performance control quality.

Performed neural-network system modeling and result analysis. Experimental results verified theoretical findings and showed that application of the synthesized controller meets the system technical requirements.

**Keywords:** control system synthesis, aiming and stabilization process, nonlinear predictive control, predictive neurocontroller.

Рис.17.  
Відріток  
кута  $\varphi(t)$   
в нейро-  
мережі

Підписано до друку 03.12.2009 р. Формат 60x84/16.  
Папір офсетний. Друк – різнографія. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 592848

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.  
61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16