

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВА СИСТЕМА НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ З РЕГУЛЯТОРОМ НА ОСНОВІ ЕТАЛОННОЇ МОДЕЛІ MODEL REFERENCE CONTROLLER

*Виконано синтез системи наведення і стабілізації з застосуванням нейромережевого регулятора на основі еталонної моделі Model Reference Controller. Наведена структура і принцип дії нейрорегулятора. Розроблена схема системи наведення і стабілізації з пропорційно-диференціальним регулятором у контурі положення і нейромережевим регулятором у контурі швидкості. Проведено моделювання нейромережевої системи на ЕОМ і виконано аналіз динамічних характеристик системи. Бібл. 6, рис. 5.*

*Ключові слова:* нейромережеве управління, система наведення і стабілізації, нелінійний динамічний об'єкт, нейрорегулятор на основі еталонної моделі, Model Reference Controller.

*Выполнен синтез системы наведения и стабилизации с применением нейросетевого регулятора на основе эталонной модели Model Reference Controller. Приведена структура и принцип действия нейрорегулятора. Разработана схема системы наведения и стабилизации с пропорционально-дифференциальным регулятором в контуре положения и нейросетевым регулятором в контуре скорости. Проведено моделирование нейросетевой системы на ЭВМ и выполнен анализ динамических характеристик системы. Библ. 6, рис. 5.*

*Ключевые слова:* нейросетевое управление, система наведения и стабилизации, нелинейный динамический объект, нейрорегулятор на основе эталонной модели, Model Reference Controller.

**Вступ.** Характерною рисою розвитку сучасних засобів озброєної боротьби є високий рівень автоматизації, що зумовлює успішне рішення військами складних бойових завдань. Аналізуючи за даними вітчизняного і зарубіжного відкритого друку основні тенденції розвитку і вдосконалення об'єктів спеціального призначення можна зробити висновок, що автоматизація охоплює практично всі системи сучасних бронеоб'єктів і істотно впливає на їх основні бойові властивості: маневреність і рухливість, вогняну потужність, захист і забезпечення життєдіяльності екіпажа.

Синтез ефективних систем наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів є актуальним і важливим завданням.

**Постановка проблеми.** За останні десятиліття запропоновано багато методів управління, зокрема методи адаптивного управління. Це стало можливим в значній мірі завдяки досягненням сучасної теорії управління і теорії стійкості. Здатність автоматично адаптуватися до змін динаміки об'єкту управління і зовнішнього середовища зробила адаптивні САУ все більш привабливими для різних практичних застосувань. Проте ефективність створюваних систем управління реальними об'єктами значною мірою залежить від якості використовуваних при цьому математичних моделей, які, з одного боку, винні якнайповніше відображати властивості досліджуваного об'єкту, а з іншої – бути зручними для реалізації алгоритмів управління. Відсутність достатньо повної інформації про умови функціонування, властивостях самих об'єктів і перешкод обумовлюють необхідність застосування при управлінні ними адаптивного підходу, що допускає можливість використання спрощених, зокрема, лінійних моделей. Хоча такий підхід і дозволяє у ряді випадків істотно зменшити апріорну невизначеність і реалізувати достатньо ефективне управління, обмеження лінійними моделями не завжди забезпечує отримання необхідного результату. Тому ефективнішою є розробка систем управління на основі адаптивного підходу у поєднанні з методами теорії штучних нейронних мереж.

Численні публікації останніх років, наприклад [1, 2], показують ефективність застосування нейромережевих структур в системах управління.

**Мета статті.** Метою роботи є синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів з нейрорегулятором на основі еталонної моделі і порівняння показників якості функціонування системи з нейромережевою системою з нейрорегулятором з передбаченням.

**Схема системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором на основі еталонної моделі Model Reference Controller.** Структурна схема виконавчого пристрою стабілізатора озброєння детально розглянута в роботі [3]. Далі наводимо основні положення і рівняння, які використовуються при синтезі нейромережевої системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором Model Reference Controller.

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 розрахункову 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:

$$\begin{aligned}L_{я} \frac{dI_{я}}{dt} &= U_{д} - R_{я} I_{я} - c_{\phi} \omega_{д}; \\ J_{д} \frac{d\omega_{д}}{dt} &= M_{д} - \frac{M_{пр}}{N} - M_{тд}; \\ J_{м} \frac{d\omega_{м}}{dt} &= M_{пр} - M_{тм} - M_{с},\end{aligned}$$

де  $U_{д} = k_{пп} \cdot U_{вх}$  – напруга, що поступає на якірну обмотку ПД;  $U_{вх}$  – величина вхідної дії;  $k_{пп}$  – коефіцієнт передачі ПП;  $M_{д} = I_{я} \cdot c_{\phi}$  – електромагнітний момент двигуна;  $I_{я}$  – струм якоря ПД;  $c_{\phi} = k_{д} \Phi$ ;  $k_{д}$  – конструктивний коефіцієнт ПД;  $\Phi$  – магнітний потік ПД;  $\omega_{д}$  – швидкість обертання валу ПД;  $\omega_{м}$  – швидкість обертання навантаження стабілізатора озброєння;  $R_{я}$ ,  $L_{я}$  – опір та індуктивність якірної обмотки ПД;  $J_{д}$  – момент інерції ротора ПД;  $J_{м}$  – момент інерції навантаження стабілізатора озброєння;  $N$  – передавальне число КПС;  $M_{тд}$  – момент сухого тертя в підшипниках ПД;  $M_{тм}$  – момент тертя КПС;  $M_{с}$  – збурюючий момент, обумовлений коливаннями корпусу носія;  $M_{пр}$  – момент пружності КПС:

$$M_{пр} = \begin{cases} c \cdot (\Delta\varphi_{м} - 0,5\sigma) & \Delta\varphi_{м} > 0,5\sigma; \\ 0 & \text{при } -0,5\sigma < \Delta\varphi_{м} < 0,5\sigma; \\ c \cdot (\Delta\varphi_{м} + 0,5\sigma) & \Delta\varphi_{м} < -0,5\sigma; \end{cases}$$

$c$  – коефіцієнт жорсткості елементів трансмісії;  $\sigma$  – величина люфту між зубами провідної і веденої шестерні;  $\Delta\varphi_{м}$  – різниця між кутами повороту валу двигуна на  $\varphi_{д}$  і робочого механізму  $\varphi$ , що описується рівнянням стану

$$\frac{d(\Delta\varphi_{м})}{dt} = \frac{\omega_{д}}{N} - \omega_{м}.$$

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  $M_{с}(t)$  від джерела випадкового сигналу типу білого шуму  $V_{бш}$  інтенсивністю  $v$  за допомогою формуючого фільтру з передавальною функцією коливальної ланки

$$W(p) = k_{в} \cdot \omega_{в}^2 / (p^2 + 2\xi\omega_{в} \cdot p + \omega_{в}^2),$$

де  $\omega_{в}$  – резонансна частота власних коливань;  $\xi$  – коефіцієнт демпфування;  $k_{в}$  – коефіцієнт посилення формуючого фільтру. Параметри формуючого фільтру вибираються так, щоб спектральна щільність вихідного сигналу співпадала з кривою експериментальної спектральної щільності, отриманої на основі статистичної обробки реальних трас.

У роботі [3] запропоновано систему наведення і стабілізації виконувати за принципом підлеглого регулювання з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою стабілізатора озброєння в контурі регулювання швидкості з використанням у контурі положення П-регулятора, ПД-дегулятора або П-регулятора з передуправлінням за швидкістю. При використанні принципу передуправління на вхід регулятора швидкості окрім сигналу, пропорційного помилці регулювання  $\Delta\varphi(t)$ , подається сигнал, пропорційний похідній від задаючої дії  $\varphi_3'(t)$ .

Синтез і дослідження нейромережевої системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів доцільно виконувати з застосуванням системи MATLAB. В ППП Neural Network Toolbox системи MATLAB реалізовано три нейрорегулятори: регулятор з передбаченням NN Predictive Controller, регулятор на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім NARMA-L2 Controller і нейрорегулятор на основі еталонної моделі Model Reference Controller.

У роботах [4, 5] виконаний синтез і дослідження системи з нейрорегулятором NN Predictive Controller. При побудові регулятора використаний принцип предиктивного методу регулювання на основі моделі, який полягає у формуванні такої послідовності сигналів дії на об'єкт, яка мінімізує різницю між завданням і передбаченим моделлю процесу вихідним сигналом в майбутньому. Показано, що нейромережева система має високі показники якості функціонування. Це досягається завдяки використанню ефективної реалізації узагальненого управління з прогнозом з використанням багатопарової прямонаправленої нейронної мережі, як нелінійної моделі об'єкту управління. Завдяки використанню оптимізаційного алгоритму Ньютона-Рафсона, число ітерацій, необхідних для збіжності, значно менше, ніж при використанні інших методів, внаслідок чого алгоритм є більш швидкодіючим, ніж інші методи, і може використовуватися для управління в режимі реального часу

Оскільки управління з прогнозом є досить складним і вимагає великої кількості обчислювальних витрат, в [6] розглянуто можливість застосування більш простого регулятора на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім NARMA-L2 Controller. При управлінні на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім регулятор є достатньо простою реконструкцією моделі керованого об'єкту. В роботі показано, що застосування NARMA-L2 Controller не може забезпечити задані характеристики системи наведення і стабілізації.

Виконаємо синтез і дослідження нейромережевої системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором на основі еталонної моделі Model Reference Controller. На рис. 1 показана структурна схема нейромережевої системи наведення і стабілізації, розроблена в SIMULINK системи MATLAB. Схема включає блок нейрорегулятора Model Reference Controller, блок генерації еталонного ступінчастого сигналу з випадковою амплітудою Random Reference, блок побудови графіків і блоки, що відносяться до об'єкту управління: блок Subsystem і інтегруюча ланка, що пов'язує швидкість обертання і кут повороту. У контур положення включений пропорційно-диференціальний регулятор. Коефіцієнти посилення пропорційної і диференціальної частини позначені  $K_p$  і  $K_d$  відповідно. Ланка Saturation служить для обмеження сигналу диференціальної частини регулятора.

Схема підсистеми Subsystem приведена на рис. 2. Дана схема складена на підставі вищенаведених рівнянь динаміки виконавчого пристрою стабілізатора озброєння. Електрична частина приводу представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з коефіцієнтом посилення  $1/R_c$  і постійною часу, рівною

електромагнітній постійній часу якірного ланцюга  $T_c = L_n/R_c$ . Блоки MATLAB Fcn і MATLAB Fcn1 використовуються для завдання моментів сухого тертя на валу двигуна і механізму. Наявність люфту в кінема-

тичному пристрої сполучення моделюється за допомогою ланки Dead Zone. Дія збурюючого моменту  $M_c(t)$  і завад вимірювання регульованих координат в даній схемі не враховується.

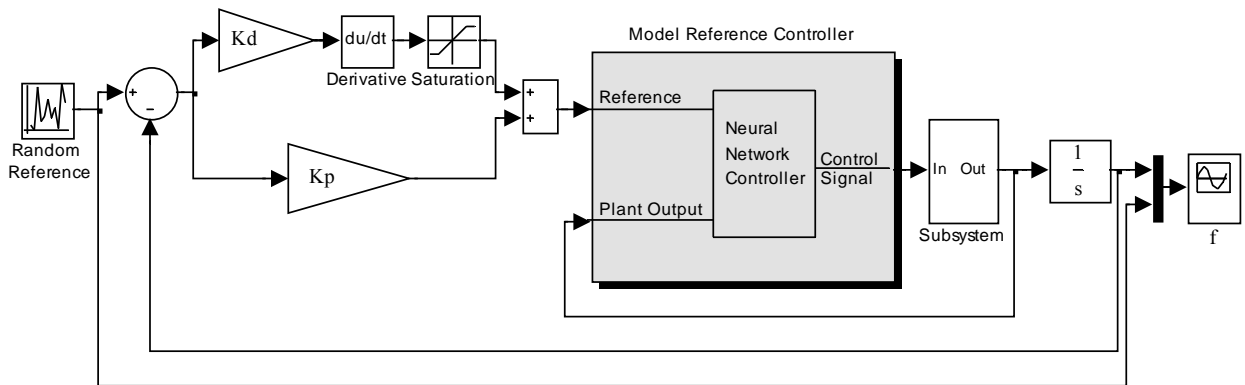


Рис. 1. Схема системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором Model Reference Controller

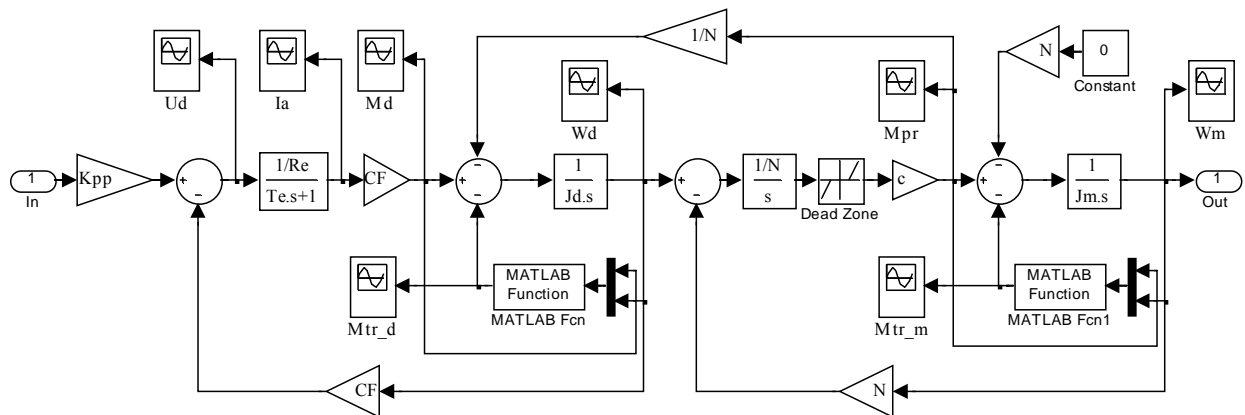


Рис. 2. Схема підсистеми Subsystem

**Принцип побудови нейрорегулятора Model Reference Controller.** При управлінні на основі еталонної моделі регулятор – це нейронна мережа, яка навчена управляти об'єктом так, щоб він відстежував поведінку еталонної моделі. Модель керованого об'єкту використовується при настройці параметрів самого регулятора. Регулятор на основі еталонної моделі вимагає невеликого об'єму обчислень, проте архітектура регулятора з еталонною моделлю вимагає навчання нейронної мережі об'єкту управління і нейронної мережі регулятора. При цьому навчання регулятора виявляється достатньо складним, оскільки навчання засноване на динамічному варіанті методу зворотного розповсюдження помилки.

Структурна схема системи управління з еталонною моделлю містить еталонну модель, яка задає бажану траєкторію руху об'єкту управління, а також 2 нейронні мережі: для регулятора і для моделі об'єкту управління. Мета навчання регулятора полягає в тому, щоб рух об'єкту управління відстежував вихід еталонної моделі. Структурна схема, що пояснює принцип побудови системи управління з еталонною моделлю, показана на рис. 3.

Архітектура нейронних мереж регулятора і об'єкту управління надані на рис. 4. Мережі мають два шари нейронів і містять лінії затримок, використовувани для формування входів нейронних мереж.

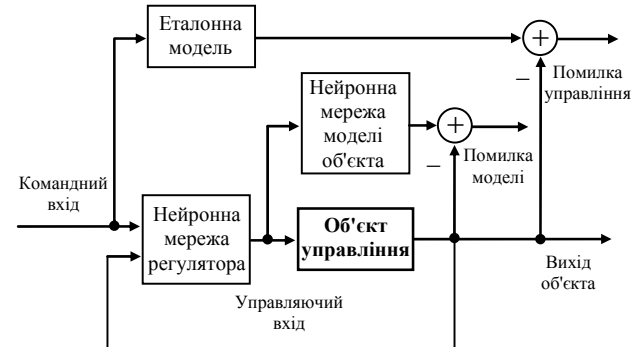


Рис. 3. Структурна схема нейромережевої системи управління з еталонною моделлю

**Моделювання системи і аналіз отриманих результатів.** Результати моделювання нейромережевої системи наведення і стабілізації з ПД-регулятором в контурі положення і з нейрорегулятором Model Reference Controller в контурі швидкості показані на рис. 5. Перехідні процеси приведені для ступінчастої вхідної дії з випадковою амплітудою, що знаходиться в межах  $\varphi_3 = -1 \div 1$  [рад]. Як еталонна модель приймалася схема об'єкту управління без урахування тертя на валу двигуна і механізму, пружних елементів і завад вимірювання регульованих координат. В результаті досліджень встановлено, що ні при яких параметрах нейрорегулятора Reference

Controller не вдалося отримати задовільні динамічні характеристики системи. Ідентифікація об'єкту управління була виконана з високою точністю.

Проте навіть без урахування обурюючих дій перехідні процеси змінних стану системи мають коливальний характер.

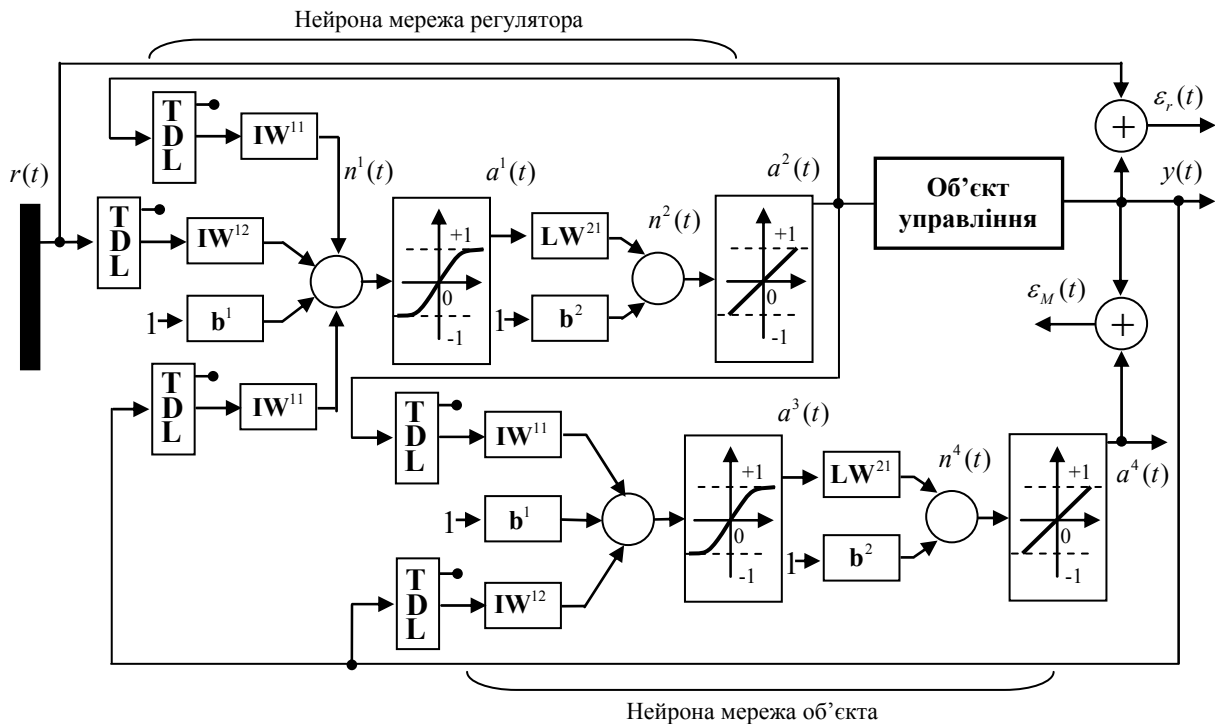


Рис. 4. Схема включення нейронних мереж регулятора і об'єкту управління в системі управління з еталонною моделлю

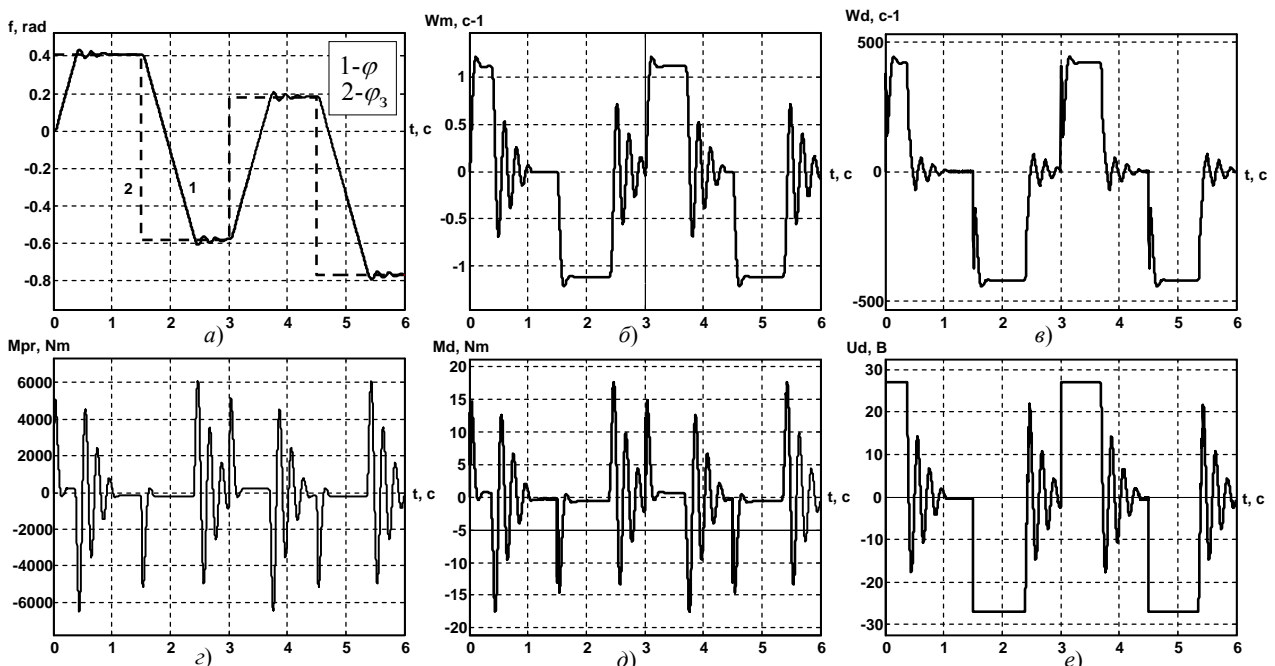


Рис. 5. Графіки перехідні процеси змінних стану системи з нейрорегулятором NN Predictive Controller: а – задаюча дія  $\varphi_3$  і кут  $\varphi$ ; б – швидкість механізму  $\omega_m$ ; в – швидкість двигуна  $\omega_d$ ; г – момент пружності  $M_{пр}$ ; д – момент двигуна  $M_d$ ; е – напруга двигуна  $U_d$

**Висновки.** У роботі розглянуто можливість використання нейромережевого регулятора на основі еталонної моделі Model Reference Controller для системи наведення стабілізації замість регулятора з прогнозом NN Predictive Controller, який забезпечує високі динамічні характеристики системи, але вимагає

великої кількості обчислювальних витрат і є досить складним для практичної реалізації.

Розроблена структурна схема нейромережевої системи наведення і стабілізації. Система виконана за принципом підлеглого регулювання з нейромережевим регулятором Model Reference Controller в кон-

турі регулювання швидкості і з ПД-регулятором в контурі положення.

Розглянута структура і принцип дії нейрорегулятора на основі еталонної моделі Model Reference Controller. Виконано синтез нейрорегулятора Model Reference Controller, який реалізований в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи МАТЛАВ. У режимі Simulink розроблена система управління з нейрорегулятором Model Reference Controller і проведено моделювання системи. Як показали дослідження, характеристики нейромережевої системи з нейрорегулятором Model Reference Controller поступаються відповідним характеристикам системи з нейрорегулятором NN Predictive Controller.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: ИПРЖР, 2003. – 480 с.
2. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник. – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.
3. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Разработка нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – №2. – С. 31-34.
4. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Синтез нейроконтроллера с предсказанием для двухмассовой электромеханической системы // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – №3. – С. 27-32.
5. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Нейроуправление нелинейным динамическим объектом с использованием метода обобщенного управления с предсказанием // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – №4. – С. 34-41.
6. Кузнецов Б.И., Василец Т.Ю., Варфоломеев О.О. Синтез і дослідження системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейрорегулятором на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2010. – №4(24). – С. 118-121.

#### REFERENCES

1. Terekhov V.A., Yefimov D.V., Tyukin I.Yu. *Nejrosetevye sistemy upravleniya* [Neural network control system]. Moscow, IPRZhR Publ., 2002. 480 p. (Rus).
2. Rudenko O.G., Bodyansky E.V. *Shtuchni nejronni merezhi: Navchal'nyj posibnyk* [Artificial Neural Networks: Tutorial]. Kharkov, TOV «Kompanija SMIT» Publ., 2006. 404 p. (Ukr).
3. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Development of a neuro-system of guidance and stabilizing for light-armored machines armament. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.2, pp. 31-34. (Rus).
4. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Synthesis of a predictive neuro-controller for a two-mass electromechanical system. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.3, pp. 27-32. (Rus).

5. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Nonlinear dynamic object neuro-control using a generalized predictive control method. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.4, pp. 34-41. (Rus).

6. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Synthesis and study of the light armored vehicle aiming and stabilization system with neural network control based on the autoregressive-moving-average model. *Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika – Systems of arms and military equipment*, 2010, no.4(24), pp. 118-121. (Ukr).

Надійшла (received) 10.05.2015

Кузнецов Борис Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Василець Тетяна Юхимівна<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
Варфоломеев Олексій Олексійович<sup>3</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України», 61106, Харків, вул. Індустріальна, 19,  
e-mail: bikuznetsov@mail.ru

<sup>2</sup> Українська інженерно-педагогічна академія, 61003, Харків, вул. Університетська, 16,  
тел/phone +38 057 7337959,  
e-mail: tatyana.vasilets@gmail.com

<sup>3</sup> Технологічний інститут Нью Джерсі (США), University Heights, Newark, NJ, USA, 07102-1982,  
тел/phone +1609 7874172,  
e-mail: alexey.varfolomeyev@gmail.com

B.I. Kuznetsov<sup>1</sup>, T.E. Vasilets<sup>2</sup>, O.O. Varfolomiyev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

<sup>2</sup> Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, 16, Universitetskaya Str., Kharkiv, 61003, Ukraine.

<sup>3</sup> New Jersey Institute of Technology, University Heights Newark, New Jersey, USA, 07102.

#### Neuro-system of aiming and stabilizing with a regulator on the basis of standard model Model Reference Controller.

The aim of this work is the synthesis of neural network aiming and stabilization system for the special equipment of moving objects with neuro-controller on the basis of standard model and performance comparison of the neural network system with the neural network predictive control. Build a block diagram of the neural network aiming and stabilization system, based on the subject control principle with PD-regulator in the position loop and with neuro-controller on the basis of standard model in the in the velocity loop. The neuro-controller on the basis of standard model Model Reference Controller is synthesized in the MATLAB Neural Network Toolbox and system simulation is performed. The studies show that the transient state variables of the system are oscillatory. Therefore, the neuro-controller with the prediction NN Predictive Controller should be used for aiming and stabilizing system to provide high dynamic characteristics achieved at the cost of higher complexity and computational cost. References 6, figures 5.

Key words: neural network control, aiming and stabilization system, nonlinear dynamic object, neuro-controller on the basis of standard model, Model Reference Controller.