

УДК 681.5.01.23

Б.І. Кузнецов<sup>1</sup>, Т.Ю. Василець<sup>1</sup>, О.О. Варфоломієв<sup>2</sup><sup>1</sup>Українська інженерно-педагогічна академія, Харків<sup>2</sup>Технологічний інститут Нью-Джерсі, США

## СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН З НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ АВТОРЕГРЕСІЇ З КОВЗАЮЧИМ СЕРЕДНІМ

Для забезпечення високих динамічних характеристик системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин у роботі розглянуто можливість використання нейромережевого регулятора на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім. Наведена структура і принцип дії нейрорегулятора. Розроблена схема нейромережевої системи наведення і стабілізації, виконаний синтез нейрорегулятора і проведено моделювання системи.

**Ключові слова:** нейрорегулятор на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім, нейромережева система наведення і стабілізації, система управління з нейрорегулятором NARMA-L2 Controller.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При модернізації систем управління вогнем легкоброньованих машин найбільш ефективним напрямом є вдосконалення системи стабілізації основного і допоміжного озброєння. В даний час широко використовуються двоканальні системи стабілізації озброєння. Бойовий модуль таких систем встановлюється на корпусі машини за допомогою погонної шестерні, щодо осі якої він повертається в горизонтальній площині, а блок озброєння кріпиться на бойовому модулі за допомогою цапф, щодо осі яких він повертається у вертикальній площині. Така побудова забезпечує стабілізацію і стабілізоване наведення засобів ведення вогню в горизонтальній і вертикальній площині, створюючи умови для ведення бойових дій з місця і з ходу по наземних і повітряних цілях. Проте використовувані в даний час системи стабілізації озброєння не можуть забезпечити потрібних для ефективного ведення вогню значень помилки стабілізації, діапазону регулювання швидкості, плавності наведення і ін. Тому розробка систем управління озброєнням легкоброньованих машин, що мають високі динамічні характеристики, є важливою і актуальною. Одним з найбільш перспективних напрямів є побудова нейромережевих систем управління.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Останніми роками нейронні мережі широко використовуються для управління динамічними об'єктами. Можна послатися, наприклад, на редакційну статтю [1], в якій її автори визначають проблеми синтезу нейромережевих систем управління динамічними об'єктами. Ці проблеми торкаються: синтезу структур нейромережевих систем управління; обмежень на швидкість настройки параметрів мережі; модифікації алгоритмів настройки, що забезпечують малі траєкторні помилки при обмеженнях на значення вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків нейронів;

модифікації управління, що гарантує грубість в умовах неконтрольованих збурень.

Різні підходи до вирішення перерахованих проблем відображені в літературі по застосуванню нейромереж в задачах управління. У [2] розроблена процедура синтезу системи управління нелінійними об'єктами із застосуванням RBF-мережі і достатньо детально розглянуті питання синтезу її архітектури і алгоритму настройки. Проблеми ж, пов'язані з якістю процесів і нечутливістю системи до невимірюваних збурень, не були вирішені. У ряді інших робіт в пізніший час (наприклад [3, 4]), були запропоновані методи синтезу нейромережевих систем управління складними технічними об'єктами.

Проведений аналіз літератури показав, що існує велика кількість підходів до проблеми синтезу систем управління нелінійними динамічними об'єктами, при цьому універсального і ідеального регулятора поки не існує.

**Метою роботи** є синтез і дослідження динамічних характеристик нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейрорегулятором на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім.

### 1. Схема системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім

Виконавчий пристрій стабілізатора озброєння складається з підсилювача потужності, приводного двигуна і кінематичного пристрою сполучення. Кінематична схема системи наведення і стабілізації містить пружні елементи, що істотно ускладнює розрахункову схему механічної частини системи, перетворюючи її на багатомасову. Математична модель динаміки об'єкту управління системи наведення і стабілізації наведена у роботі [5]. Для урахуван-

ня пружності елементів кінематичного пристрою сполучення механічна частина системи представлена у вигляді двохмасової системи. Модель складена з урахуванням моментів сухого тертя на валу двигуна і на валу робочого механізму, а також наявність люфту між зубами провідної і відомої шестерні.

У роботі [5] виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з використанням нейрорегулятора з прогнозом. Розроблена двоконтурна система регулювання з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою стабілізатора озброєння в контурі регулювання швидкості. Регулятор положення може бути пропорційним або пропорційно-диференціальним. У [5] виконаний синтез і дослідження системи з нейромережевим регулятором з передбаченням в контурі регулювання швидкості і з ПД-регулятором в контурі положення. Показано, що нейромережева система має високі показники якості функціонування.

У [6] показано, що нейромережева система управління з П - регулятором положення і з передуправлінням за швидкістю забезпечує високоякісне регулювання при всіх видах дій на систему. При використанні принципу передуправління на вхід

регулятора швидкості окрім сигналу, пропорційного помилці регулювання  $\Delta\varphi(t)$ , подається сигнал, пропорційний похідній від задаючої дії  $\varphi'_3(t)$ .

Управління з прогнозом вимагає великої кількості обчислювальних витрат і є досить складним для практичної реалізації. Тому розглянемо можливість застосування більш простого регулятора на основі моделі авторегресії з ковзючим середнім NARMA-L2 Controller для системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин.

На рис. 1 показана структурна схема нейромережевої системи наведення і стабілізації, розроблена в Simulink системи MATLAB. Схема включає блок нейрорегулятора NARMA-L2 Controller, блок генерації вхідної дії Subsystem1, блоки побудови графіків і блоки, що відносяться до об'єкту управління (Subsystem і інтегруюча ланка). У контур положення включений П-регулятор з коефіцієнтом посилення  $K_p$ . Ланки Derivative і MATLAB Fcn включені в схему для реалізації передуправління за швидкістю. Для обмеження сигналу при стрибкоподібній зміні завдання на положення використана ланка обмеження Saturation. Схема моделі об'єкту управління Subsystem наведена в [5].

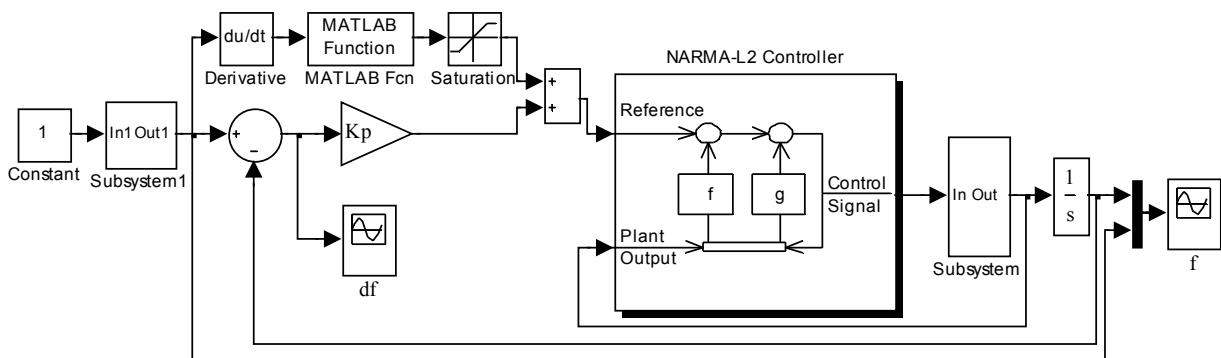


Рис. 1. Схема системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором NARMA-L2 Controller

## 2. Принцип побудови нейрорегулятора NARMA-L2 Controller

Нейромережевий регулятор NARMA-L2 використовує як модель керованого об'єкту модель нелінійної авторегресії з ковзючим середнім (Nonlinear Autoregressive-Moving Average – NARMA-L2). При синтезі даного регулятора будується дискретна нелінійна модель нелінійного об'єкту управління як авторегресійна модель з ковзючим середнім, або NARMA-модель у формі

$$y(k+d) = N[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)], \quad (1)$$

де  $y(k)$  – вихід моделі;  $d$  – число тактів прогнозу;  $u(k)$  – вхід моделі.

На етапі ідентифікації будується нейронна мережа для NARMA-моделі, вигляду (1). Ця процедура

аналогічна процедурі ідентифікації при синтезі нейрорегулятором з прогнозом.

Якщо потрібно спроектувати систему, яка забезпечує рух по заданій траєкторії

$$y(k+d) = y_r(k+d),$$

то це означає, що необхідно сформувати регулятор наступного вигляду:

$$u(k) = G[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), y_r(k+d), u(k-1), \dots, u(k-m+1)].$$

Хоча такий регулятор за допомогою нейронної мережі і може бути сформований, проте в процесі мінімізації середньоквадратичної помилки він вимагає надмірних обчислень, оскільки використовує динамічний варіант методу зворотного розповсюдження помилки. Для практичного вирішення завдання стеження Нарендра (Narendra) і Макхопадхай

(Mukhopadhyay) [7] запропонували наближену NARMA-модель з виділеною складовою управління. Така модель регулятора, що іменується моделлю NARMA-L2, має вигляд

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]u(k).$$

Перевага цієї форми полягає в тому, що тепер поточне управління можна безпосередньо обчислити, якщо відома бажана траєкторія  $y_r$ , передісторія управління  $\{u(k-1), \dots, u(k-m+1)\}$ , а також передуючі і поточне значення виходу  $\{y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1)\}$ :

$$u(k) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]}$$

Безпосереднє застосування цього співвідношення для реалізації регулятора складно, оскільки управління залежить від поточного значення виходу. Тому рівняння модифікується таким чином:

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]},$$

але при цьому параметр прогнозу повинен задовольняти умові  $d \geq 2$ .

Структурна схема системи з регулятором NARMA-L2 показана на рис. 2. Блоки затримки ЛЗ здійснюють запам'ятовування відповідних послідовностей входу і виходу, а потім використовуються двошарові нейронні мережі, які формують оцінки нелінійних операторів і обчислюють сигнал управління

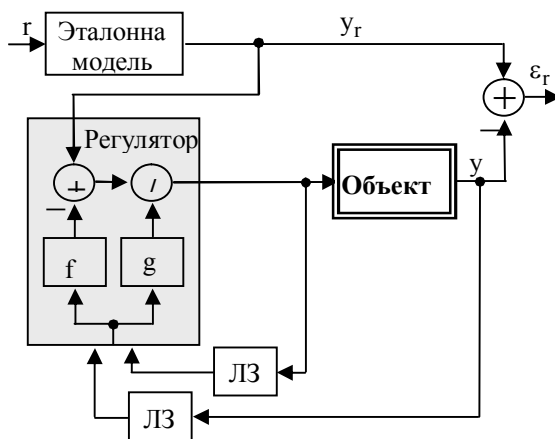


Рис. 2. Структурна схема системи з регулятором NARMA-L2

У даній роботі виконаний синтез нейрорегулятора NARMA-L2 Controller за допомогою пакета прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Синтез нейрорегулятора складається з

двох етапів: етап ідентифікації об'єкту управління і етап синтезу закону управління. На етапі ідентифікації розробляється модель керованого об'єкту у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу використовується для синтезу регулятора.

На першому етапі спочатку генерується навчальна вибірка, а потім відбувається завдання параметрів нейронній мережі і її навчання. Тренувальні дані генеруються шляхом подачі ступінчастих сигналів з випадковою амплітудою на об'єкт управління. Якість тренування мережі в значній мірі залежить від довжини навчальної вибірки і такту дискретності, що визначає інтервал між двома послідовними моментами знімання даних. Оптимальними значеннями цих параметрів відносно мінімуму середньоквадратичної помилки у вирішуваній задачі є наступні: кількість даних  $N_B = (8 \div 10) \cdot 10^3$ , такт дискретності –  $\Delta t = 0,001$  с. Для отримання представницької вибірки необхідно правильно задати максимальне  $t_{\max}$  і мінімальне  $t_{\min}$  значення інтервалу ідентифікації, тобто тривалість стрибків завдань. Величина їх залежить від параметрів об'єкту управління. У даній задачі максимальна тривалість стрибків завдань повинна бути приблизно рівна часу регулювання контуру швидкості, мінімальна – на порядок менше, тобто  $t_{\min} = 0,01$  с,  $t_{\max} = 0,1$  с.

При синтезі регулятора варіюється кількість елементів запізнювання на вході  $N_i$  і виході  $N_j$  моделі. Якнайкращі результати отримані при значеннях  $N_i = 1$  і  $N_j = 5$  відповідно.

Для нейрорегулятора NARMA-L2 Controller використовується мережа з прямою передачею сигналу, що характеризується наявністю зв'язків між нейронами тільки в прямому напрямі без зворотних зв'язків усередині мережі – багатошаровий перцептрон. Попередні значення вхідних/вихідних координат у вхідному векторі дозволяють додати прямонепереривним мережам динамічні властивості.

При побудові нейронної мережі регулятора спочатку формується статична 6-шарова мережа. Мережа має 6 шарів з  $S$  нейронами в першому і третьому шарах і 1 нейроном в другому, четвертому, п'ятому і шостому шарах. Використовувані функції активації: гіперболічного тангенса (tansig) – в першому і третьому шарі, лінійна (purelin) – в другому, четвертому, п'ятому і шостому шарах. Найбільш важливим питанням є вибір кількості нейронів  $S$  першого і третього шарів. При малій кількості нейронів мережа не може виконувати поставлене завдання, а при великому спостерігається явище перенавчання і зростає об'єм обчислень. Для даної задачі оптимальні значення знаходиться в межах  $S = 8 \div 12$ , при цьому середня помилка навчання має порядок  $10^{-12}$ , а миттєві по-

милки не перевищують  $10^{-4} \div 10^{-5}$ . Потім формується мережа із структурою, відповідною рис. 2, шляхом перемикання зв'язків між шарами. Навчання мережі виконується з використанням функції `trainlm`, що відповідає алгоритму Левенберга-Марквардта.

### 3. Моделювання системи і аналіз отриманих результатів

Для визначення показників якості функціонування синтезованої нейромережевої системи було проведено моделювання системи при різних тестових входніх сигналах: ступінчастому із змінною амплітудою, лінійно – наростаючому, гармонійному. На рис. 3 приведені графіки відробітку кута  $\varphi$

при вказаних діях. Графіки регульованої координати  $\varphi$  зображені суцільною лінією і позначені номером 1, а графіки задаючої дії  $\varphi_3$  зображені пунктирною лінією і позначені номером 2.

Як показали дослідження, відпрацювання кута в нейромережевій системі з нейрорегулятором NARMA-L2 Controller відбувається з коливаннями змінних стану системи, зокрема амплітуда коливань кута  $\varphi$  складає 0,006 рад, частота 12 Гц. Тому для забезпечення високих показників якості функціонування системи наведення і стабілізації легкоброньованих машин слід застосовувати нейрорегулятор з передуправлінням NN Predictive Controller.

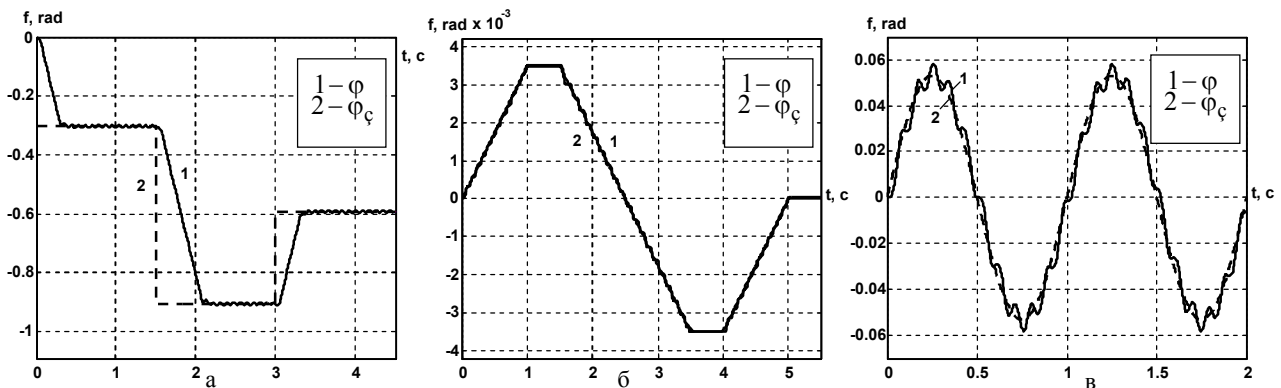


Рис. 3. Графіки відробітку кута  $\varphi$  при ступінчастій – а; гармонійній – б; лінійно наростаючих входніх дії – в

### Висновки

У статті виконаний синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з використанням нейромережевого регулятора на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім NARMA-L2 Controller. Розроблена структурна схема нейромережевої системи наведення і стабілізації, яка виконана за принципом підлеглого регулювання з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою стабілізатора озброєння в контурі регулювання швидкості з П-регулятором в контурі положення і з передуправлінням за швидкістю.

Розглянута структура і принцип дії нейрорегулятора на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім. Виконано синтез нейрорегулятора NARMA-L2 Controller, який реалізований в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Приведені основні характеристики синтезованого регулятора.

Проведено моделювання системи при різних видах тестових входніх дій. Як показали дослідження, характеристики нейромережевої системи з нейрорегулятором NARMA-L2 Controller поступаються відповідним характеристикам системи з нейрорегулятором NN Predictive Controller.

### Список літератури

1. Lewis F.L., Parisini T. Guest Editorial: Neural network feedback control with guaranteed stability // *Int. J. of Control.* – 1998. – Vol. 70. – № 3. – P. 337-339.
2. Sunner R.M., Slotine J.E. Gaussian Networks for Direct Adaptive Control // *IEEE Trans. Neural Networks.* – 1992. – Vol. 3. – № 6. – P. 83-863.
3. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: ИПРЖР, 2002. – 80 с.
4. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Х.: Телетех, 2004. – 264 с.
5. Кузнецов Б.И. Система наведения и стабилизации озброєння легкоброньованих машин з нейромережевим регулятором / Б.И. Кузнецов, Т.Ю. Василець, О.О. Варфоломєєв // *Системи озброєння і військова техніка.* – Х.: ХУПС МО України. – 2008. – № 1(13). – С. 112-116.
6. Кузнецов Б.И. Разработка и исследование нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин / Б.И. Кузнецов, Т.Е. Василець, А.А. Варфоломєєв // *Збірник наук. праць ХУПС.* – Х.: ХУПС МО України, 2008. – Вип. 3(18). – С. 141-145.
7. Narendra K.S., Mukhopadhyay S/ *adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models // IEEE Transaction of Neural Networks/* – 1997. – Vol. 8. – P. 475-485.

Надійшла до редколегії 15.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. Д. Сахацький, Українська інженерно – педагогічна академія, Харків.

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВООРУЖЕНИЯ  
ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН С НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ  
АВТОРЕГРЕССИИ СО СКОЛЬЗЯЩИМ СРЕДНИМ**

Б.И. Кузнецов, Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев

*В статье рассмотрена возможность использования нейросетевого регулятора на основе модели авторегрессии со скользящим средним для обеспечения высоких динамических характеристик системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин. Приведена структура и принцип действия нейрорегулятора. Разработана схема нейросетевой системы наведения и стабилизации, выполнен синтез регулятора и проведено моделирование системы.*

**Ключевые слова:** *нейрорегулятор на основе модели авторегрессии со скользящим средним, нейронная система наведения и стабилизации, система управления, из нейрорегулятором NARMA-L2 Controller.*

**SYNTHESIS AND STUDY OF THE AIMING AND STABILIZING SYSTEM OF THE LIGHT-ARMORED MACHINES WITH  
NEURO-CONTROLLER BASED ON THE AUTOREGRESSIVE MOVING AVERAGE MODEL**

B. I. Kuznetsov, T.E. Vasilets, A.A. Varfolomeyev

*This paper is discussing the potential of the use of neuro-controller based on the autoregressive moving average model to provide high dynamic performance of the light-armored machines aiming and stabilizing system. Neuro-controller architecture and operation principle are given. It is developed an architecture of the aiming and stabilizing neuro-system as well as the controller synthesis and system modeling are performed.*

**Keywords:** *neuro-controller on the basis of model of autoregression with sliding middle, neuronet system of aiming and stabilizing, control the system, from neuro-controller NARMA-L2 Controller.*