

Загальні питання

УДК 681.5.01.23

Б.І. Кузнецов¹, Т.Ю. Василець², О.О. Варфоломійєв³

¹ Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України, Харків

² Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

³ Технологічний інститут, Нью Джерсі, США

СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ЛЮФТУ В КІНЕМАТИЧНОМУ ПРИСТРОЇ СПОЛУЧЕННЯ

Виконаний синтез і проведені дослідження показників якості функціонування нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин за наявності люфту в кінематичному пристрої сполучення. Розроблена схема моделі нейромережевої системи і схема моделі об'єкту управління з урахуванням люфту і проведено моделювання системи при різних видах тестових вхідних сигналів. Показано, що наявність люфту не приводить до зниження показників якості функціонування нейромережевої системи.

Ключові слова: нейромережеве управління, система наведення і стабілізації, нелінійний динамічний об'єкт, нейрорегулятор з передбаченням, NN Predictive Controller.

Вступ

Постановка проблеми. Розвиток і вдосконалення легкоброньованих машин збройних сил України характеризується безперервним поліпшенням тих, що існують і створенням нових автоматичних систем і пристроїв, що забезпечують підвищення бойової ефективності об'єктів спеціального призначення. Людина-оператор практично не в змозі здійснювати ручне управління з необхідною швидкістю і необхідною точністю. Найбільш ефективно використання всіх можливостей сучасних об'єктів спеціального призначення забезпечується їх частковою або повною автоматизацією. 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 наведення і стабілізації.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. В результаті досліджень, що проводяться в останні десятиліття, широке застосування отримали методи адаптивного і робастного управління. Однак проблема синтезу адаптивних систем управління для невідомих, нелінійних і змінюваних в часі об'єктів як з теоретичної так і з практичної точки зору не вирішена остаточно. Область застосування методів робастного управління обмежується, головним чином, лінійними системами і деякими спеціальними класами нелінійних систем. Отже, незважаючи на наявний прогрес, необхідно визнати, що універсального та ідеального регулятора поки не існує.

Останнім часом досить багатообіцяючою альтернативою класичним методам побудови систем управління нелінійними об'єктами є штучні нейрон-

ні мережі [1 – 5]. Найбільш чудовою властивістю штучних нейронних мереж є їх здатність до навчання, що дозволяє отримати більш прості рішення для складних завдань управління. Крім того, наявність у структурі штучних нейронних мереж нейронів з нелінійними функціями активації, дозволяє використовувати їх для вирішення задач управління нелінійними об'єктами, у той час як традиційні методи не забезпечують вирішення подібних завдань.

Аналіз останніх публікацій по синтезу сучасних регуляторів систем управління з використанням нейронних мереж показує, що даний напрямок є актуальним і перспективним.

Метою статті є дослідження показників якості функціонування нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейрорегулятором з передбаченням з урахуванням люфту в кінематичному пристрої сполучення.

Виклад основного матеріалу

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 вирішенні задачі синтезу алгоритмів керування, що забезпечують необхідні показники якості, необхідно мати рівняння основних елементів стабілізатора озброєння і, насамперед, рівняння його виконавчих і вимірювальних пристроїв. Виконавчий пристрій стабілізатора озброєння складається з підсилювача потужності, приводного двигуна і кінематичного пристрою сполучення. 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 такою системою рівнянь:

$$L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = U_{\text{д}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}} - c_{\text{ф}} \omega_{\text{д}};$$

$$J_{\text{д}} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = M_{\text{д}} - \frac{M_{\text{пр}}}{N} - M_{\text{тд}}; J_{\text{м}} \frac{d\omega_{\text{м}}}{dt} = M_{\text{пр}} - M_{\text{тм}} - M_{\text{с}},$$

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

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 $M_{\text{с}}(t)$ від джерела випадкового сигналу типу білого шуму $V_{\text{бш}}$ інтенсивністю v за допомогою формуючого фільтру з передавальною функцією коливної ланки $W(p) = k_{\text{в}} \omega_{\text{в}}^2 / (p^2 + 2\xi \omega_{\text{в}} p + \omega_{\text{в}}^2)$, де $\omega_{\text{в}}$ – резонансна частота власних коливань; ξ – коефіцієнт демпфування; $k_{\text{в}}$ – 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.

Для забезпечення високих динамічних характеристик системи в [6] розроблена двоконтурна система регулювання з нейронною компенсацією нелінійностей виконавчого пристрою стабілізатора озброєння в контурі регулювання швидкості. Регулятор положення може бути пропорційним, пропорційно-диференціальним або пропорційним з передуправлінням за швидкістю. При використанні принципу передуправління на вхід регулятора шви-

дкості крім сигналу, пропорційного помилці регулювання, подається сигнал, пропорційний похідній від задаючого впливу.

У роботах [5, 6] в якості нейрорегулятора контуру швидкості обраний регулятор з прогнозом NN Predictive Controller, реалізований у пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Розглянуто структуру та принцип дії нейрорегулятора з прогнозом, виконано синтез нейрорегулятора і проведено моделювання системи. Показано, що нейромережева система забезпечує високоякісне регулювання. Проведені в [6, 7] дослідження виконані без урахування люфту між зубами провідної і веденої шестерні. З урахуванням люфту слід розглядати три стану зчеплення:

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

де c – коефіцієнт жорсткості елементів трансмісії; σ – величина люфту між зубами провідної і веденої шестерні; $\Delta\varphi_{\text{м}}$ – різниця між кутами повороту валу двигуна $\varphi_{\text{д}}$ і робочого механізму φ , що описується

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

Схема моделі нейромережевої системи управління, розроблена в Simulink системи MATLAB показана на рис. 1. Схема включає блоки нейрорегулятора з передбаченням NN Predictive Controller, блоки генерації вхідного сигналу (блоки Constant і Subsystem2 використовуються для формування лінійно-зростаючої вхідної дії), блоки побудови графіків і блоки, які стосуються об'єкту управління (Subsystem і інтегруюча ланка). У контур положення включений П-регулятор з коефіцієнтом посилення $K_{\text{р}}$. Ланки Derivative і MATLAB Fcn застосовуються для реалізації передуправління за швидкістю. Для обмеження сигналу при ступінчатій зміні завдання на положення використовується ланка обмеження Saturation.

На рис. 2 показана схема моделі виконавчого пристрою стабілізатора озброєння (блок Subsystem), яка розроблена на основі рівнянь стану виконавчого пристрою стабілізатора озброєння, наведених вище. Електричну частину приводу представлено у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з коефіцієнтом посилення $1/R_{\text{я}}$ і постійною часу, рівною електромагнітній постійній часу якірного ланцюга $T_{\text{е}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}}$. Схема складена з урахуванням моменту сухого тертя в підшипниках приводного двигуна і моменту сухого тертя в кінематичному пристрої сполучення. Для їх завдання використані два блоки MATLAB Fcn, призначені для написання виразів на мові MATLAB. В схемі не враховується збурюючий момент, обумовлений коливаннями корпусу носія при русі машини по пересіченій місцевості. Ланка Dead

Zone (DZ) призначена для моделювання люфту в кінематичному пристрої сполучення. Величина люфту дорівнює $0,5\sigma = \pm 0,75'$ ($\pm 0,0002192$ рад).

Схема блоку Subsystem1 еквівалентна схемі блоку Subsystem за винятком того, що в ній відсут-

ній блок Dead Zone. Таким чином, схема моделі системи дозволяє на кожному рисунку будувати графіки з урахуванням і без урахування люфту в кінематичному пристрої сполучення, що значно спрощує аналіз результатів моделювання.

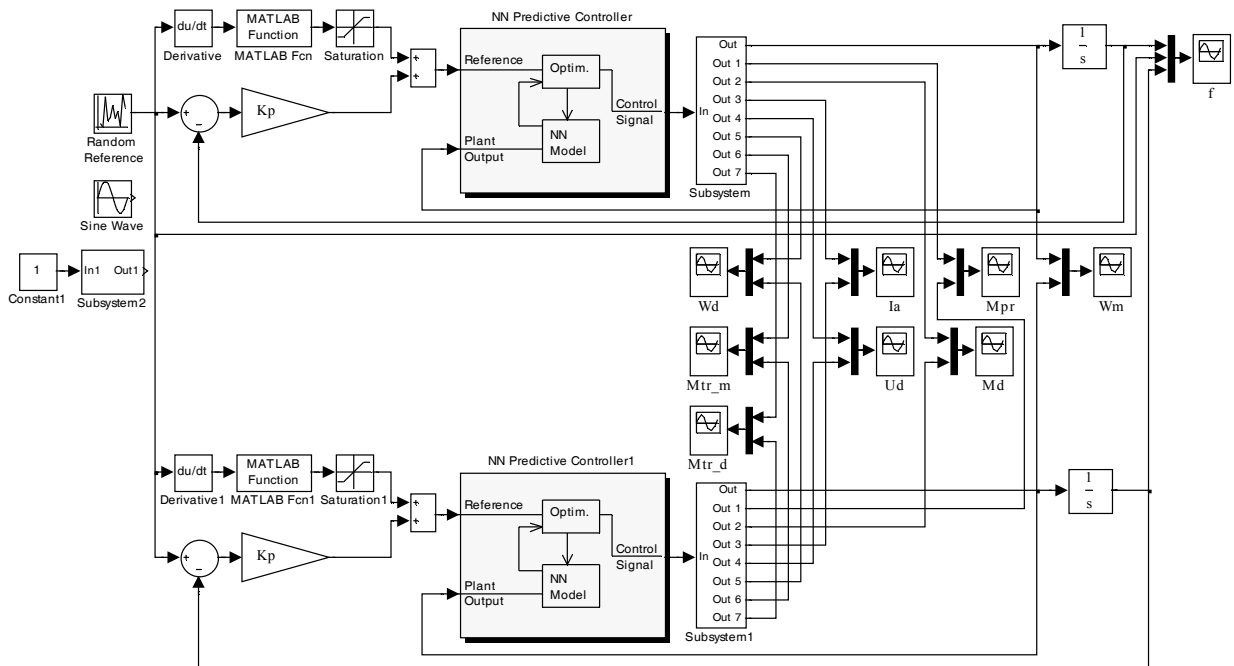


Рис. 1. Схема моделі системи для дослідження перехідних процесів з урахуванням люфту в кінематичному пристрої сполучення

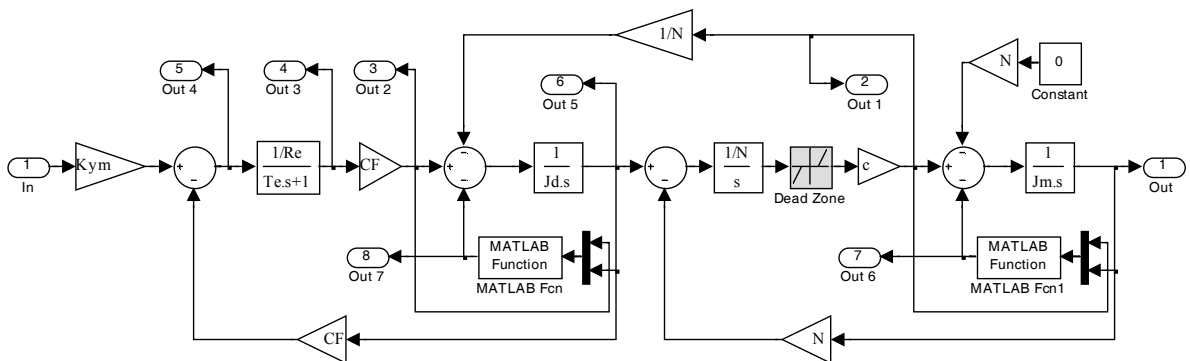


Рис. 2. Схема моделі виконавчого пристрою стабілізатора озброєння (блок Subsystem)

Моделювання неймережевої системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором NN Predictive Controller проводилося при різних видах вхідних впливів: ступінчастій (діапазон відпрацювання кута блоку озброєння становить від $\varphi_3 = 0,01$ рад до $\varphi_3 = 1$ рад), лінійно зростаючій з мінімальною швидкістю наростання і зменшення відпрацювання кута $\omega_{\varphi \min} = 0,00035 \text{ c}^{-1}$ і швидкістю в 10 разів більшою, тобто $\omega_{\varphi} = 0,0035 \text{ c}^{-1}$, гармонійній з частотою 1 Гц і амплітудою 3° . На рис. 3 наведено графіки відробітку кута $\varphi(t)$ при ступінчастій і гармонійній вхідній дії. Як видно з рисунків, графіки відробітку кута з урахуванням і без урахування люфту при зазначених вхідних впливах практично збігаються.

На рис. 4 наведено графіки відробітку кута $\varphi(t)$ при лінійно змінюваній вхідній дії при мінімальній швидкості зростання і зменшення кута $\omega_{\varphi \min} = 0,00035 \text{ c}^{-1}$ і при швидкості в 10 разів більшій, тобто $\omega_{\varphi} = 0,0035 \text{ c}^{-1}$.

Як видно з рисунків, при $\omega_{\varphi} = 0,0035 \text{ c}^{-1}$, графіки з урахуванням і без урахування люфту практично не відрізняються. При $\omega_{\varphi \min} = 0,00035 \text{ c}^{-1}$ наявність люфту приводить до збільшення помилки за положенням від значень $0,1 \cdot 10^{-5}$ рад (0,28%), до $0,27 \cdot 10^{-5}$ рад (0,7%), що допустимо за умовами за умовами експлуатації системи наведення і стабілізації.

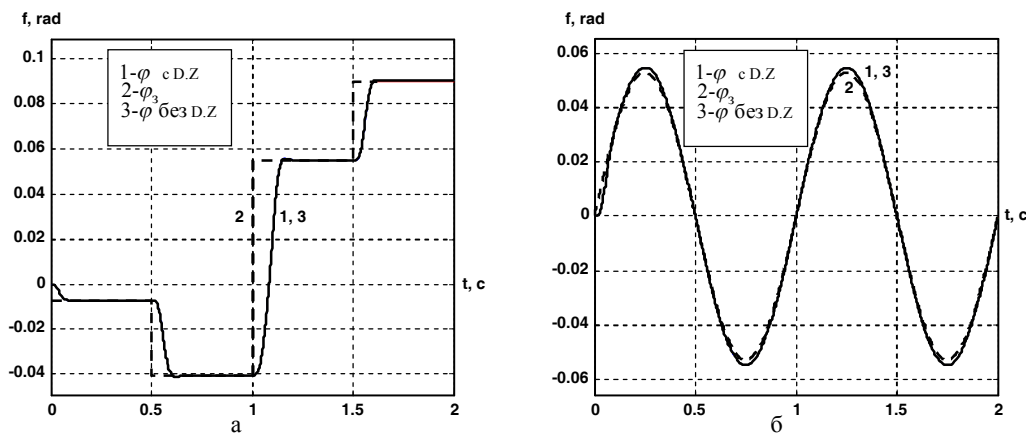


Рис. 3. Графіки відробітку кута при ступінчастій (а) і гармонійній (б) входних діях

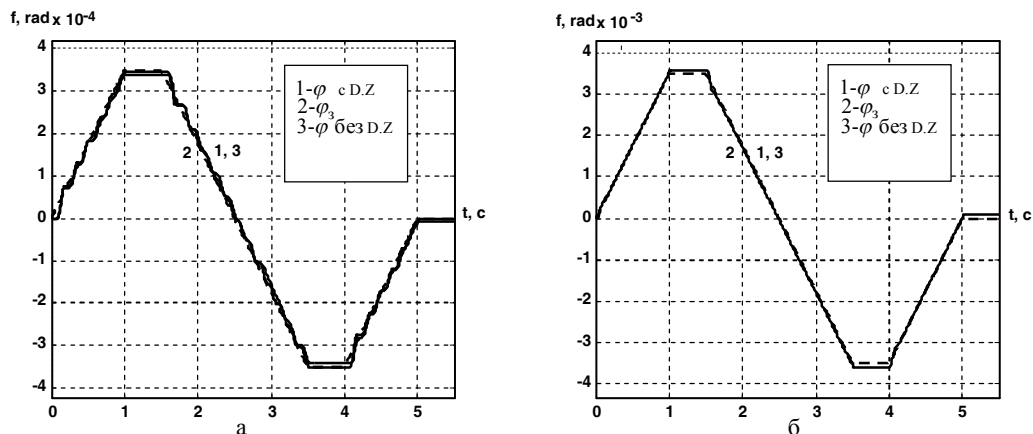


Рис. 4. Графіки відробітку кута при лінійно зростаючій входній дії:

а – швидкість зростання кута $\omega_{\phi_{\min}} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$;

б – швидкість зростання кута $\omega_{\phi} = 0,00035 \text{ с}^{-1}$

Висновки

Виконаний синтез і проведені дослідження показників якості функціонування нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин за наявності люфту в кінематичному пристрої сполучення. На основі рівнянь стану у Simulink системи MATLAB розроблена схема моделі виконавчого пристрою стабілізатора озброєння, а також схема моделі нейромережевої системи з нейрорегулятором NN Predictive Controller в контурі швидкості, з ПІ-регулятором в контурі положення і з передуправлінням за швидкістю, яка дозволяє проводити дослідження з урахуванням і без урахування люфту в кінематичному пристрої сполучення. Виконано моделювання системи при різних видах входних впливів: ступінчастому, лінійно наростаючому і гармонійному. Показано, що наявність люфту не приводить до зниження показників якості функціонування нейромережевої системи.

Список літератури

1. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: ИПРЖР, 2003. – 480 с.

2. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі: Навч. посібник / О.Г. Руденко, Е.В. Бодяньський/ – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.

3. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 382 с.

4. Бодяньский Е.В. Синтез нейросетевых регуляторов с адаптивной прогнозирующей моделью для систем управляемого теплоснабжения / Е.В. Бодяньский, Г.К. Вороновский, Л.М. Любчик // Вестник НТУ «ХПИ». – 2002. – № 13. – С. 9-15.

5. Клепиков В.Б. Синтез гибридной нейронной сети для двухмассовой ЭМС при срывных фрикционных автоколебаниях / В.Б. Клепиков, П.Л. Моисеенко, Ю.А. Цепковский // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 10. Т. 1. – С. 512-514.

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

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

Надійшла до редколегії 2.03.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.Д. Сахацький, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТОВОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ
С УЧЕТОМ ЛЮФТА В КИНЕМАТИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ СОПРЯЖЕНИЯ**

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

Выполнен синтез и проведено исследование показателей качества функционирования нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин при наличии люфта в кинематическом устройстве сопряжения. Разработана схема модели нейросетевой системы и схема модели объекта управления с учетом люфта. Проведено моделирование системы при различных видах тестовых входных сигналов. Показано, что наличие люфта не приводит к снижению показателей качества функционирования нейросетевой системы.

Ключевые слова: нейросетевое управление, система наведения и стабилизации, нелинейный динамический объект, нейрорегулятор с предсказанием, NN Predictive Controller.

**SYNTHESIS AND STUDY OF THE NEURAL NETWORK AIMING AND STABILIZATION SYSTEM
WITH THE BACKLASH IN THE KINEMATIC COUPLING DEVICE**

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

Synthesized and studied quality performance of the neural network aiming and stabilization system of the light armored vehicle accounting for backlash in the kinematic coupling device. Developed the flowchart of the system neural network model and designed the circuit of the control object model with backlash. The system is modeled for different types of test inputs. It is illustrated that backlash does not affect the quality performance of the designed neural network system.

Keywords: neural control system guidance and stabilization, nonlinear dynamic object, neural predictive controller, NN Predictive Controller.