

УДК 681.5.01.23

Б.І. Кузнецов¹, Т.Ю. Василець², О.О. Варфоломійєв³¹ НТЦ МТО НАН України, Харків² Українська інженерно-педагогічна академія, Харків³ Технологічний інститут, Нью-Джерсі, США

СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН З НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ НА ОСНОВІ ЕТАЛОННОЇ МОДЕЛІ

Розглянуто можливість використання нейромережевого регулятора на основі еталонної моделі *Model Reference Controller*, реалізованого в *MATLAB*, для забезпечення високих показників якості функціонування системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин у роботі. Наведена структура і принцип дії нейрорегулятора. Розроблена схема нейромережевої системи наведення і стабілізації, виконаний синтез нейрорегулятора і проведено моделювання системи.

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

Вступ

Постановка проблеми. На сучасних броньованих об'єктах якнайповніше автоматизовані процеси управління вогнем. Практично всі вітчизняні і зарубіжні бойові машини оснащені системами наведення і стабілізації озброєння, що забезпечують можливість ведення прицільного вогню з ходу. Проте в процесі розробки таких систем не враховуються статистичні характеристики зовнішніх обурень і варіацій параметрів об'єкту управління, що діють на об'єкт стабілізації. Урахування вказаних факторів дозволяє вибрати раціональніші значення параметрів системи наведення і стабілізації, що приводить до підвищення їх точності. Звичайні регулятори з фіксованими коефіцієнтами передачі є неефективними для компенсації обурень і варіацій параметрів об'єкту управління. Їх адаптація до змін зовнішнього середовища залишає бажати кращого. Необхідність розробки системи автоматичного управління, що добре настроюється не тільки на одну робочу точку, але і на весь діапазон робочих точок, стала основою для висунення ідеї адаптивної САУ. Найбільш ефективним напрямком є розробка систем управління на основі адаптивного підходу у поєднанні з методами теорії штучних нейронних мереж.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Нейромережеві системи управління є альтернативою класичним методам побудови систем управління нелінійними об'єктами. Використання штучних нейронних мереж дозволяє вирішувати завдання управління в тих випадках, коли традиційні методи не забезпечують вирішення подібних завдань.

В [1] розглянуті питання теорії і методи синтезу систем управління нелінійними динамічними об'єктами на основі яких навчають багатопарових мереж.

Значну увагу приділено фундаментальним властивостям нелінійних багатопарових нейромереж і алгоритмам їх навчання в реальному часі. В [2] наведено базові функціональні структури нейромережевих динамічних систем управління та ідентифікації стану. Розглянуто приклади, що ілюструють використання багатопарових нейронних мереж як нелінійних регуляторів і приклади комп'ютерного моделювання нейромережевих систем управління багатозв'язними нелінійними об'єктами із застосуванням пакета *MATLAB*. У численних публікаціях, наприклад [3,4], показана ефективність використання нейромережевих структур для регулювання координат одно масових і багатомасових електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям, наведена методика синтезу сучасних регуляторів електромеханічних систем на основі методів фаззи-логіки, нейронних мереж і генетичних алгоритмів. Аналіз останніх досліджень і публікацій з синтезу нейромережевих систем управління нелінійними динамічними об'єктами показує, що даний напрямок є важливим і актуальним.

Мета статті. Метою роботи є синтез і дослідження показників якості функціонування нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейрорегулятором на основі еталонної моделі.

1. Схема системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором на основі еталонної моделі *Model Reference Controller*

Структурна схема виконавчого пристрою стабілізатора озброєння детально розглянута в роботі [5]. 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. Як показали дослідження, для урахування пружності елементів кінематичного пристрою сполучення механічна частина системи може бути представлена у вигляді двомасової системи. Структурна схема виконавчого пристрою стабілізатора озброєння складена з урахуванням моментів сухого тертя на валу двигуна і на валу робочого механізму, а також наявності люфту між зубами провідної і веденої шестерні.

У пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB реалізовані три регулятори: регулятор з прогнозом NN Predictive Controller, регулятор на основі моделі авторегресії з ковзним середнім NARMA-L2 Controller і регулятор на основі еталонної моделі Model Reference Controller. У роботі [6] виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з використанням нейрорегулятора з прогнозом 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. 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. Показано, що нейромережева система з нейрорегулятором NN Predictive Controller має високі показники якості функціонування.

Управління з прогнозом вимагає великої кількості обчислювальних і є досить складним для практичної реалізації, тому в [7] розглянуто можливість застосування більш простого регулятора на основі моделі авторегресії з ковзним середнім NARMA-L2 Controller. При управлінні на основі моделі авто-

регресії з ковзним середнім регулятор є достатньо простою реконструкцією моделі керованого об'єкта. 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 озброєння легкоброньованих машин 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, блоки генерації вхідної дії, блок 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 Fcn2 включені в схему для реалізації передуправління за швидкістю. Для обмеження сигналу при ступінчастій вхідній дії завдання на положення використана ланка обмеження Saturation.

Схема моделі об'єкту управління приведена на рис. 2. Схема складена відповідно до рівнянь динаміки виконавчого пристрою стабілізатора озброєння, приведеними в [6]. У схемі не враховується обумовлений момент, обумовлений коливаннями корпусу носія при пересуванні машини по перетнутій місцевості. Схема об'єкту управління складена з урахуванням моменту сухого тертя в підшипниках приводного двигуна і моменту сухого тертя кінематичного пристрою сполучення. Для їх завдання використано два блоки MATLAB Fcn, призначені для написання виразів на мові MATLAB. Наявність люфту в кінематичному пристрої сполучення моделюється за допомогою ланки Dead Zone.

2. 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.

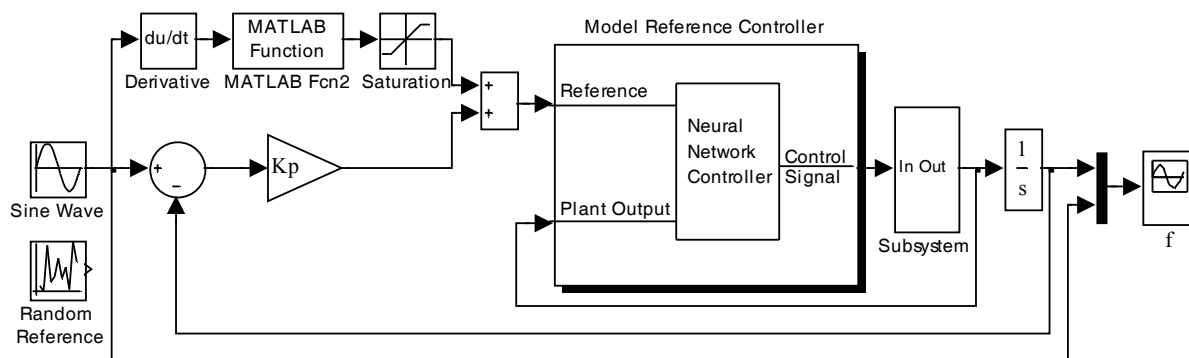


Рис. 1. Схема системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором Model Reference Controller

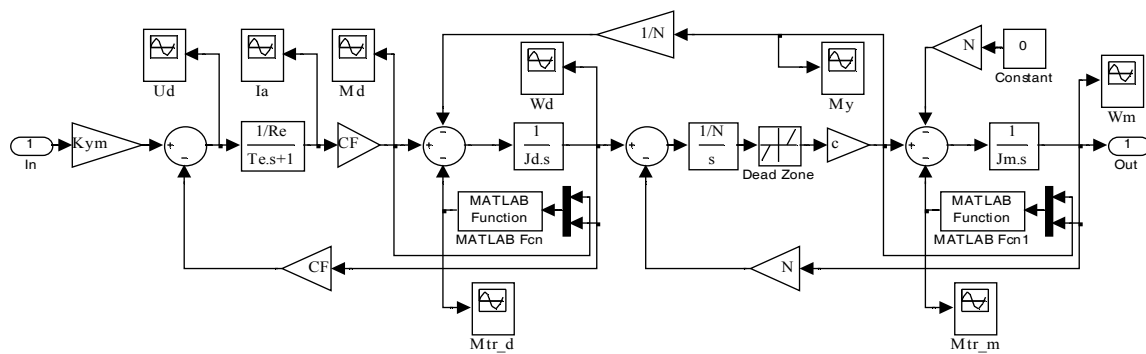


Рис. 2. Схема моделі об'єкту управління (Subsystem)

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, що пояснює принцип побудови системи управління з еталонною моделлю, показана на рис. 3.

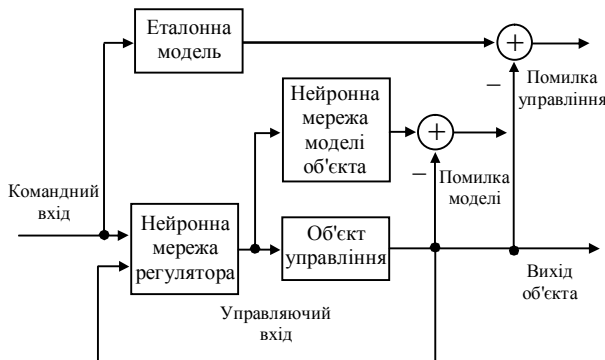


Рис. 3. Структурна схема нейронмережової системи управління з еталонною моделлю

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.

У даній роботі виконаний синтез нейрорегулятора Model Reference Controller за допомогою пакета прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Особливість синтезу нейрорегулятора з еталонною моделлю полягає в тому, що виконується побудова двох нейронних мереж: моделі об'єкту управління і самого регулятора. Спочатку виконується побудова моделі об'єкту управління. Для цього 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 такі: 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 приблизно дорівнювати часу регулювання контуру швидкості, мінімальна – на порядок менше, $t_{min} = 0,01$ с, $t_{max} = 0,1$ с.

При синтезі регулятора варіюється розмір прихованого шару S , кількість елементів запізнювання на вході N_i і виході N_j моделі. При малій кількості нейронів мережа не може виконувати поставлене завдання, а при великому спостерігається явище перенавчання і зростає об'єм обчислень. Значення S , при яких отримані кращі результати, знаходяться в межах $S = 10 \div 15$. Кількість елементів запізнювання на вході N_i і виході N_j моделі об'єкту управління варіювалося в межах $N_i = 1 \div 4$, $N_j = 2 \div 5$.

Для навчання нейронної мережі регулятора також генеруються навчальні дані. Як еталонна модель приймається одномасова система. Потім відбувається створення і ініціалізація мережі з прямою передачею сигналу. Мережа має 4 шари. У відповідному вікні задаються параметри першого і другого шару мережі. У даному випадку розмір першого шару $S_1=14$, у другому шарі є 1 нейрон. Параметри третього і четвертого шарів відповідають параметрам нейронмережової моделі об'єкту управління, отримані в результаті виконання процедури ідентифікації (в даному випадку: розмір третього шару $S_3=12$, четвертого – $S_4=1$). Використовувані функції активації: гіперболічного тангенса (tansig) – в першому і третьому шарі, лінійна (purelin) – в другому і четвертому шарах. Дана мережа не має елементів затримки, тобто є статичною. Мережа використовує 1 вектор входу з 9 елементами. Розмір

вектора входу визначається як $(N_{jc} + N_{ic} + N_{rc})$, де N_{rc} – кількість елементів запізнювання на вході регулятора (у даному випадку $N_{rc}=2$); N_{ic} – кількість елементів запізнювання на виході регулятора ($N_{ic}=3$), N_{jc} – кількість елементів запізнювання на виході моделі об'єкту ($N_{jc}=4$). Параметри N_{jc} , N_{ic} , N_{rc} варіювалися в межах: $N_{rc}=1\text{ч}4$, $N_{ic}=1\text{ч}5$, $N_{jc}=1\text{ч}5$.

Значення вагів і зсувів першого і другого шарів заносяться в пам'ять машини. Потім відбувається створення і ініціалізація мережі з прямою передачею сигналу з одним елементом у векторі входу. Після цього виконується побудова динамічної мережі із заданим числом затримок по входу і виходу моделі і регулятора. Елементом матриць вагів і зсувів першого і другого шару динамічної мережі присвоюються відповідні значення матриць вагів і зсувів першого і другого шарів спочатку створеної статичної мережі, а елементам матриць вагів і зсувів третього і четвертого шару динамічної мережі присвоюються відповідні значення матриць вагів і зсувів першого і другого шару мережі, відповідної нейромережевої моделі об'єкту управління, отриманої при виконанні процедури ідентифікації. Після створення мережі виконується процес її навчання. Параметр навчання вагів і зсувів третього і четвертого шарів встановлюється рівним 0, унаслідок чого вони залишаються незмінними в процесі тренування, а змінюються ваги і зсуви першого і другого шарів, тобто параметри нейромережевої моделі нейрорегулятора. Навчання здійснюється з використанням функції `trainbfgs`. Навчання регулятора може займати значний час, оскільки навчання використовує динамічний варіант методу зворотного розповсюдження помилки. Після закінчення процесу навчання числові значення елементів матриць вагів і зсувів регулятора (тобто першого і другого шарів) вводяться в блок NN Controller, а числові значення елементів матриць вагів і зсувів об'єкту (тобто. третього і четвертого шарів) вводяться в блок NN Plant системи Simulink.

3. Моделювання системи і аналіз отриманих результатів

Для визначення показників якості функціонування нейромережевої системи проведено моделювання системи при різних тестових вхідних сигналах: ступінчастому із змінною амплітудою, що знаходиться в межах $\varphi_3 = -1 \div 1$ рад, гармонійному з частотою 1 Гц і амплітудою 3° . На рис. 4 приведені графіки відрізка кута φ при вказаних діях. Як показали дослідження, відпрацювання кута в нейромережеві системі з нейрорегулятором Model Reference Controller відбувається з коливаннями змінних стану системи. Тому для забезпечення високих показників якості функціонування

системи наведення і стабілізації легкоброньованих машин слід застосовувати нейрорегулятор з передуправлінням NN Predictive Controller.

Висновки

У статті виконаний синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з використанням нейромережевого регулятора на основі еталонної моделі Model Reference 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 еталонної моделі. Виконано синтез нейрорегулятора Model Reference Controller, який реалізований в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Приведені основні характеристики синтезованого регулятора. Проведено моделювання системи при різних видах тестових вхідних дій. 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. *Нейросетевые системы управления* / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: ИПРЖР, 2003. – 480 с.
2. Руденко О.Г. *Штучні нейронні мережі* / О.Г. Руденко, Е.В. Бодяньський. – Х.: ТОВ «Комп. СМІТ», 2006. – 404 с.
3. Клепиков В.Б. *К созданию интеллектуального электропривода для управления машинами с нелинейным трением* / В.Б. Клепиков, Ф. Палис, А.В. Клепиков // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2001. – №6. – С.415-417.
4. Клепиков В.Б. *Гибридные нейронные сети в управлении электромеханическими системами* / В.Б. Клепиков, Ф. Палис, Ю.А. Цепковский // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2003. – №10. – С. 29-33.
5. 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.
6. Кузнецов Б.И. *Синтез нейроконтроллера с предкаанием для двухмассовой электромеханической системы* / Б.И. Кузнецов, Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – №3. – С.27-32.
7. Кузнецов Б.И. *Синтез і дослідження системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейрорегулятором на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім* / Б.И. Кузнецов, Т.Ю. Василець О.О. Варфоломеев // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2010. – №4(24). – С.118-121.

Надійшла до редколегії 30.03.2016

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

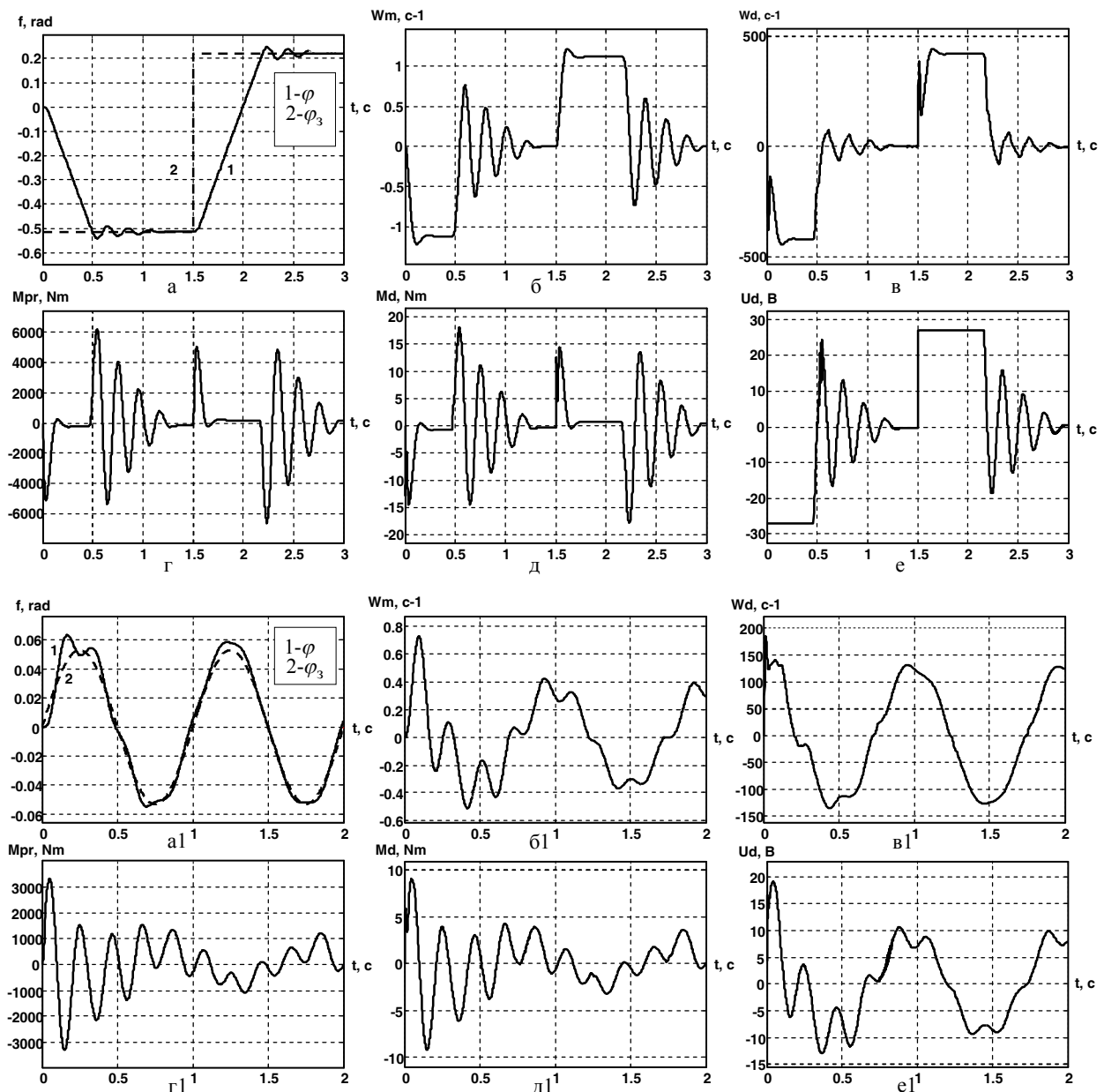


Рис. 4. Графіки перехідні процеси змінних стану нейромережевої системи при ступінчастій (а – е) та гармонійній (а1 – е1) вхідній дії: а, а1 – задаюча дія φ_3 і кут φ ; б, б1 – швидкість механізму ω_m ; в, в1 – швидкість двигуна ω_d ; г, г1 – момент пружності $M_{пр}$; д, д1 – момент двигуна M_d ; е, е1 – напруга двигуна U_d

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВООРУЖЕНИЯ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН С НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ

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

Рассмотрена возможность использования нейросетевого регулятора на основе эталонной модели Model Reference Controller, реализованного в MATLAB, для обеспечения высоких показателей качества функционирования системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин. Приведена структура и принцип действия нейрорегулятора. Разработана схема нейросетевой системы наведения и стабилизации, выполнен синтез нейрорегулятора и проведено моделирование системы.

Ключевые слова: нейросетевое управления, система наведения и стабилизации, нелинейный динамический объект, нейрорегулятор на основе эталонной модели.

SYNTHESIS AND STUDY OF THE AIMING AND STABILIZING SYSTEM OF THE LIGHT-ARMORED MACHINES WITH NEURO-CONTROLLER BASED ON REFERENCE MODEL

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

This paper is discussing the potential of using the Model Reference Controller implemented in MATLAB, to provide high quality performance of the light-armored machine aiming and stabilizing system. Neuro-controller architecture and operation principle are given. It is developed an architecture of the aiming and stabilizing neuro-system. Controller synthesis and system modeling are performed.

Keywords: neural control, system guidance and stabilization, nonlinear dynamic object, neuro-controller based reference model.