

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

Стрембіцький Михайло Олексійович

УДК 681.518.3

**НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
ВИМІРЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ НАВЕДЕННЯ АНТЕН**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ

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

Тернопіль – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Паламар Михайло Іванович,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя МОН України, завідувач кафедри приладів та контрольно-вимірювальних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Івахів Орест Васильович,
Національний університет
"Львівська політехніка" МОН України,
завідувач кафедри приладів точної механіки

кандидат технічних наук, доцент
Кочан Володимир Володимирович,
Тернопільський національний економічний університет,
професор кафедри інформаційно-обчислювальних систем та управління

Захист відбудеться 30 травня 2016 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К58.052.06 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд.58.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий 27 квітня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

М.Є. Фриз

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для забезпечення супроводу супутників дистанційного зондування Землі під час перебування їх в зоні видимості, що може тривати декілька десятків хвилин, механізм керування антенною повинен забезпечувати високу швидкість та точність наведення. Важливу роль в цьому процесі відведено побудові та налаштуванню регулятора керування наведенням антенної системи.

Вагомий внесок у розвиток систем наведення антен здійснили П.В. Белянський, А.А. Гукасян, Б.И. Кузнецов, О.П. Гребенюк, М.І. Паламар, С.К. Ефимов, А.Г. Несторович, W. Gawronski, S. Nazari, M. Richahharia. Побудову нейромережових контролерів для керування динамічними об'єктами розглянуто в роботах: М.В. Наконечного, К.В. Змеу, В.В. Белецкого, S. Omatu, M. Khalid, R. Yusof, D. Mandic. Зокрема у роботі D. Mandic запропоновано використання рекурентних нейронних мереж (НМ) для побудови контролера керування динамічними об'єктами. Однак питання топології НМ та вибору алгоритму навчання для таких систем недостатньо обґрунтовані. В роботах В.И. Ширяєва, Г.К. Вороновського, Л.Г. Комарцовой запропоновано підходи до визначення топології та навчання НМ, що використовують наперед задану структуру НМ, коли відоме число та склад її змінних.

Доцільність побудови НМ, яка б моделювала поведінку антени, обґрунтована труднощами у формулюванні чіткого детермінованого опису. На його основі можна робити висновки про структуру НМ та її навчальну вибірку. Тому питання про визначення структури нейромережової моделі (нейроемулятора) антенної системи, а також побудову на її основі нейромережового контролера керування в системі наведення антени залишається актуальним.

Залишається відкритим питання про структуру НМ і число нейронів в двох перших шарах. Надто ускладнена структура приводить до надлишкового збільшення часу навчання, а також підвищує ймовірність перенавчання НМ, тоді як використання спрощеного варіанту може не дати очікуваних результатів. Практика показує що для більшості задач достатньо двохшарової мережі.

Сучасна елементна база уможливорює реалізацію складних структур та алгоритмів навчання для створення та функціонування нейронної мережі. Це дозволяє підвищити точність вимірювання та надійність керування і зменшити похибку наведення антени, що є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2010 - 2015 рр. відповідно до тематичних планів виконання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, зокрема:

- за державною темою ДІ 206-13 "Розробка та дослідження нових поворотних платформ антенних станцій та систем керування для дистанційного зондування Землі" (№ держреєстрації 0113U000257);
- "Розробка та виготовлення системи керування антенними комплексами ACS - Inter" (тема № 315-12 від 08.10.2012 р.)

- "Розробка та виготовлення системи керування антеною 3,6-Ка" (тема № 216-12 від 21.12.2012 р.)
- "Розробка та виготовлення системи керування БК-2 ААС" (тема № 317-12 від 22.12.2012 р.)

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є підвищення точності вимірювання та керування у системах наведення антен шляхом застосування нейромережових методів з урахуванням особливостей процесу, та побудова контролера наведення антени на основі узагальненого інверсного керування.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Запропонувати метод використання рекурентної НМ для керування антеною.
2. Обґрунтувати ефективність функціонування нейромережевого емулятора у контурі наведення антени.
3. Запропонувати метод перевірки ефективності роботи НМ контролера.
4. Обґрунтувати вибір методу навчання НМ контролера.
5. Запропонувати спосіб підвищення точності керуванням антеною.
6. Запропонувати розподілену систему для керування наведення антени.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання та керування в системах наведення антен.

Предмет дослідження – засоби та методи синтезу штучних нейронних мереж.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися: теорія автоматичного керування та математичного моделювання, методи теорії нейронних мереж, планування експерименту, теорія похибок вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано використання контролера на основі рекурентної НМ для наведення антени, який шляхом реалізації нейромережевого емулятора забезпечує відображення інверсної динаміки системи наведення антени, яке не потребує знання точної математичної моделі керованого об'єкту і дозволяє уникнути громіздких розрахунків на стадії ідентифікації моделі керування.

2. Вперше запропоновано нове застосування методу ідентифікації параметрів антени, при реалізації якого подані на вхід тестові сигнали та врахування перехідного процесу, дало змогу формувати послідовності для проведення навчання нейромережевого контролера наведення антени без використання детального математичного опису керованого об'єкту.

3. Вперше запропоновано метод вибору способу навчання рекурентної НМ Елмана для наведення антени, при відтворенні інверсної динаміки керованого об'єкту, який забезпечує зменшення помилки при проведенні навчання синтезованої нейромережевої структури.

4. Удосконалено метод синтезу нейроконтролера керування антенним пристроєм на основі рекурентної нейронної мережі Елмана введенням глобальних зворотних зв'язків, що дало змогу підвищити точність керування при супроводі антенною системою тестової траєкторії на 3,7% у порівнянні з розрахованим та налаштованим аналітичним методом пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) - регулятором.

5. Удосконалено метод керування наведенням антенної установки для розподіленої системи, застосування якого підвищило швидкодію регулятора на 3% у порівнянні з налаштованим ПД-регулятором.

Практичне значення одержаних результатів полягає в підвищенні точності вимірювання та керування в системах наведення антен.

1. Розроблений метод синтезу рекурентних нейронних мереж для ідентифікації систем наведення антен доведеної до практичної реалізації.

2. На базі розроблених методів синтезовано нейромережевий контролер для керування антеною, що реалізований при відтворенні інверсної динаміки керованого процесу.

Результати роботи впроваджено у Державному науково-технічному підприємстві (ДНТП) «ТехАС-К» за держбюджетним замовленням (№ 0114U0002995), а також на основі господарського договору з ДНТП «ТехАС-К» (г/д №316-12), та у Тернопільському державному науково-технічному підприємстві «Промінь» за держбюджетним замовленням (№ держзамовлення 0113U000257)

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом самостійних наукових досліджень, в яких викладено авторський підхід до побудови контролера керування в системах наведення антен та підвищення точності вимірювання із використанням нейромережевих технологій. Основні твердження і результати наукового дослідження за темою дисертації автор отримав самостійно у процесі науково-дослідної роботи. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить [1] – моделювання роботи нейромережевого контролера у контурі наведення АС; [3] – моделювання роботи рекурентної нейронної мережі в контурі наведення антенної системи; [4] – розробка алгоритму керування різцями з використанням ПД-регулятора, параметри якого налаштовані із використанням рекурентної НМ; [5] – виконання імітаційного моделювання нейромережевої структури та припорційно-інтегрально-диференційного контролера; [6] – розробка програмного забезпечення для реалізації керування двигуном безконтактним моментним; [7] – аналіз та тенденції розвитку нових та удосконалення існуючих опорно-поворотних пристроїв антенної системи; [8] – адаптація та навчання рекурентної нейронної мережі для системи керування динамічними об'єктами зі змінними параметрами; [9] – обґрунтування проведення навчання рекурентної НМ для реалізації прямого інверсного керування динамічним об'єктом; [10] – створення порівняльної моделі для визначення ефективності використання нейронної мережі Елмана у контурі керування антеною системою; [11] – адаптація різного типу нейронних мереж до проведення керування динамічними об'єктами; [12] – алгоритм проведення ідентифікації динамічних об'єктів, програмна реалізація нейромережевої структури для нейроемулатора динаміки об'єкта керування; [13] – синтез нейромережевого контролера для наведення кутомірної осі АС; [14] – опрацювання експериментальних значень для представлення їх у комп'ютерній програмі; [15] – описано спосіб введення графічної інформації в комп'ютер, який використовується для формування послідовності при проведенні навчання НМ.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на наукових конференціях, серед них: Міжнародна науково-технічна конференція "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних

технологій" (м. Тернопіль, 2010 р.), XI, XII Міжнародні конференції "Контроль і управління в складних системах" (м. Вінниця, КУСС-2012, 2014 рр.). XII Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи" (м. Київ, НТУУ "КПІ" 2013 р.), Науково-технічна конференція "Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування" (м. Тернопіль, 2011, 2013, 2015 рр.). Результати дисертаційної роботи, починаючи з 2010 року, представлялись і обговорювались на щорічних науково-технічних конференціях Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Результати дисертації висвітлено й обговорено на наукових семінарах кафедри приладів та контрольно-вимірювальних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль), а також доповідалися на науково тематичному семінарі ТНТУ "Інформаційні системи, обчислювальна техніка та автоматизація".

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 15-ти публікаціях, 4 із яких – статті в наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному виданні *Przegląd Elektrotechniczny* що індексується в SCOPUS, 8 - тез доповідей на науково-технічних конференціях, 1 – авторське свідоцтво на програму, 1 - патент України на корисну модель.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел із 138 найменувань і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 127 сторінок, з яких основний зміст викладений на 106-и сторінках, містить 50 рисунків та 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність роботи. Вказано дані про зв'язок роботи з науковими програмами та планами НДР університету за місцем виконання роботи. Висвітлено інформацію щодо апробації та публікацій результатів роботи.

У першому розділі проаналізовано тенденції розвитку систем керування наведення антен. З'ясовано, що ефективність керування в системах наведення антен, зокрема для супроводу супутників дистанційного зондування Землі, значною мірою залежить від точності вимірювання робочих параметрів і способу побудови та реалізації контролера в контурі керування антенної системи. Водночас зазначено низку факторів, що обмежують використання типових регуляторів.

Зроблено висновок, що процес налаштування параметрів класичного ПД-регулятора потребує побудови детальної моделі системи керування антеною, однак отримання такої моделі не завжди можливе. Інноваційним підходом є створення адаптивних регуляторів на основі нейромережових технологій. Показано, що від реалізації штучних НМ, значною мірою залежить робота системи в цілому. Зроблено огляд представлених промислових та комерційних рішень для синтезу структури штучної НМ.

Розглянуто типи НМ за прийнятою для них класифікацією. На відмінну від традиційних типів систем керування, НМ є нелінійною структурою, основною

властивістю якої є здатність до навчання, що потребує накопичення даних про керований об'єкт, задання структури НМ, вибору алгоритму навчання.

Використання наслідуваного нейрокерування не забезпечує бажаного результату, оскільки похибка регулювання не може приймати значення меншого ніж при керуванні із застосуванням еталонної моделі. На відмінну від наслідуваного нейрокерування реалізація інверсного нейрокерування не потребує використання еталонної моделі контролера керування, а модель для формування навчальної вибірки формують на основі ідентифікаційної моделі об'єкта керування.

Проведений огляд показав існування низки підходів до застосування НМ у моделюванні динамічних систем. Конкретний вибір підходу залежить від параметрів керованого об'єкта, середовища функціонування тощо.

Схема нейромережевого прогнозованого керування наведена на рис.1,а. Бажане значення виходу $r(k)$ разом із поточним значенням виходу ОК $y(k)$ через лінії затримки (ЛЗ) поступає на вхід НМ, яка формує керуючу дію $u(k)$. На рис.1,б показано схему отримання послідовностей для проведення навчання НМ. На вхід ОК прикладемо керуючий сигнал, який за деякий період часу λ переведе вихід системи у новий стан $y(t+\lambda)$.

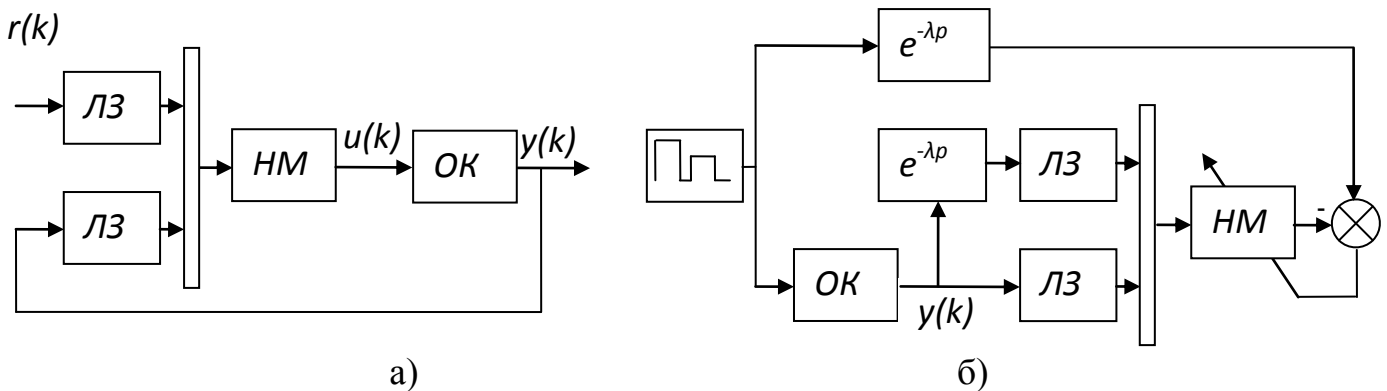


Рис.1. Блок-схема нейромережевого інверсного прогнозованого керування (а), блок-схема навчання нейромережевого інверсного прогнозованого регулятора (б)

НМ навчена переводити об'єкт керування (ОК) з поточного стану в бажаний на протязі горизонту прогнозу. Виміряна та задана траєкторії приймуть наступний вигляд:

$$y_c = [y(k), y(k - \Delta k), \dots, y(k - q\Delta k)]; \quad (1)$$

$$y_r = [r(k), r(k - \Delta k), \dots, r(k - q\Delta k)], \quad (2)$$

де $r(t)$ – сигнал встановлення для системи керування (задана траєкторія); Δk – період дискретизації; q – число затриманих значень сформованих векторів. В такому випадку виникає необхідність визначення величини горизонту прогнозу, значення якого впливає на якість регулювання. Зменшення горизонту прогнозу підвищує точність моделі, але й збільшує швидкодію системи, що призводить до збільшення амплітуди керування. При подачі на вхід випадкового сигналу керування $u(t)$

вимірюється виникаюча при цьому фактична зміна стану керованого об'єкту $y(t)$. На основі останнього формуються регресійні вектори із використанням елементів затримки:

$$y_c = [y(k - g), y(k - g - \Delta k), \dots, y(k - g - q\Delta k)]; \quad (3)$$

$$y_r = [r(k), r(k - \Delta k), \dots, r(k - q\Delta k)]. \quad (4)$$

Таким чином, у першому розділі обґрунтовано наукову задачу вирішення протиріччя між потребою підвищення точності керування в системах наведення антен та можливістю детальної формалізації ситуації для застосування використовуваних сьогодні методів.

У другому розділі вдосконалено метод синтезу нейромережевого контролера для керування в системі наведення антени на основі узагальненого інверсного керування. До системи інверсного нейромережевого керування входить: попередньо навчена НМ, яка відтворенням інверсної динаміки ОК виконує функцію регулятора та еталонна модель, яка визначає бажану динаміку системи (рис.2).

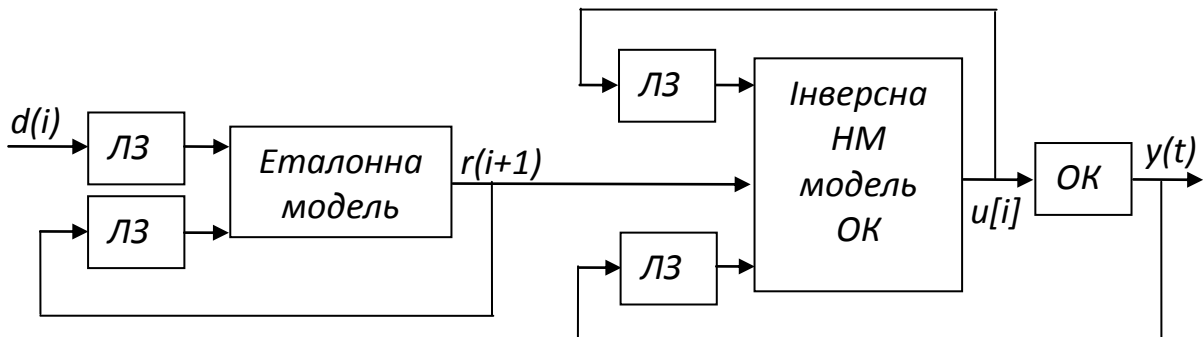


Рис.2. Загальний вигляд системи інверсного нейромережевого керування

Для використання інверсної моделі в контурі керування виконали заміну входу НМ на поточне значення вихідної координати ОК $y[i+1]$. Для такого випадку завданням НМ є мінімізація між заданим значенням та виходом із ОК:

$$\sum_{i=1}^N (u[i] - HM(y(i+1), y[i], \dots, y[i-n], u[i-1], \dots, u[i-m]))^2 \Rightarrow \min, \quad (5)$$

де N – обсяг вибірки експериментальних даних вхід-вихід для ОК, $u[i]$ та $y[i]$ – вхідна і вихідна зміна ОК відповідно, m і n – величини, що визначають розмірність регресивних векторів. Проведено заміну бажаного вихідного значення системи $r[i+1]$ на представлене у вигляді еталонної моделі:

$$u[i] = HM(r[i+1], y[i], \dots, y[i-n], u[i-1], \dots, u[i-m]); \quad (6)$$

$$r[i+1] = \sum_{j=0}^n a_j r[i-j] + \sum_{j=0}^m b_j d[i-j]. \quad (7)$$

Для виразу (7) параметри n , m та сталі коефіцієнти a_j і b_j визначатимуть порядок та динаміку еталонної моделі, яку представили у вигляді лінійної регресійної моделі. В системі безпосереднього інверсного нейрокерування, при умові відповідності інверсній моделі інверсному оператору ОК, не залежно від вигляду еталонного перехідного процесу використовуватиметься умова:

$$y[i] \equiv r[i]. \quad (8)$$

Таке співвідношення відповідатиме вирішенню поставленої задачі керування. Однак проведені експерименти показують, що функціонування такої системи не суттєво відрізняється від традиційного пропорційного регулювання, для якого коефіцієнт підсилення прямує до нескінченності. Обмеження такого типу регулятора можна пояснити тим, що виникають складнощі при побудові інверсної моделі динамічних систем, до яких належить антенна система.

Усунення цієї проблеми дає можливість використати нові рішення для побудови неймережових регуляторів на основі інверсно-прямой моделі ОК. Труднощі, з якими стикнулися при побудові лінеаризованої моделі керованого процесу антеною, проілюструємо часовою характеристикою системи (рис.3).

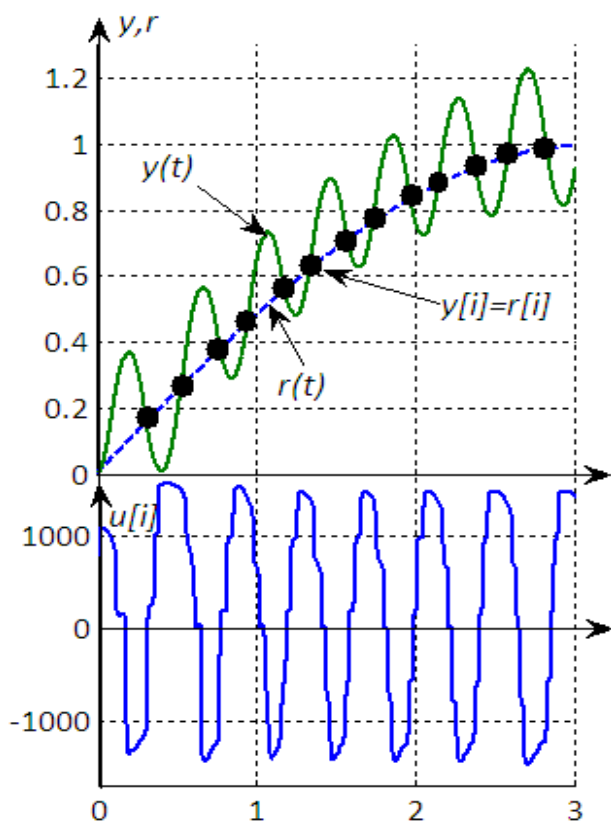


Рис. 3. Приклад функціонування безпосереднього інверсного керування

В момент дискретних відліків часу, бажані та фактичні координати ОК співпадають, тобто інверсна НМ-модель реалізує покладену на неї функцію та виконує рівність (8). Однак перехідний процес може бути нестійким або приймати коливальний характер.

Одним дискретним рівнянням в загальному випадку не можливо одночасно забезпечити бажаний приріст по всіх координатах фазового вектора керованого об'єкту. Тому, забезпечуючи на конкретному інтервалі керування високу точність по координаті виходу ОК, приводимо до появи похибок по інших фазах. Це у свою чергу веде до розузгодження еталонного та фактичного стану. Така особливість проявлялася у вигляді коливального процесу та нестійкості перехідного процесу.

Використання безпосереднього інверсного нейрокерування для вирішенні задачі керування антеною виникають труднощі, які пов'язані з низькою ефективністю навчання інверсної моделі умовах обмеженого керуючого сигналу. Це

привело до відмінності бажаних та фактичних станів ОК. Тому запропоновано використовувати наступний спосіб формування бажаного перехідного процесу:

$$\tilde{r}[i+1] = \sum_{j=0}^n a_j y[i-j] + \sum_{j=0}^m b_j d[i-j]. \quad (9)$$

Вираз (9) отримано шляхом збереження структури коефіцієнтів базового рівняння (7), але заміщено в ньому вектори затриманих значень виходу еталонної моделі $r[i] \dots r[i-\hat{n}]$ на вектор затриманих значень фактичного виходу ОК $y[i] \dots y[i-\hat{n}]$. Визначення еталонного виходу системи $\tilde{r}[i+1]$ відносно фактичних координат ОК $y[i] \dots y[i-\hat{n}]$ забезпечує відповідність стану очікуваного та фактичного перехідного процесу в системі керування. Таке відношення буде співпадати з регенованим перехідним процесом.

Навчання НМ провели на основі представлених прикладів, які містили дані про значення входу та виходу синтезованого регулятора. Запропонований в роботі метод забезпечив отримання послідовності вхід-вихід для регулятора безпосередньо із експериментальних даних вхід-вихід антени. Суть методу полягає в тому, що довільні керуючі сигнали, які діють на ОК і переводять його в новий стан, розглянули як цілеспрямоване керування. Для такого випадку вихідне значення при керуванні визначатиметься не на початку перехідного процесу, а по факту його досягнення, тобто в якості бажаного значення стану приймали те значення, що було фактично досягнуте при випадковому керуванні на ОК.

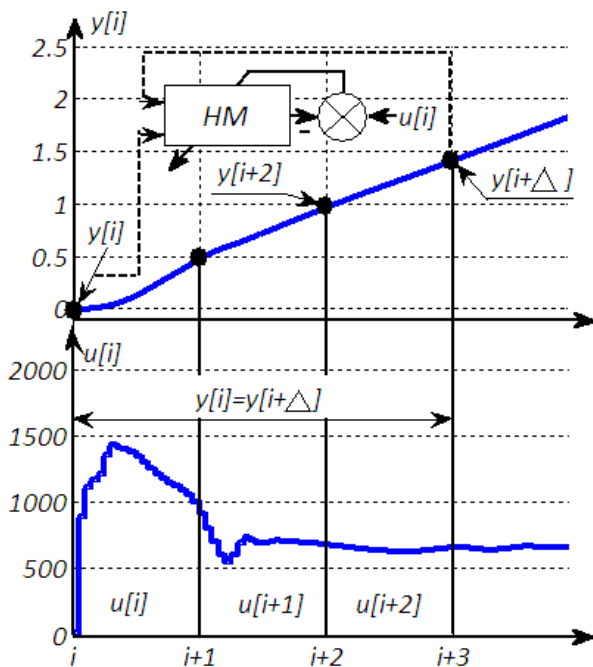


Рис.4. Графічне представлення реалізації інверсного керування

На рис.4 зображено графічне представлення запропонованого методу. Для такого випадку «поточне» значення $y[i]$ та бажане значення $y[i+\Delta]$ затримані на значення часового інтервалу Δ . Навчання НМ провели згідно наступного виразу:

$$\sum_{i=1}^N (u[i] - HM(y[i], y[i+\Delta]))^2 \Rightarrow \min, \quad (10)$$

де N – експериментальний обсяг вибірки даних, $y[i] = (y[i], \dots, y[i-\nu])$ та $y[i+\Delta] = (y[i+\Delta], \dots, y[i+\Delta-\nu])$ – вектори «поточного» та бажаного значення стану антени розмірністю ν . Було інтегровано навчену таким чином НМ в контур керування антеною у відповідності до призначених входів. В процесі роботи було встановлено, що величина Δ є основним параметром при побудові інверсного НМ-регулятора та впливає на швидкодію синтезованої системи керування, оскільки саме її значення дозволяє пригнічувати завади в каналі

зворотного зв'язку. Однак значне збільшення величини Δ зменшує здатність НМ до навчання, оскільки розширюється діапазон зміни можливих керуючих сигналів.

Розглянуто метод вибору значення часового інтервалу Δ . На рис.5, а представлено встановлення швидкості для електромеханічного приводу осі антени, рис.5, б – залежність кутового положення антени від часу. Провівши аналіз серії експериментів, рекомендовано задавати дане значення співрозмірним із значенням постійної часу ОК.

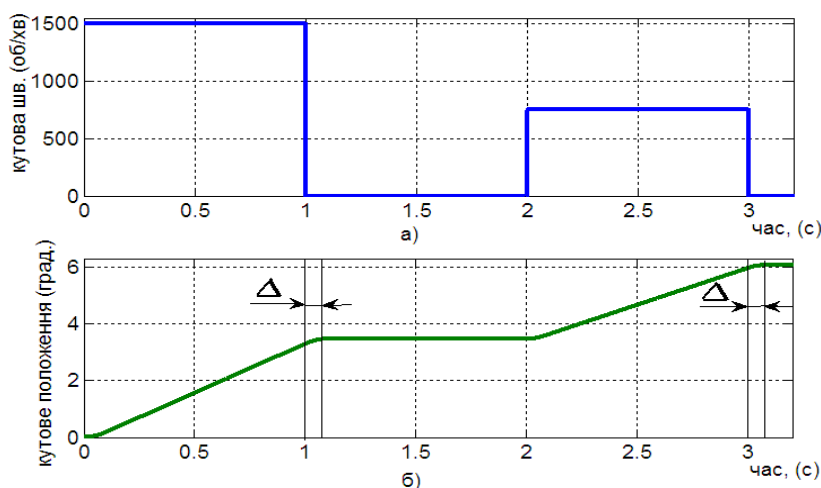


Рис.5. Графічний спосіб визначення значення Δ

У відповідності до поставлених завдань дослідження було проаналізовано метод побудови ідентифікаційної моделі антени із використанням НМ. Розглянули модель антени, для опису якої використано рівняння нелінійної регресії з зовнішніми входами:

$$y(n+1) = f(y(n), \dots, y(n-q+1), u(n)), \dots, u(n-q+1), \quad (11)$$

де $y(n)$ – вихідний вектор, $u(n)$ – вхідний вектор, n – дискретний момент часу, q – порядок системи.

У випадку невідомого порядку системи, використання рекурентної НМ Елмана, яка містить локальний зворотній зв'язок, забезпечує врахування динаміки процесів нелінійного об'єкта, тоді як в НМ прямого поширення сигналу – вхідний сигнал передається без затримки із входу на вихід. Для НМ із локальним зворотнім зв'язком на нейрони проміжного шару, крім значення змінних отриманих від попереднього шару, поступають затримані реакції від нейронів поточного на наступного шару. До загальної кількості зв'язків також віднесемо зовнішні входи НМ. Для такого випадку реакція нейронів попереднього шару, які надходять через прямі зв'язки послаблюється реакціями інших нейронів через які надходять зворотні зв'язки. Мала кількість затриманих сигналів не забезпечила точності відтворення динамічних властивостей антени. Збільшення ліній затримок значено збільшило час проведення навчання, та спостерігали незадовільну реакцію НМ на вхідне значення.

Запропоновано використання модифікованої структури НМ Елмана (рис.6) для якої введено зворотній зв'язок, що повертає вихідні значення з НМ на її входи.

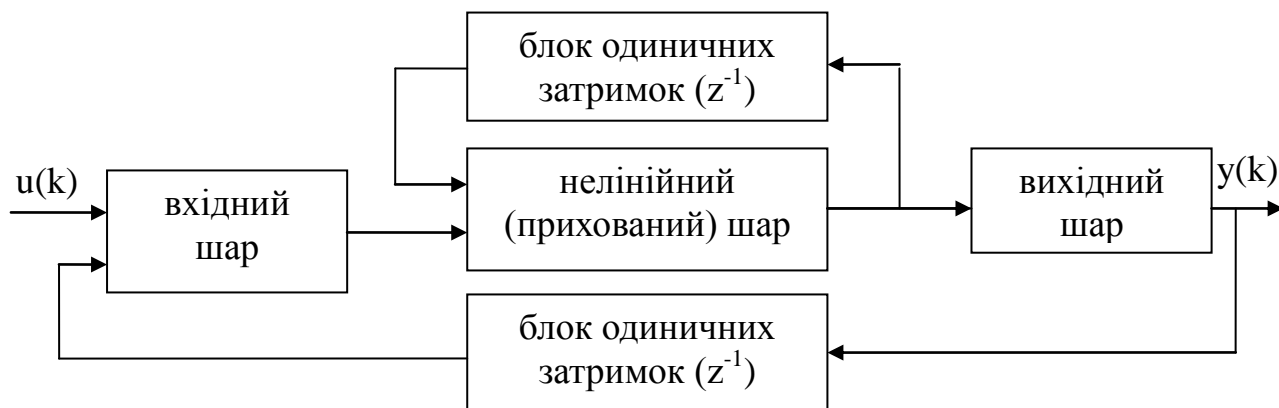


Рис. 6. Модифікована рекурентна НМ Елмана

Однак для такої структури залишається відкритим питання кількості нейронів проміжного шару, та кількості ліній затримок із виходу на вхід. Для нейронів проміжного шару функцію активації представлено гіперболічним тангенсом (*tansig*), для вихідного – лінійна функція (*purelin*).

Для розрахунку кількості нейронів проміжного шару використовували співвідношення:

$$2(L + n + m) \leq N \leq 10(L + m + n), \quad (12)$$

де N – обсяг навчальної вибірки, n – розмірність вхідного вектора, m – розмірність вихідного вектора, L – кількість нейронів.

У третьому розділі вирішено допоміжне завдання, що пов'язане з процесом керування наведенням антени. Охарактеризовано математичну модель системи наведення антени, та чинники впливу на процес керування при наведенні антени. Проаналізовано типові збурення, що діють на антену в процесі роботи. В окремому підрозділі охарактеризовано вплив зовнішніх факторів на керованість і параметри математичної моделі системи наведення антени. Провели моделювання роботи нейромережевого контролера наведення АС на основі рекурентної НМ Елмана.

АС вважаємо системою з розподіленими параметрами та наявністю нелінійностей зумовлених дією збурюючих факторів, однак з точки зору експлуатаційних вимог представимо її системою з зосередженими параметрами. Конструкцію АС у такому випадку привели до багатомасової моделі, а задачу дослідження її динамічних характеристик - до розв'язку системи диференціальних рівнянь руху, загальний вираз яких було отримано з рівняння Лагранжа другого роду. Вважаючи, що сумарна маса системи протягом визначеного часу залишається незмінною, отримали:

$$m_i \ddot{\theta}_i + \sum_{k=1}^n r_{ik} \dot{\theta}_k + \sum_{j=1}^n s_{ij} \theta_j = F_i, \quad (13)$$

де m_i – i -та зосереджена маса, θ_i – переміщення жорсткої маси, r_{ik} – коефіцієнт впливу жорсткості, що характеризує еквівалентну жорсткість в i -й точці при

деформація в k -й точці конструкції, s_{ij} - коефіцієнт впливу демпфування в i -й точці при створенні одиничної швидкості переміщення в j -й точці, F_i – зовнішня сила, що діє на i -ту масу в напрямі її переміщення.

Дослідження власних коливань двомасової просторової моделі антенного модуля дали підстави для представлення його парою взаємозв'язаних плоских моделей – осі азимута та кута місця.

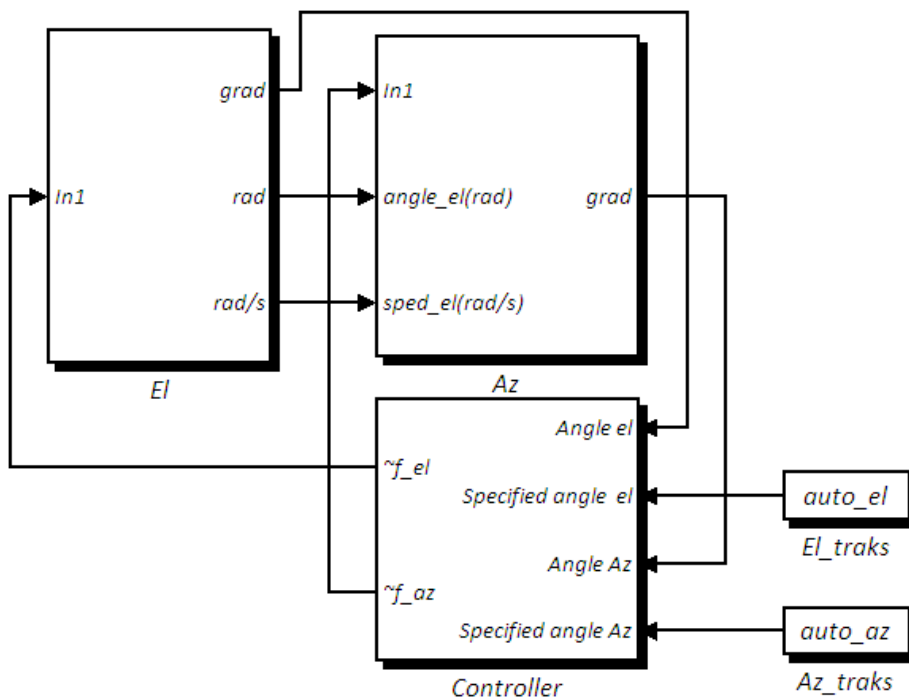


Рис. 7. Модель системи керування АС в системі Matlab/Simulink

Модель АС представлена на рис.7. Введено окремі механічні частини для керування антеною в азимутальній площині та площині кута місця. Зв'язок між цими ланками здійснили із врахуванням того, що момент інерції J_{Az} при обертанні дзеркала системи в азимутальній площині залежить від кута місця φ_{EL} , тобто $J_{Az} = f(\varphi_{EL})$. Провели врахування факторів, що впливають на

функціонування об'єкта дослідження, яким є модель керування системи наведення антени.

На (рис. 8,а) наведена величина похибки навчання для мережі із різною кількістю нейронів у проміжному шарі і середньоквадратичне відхилення (рис. 8,б) при моделюванні роботи нейроемулатора на тестовій траєкторії.



а)

б)

Рис. 8. Результати навчання і моделювання роботи НМ

На рис. 9 наведено схему отримання навчальної послідовності для формування вхідного вектора та вектора цілі нейромережевого емулятора антени. На вхід антени подано сигнали різної форми із заданою частотою та амплітудою. За допомогою блока Switch вибирали форму вхідного сигналу, якими є синусоїда з амплітудою 1 та частотою 0,5 рад/с; прямокутні сигнали із змінною амплітудою та частотою 1 Гц. Отримані значення, а саме встановлене кутове положення передавали у середовище Matlab, використовуючи блок To Workspace. Із отриманих значень формували послідовності для проведення навчання НМ-емюлятора антени.

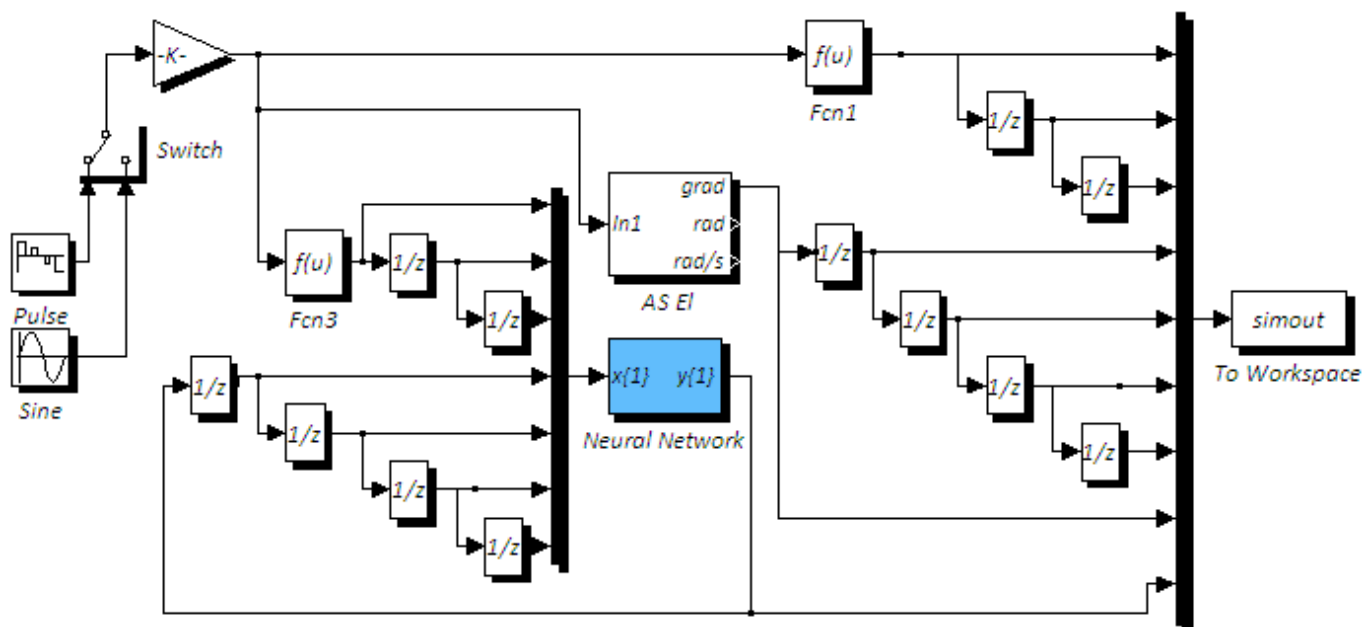


Рис. 9. Структура отримання навчальної послідовності

Для дослідження створили НМ Елмана із 14 нейронами проміжного шару, та 6 глобальними зворотними зв'язками із виходу на вхід. Процес навчання тривав 3хв. 19с. на протязі 10000 епох, похибка сигналу виходу досягла значення $2,66 \cdot 10^{-6}$. Результати тестування роботи НМ ідентифікатора є задовільним, оскільки похибки прогнозування не перевищує максимального значення $9,7 \cdot 10^{-3}$ на діапазоні 0..6 кутових градусів, а середньоквадратичне відхилення - $2 \cdot 10^{-3}$. Під час роботи НМ, а саме після проведення навчання, спостерігали перенавчання, що свідчить або про невдалий вибір структури, або про надто довготривалий процес навчання. В такому випадку НМ здатна із високою точністю відтворювати задану навчальну послідовність, а відтворення іншого типу сигналів і послідовностей НМ не забезпечує, оскільки прогнозування відбувається із значною похибкою, яка наростає під час кожного кроку проведення перерахунку. Тому для перевірки проведемо тестування НМ ідентифікатора для вхідного сигналу, який не був представлений в ході навчання. Це буде гармонічний сигнал – синусоїда з амплітудою 150, частотою 1 Гц, тривалістю роботи, як і у попередньому випадку, 7с. Результати роботи нейроемюлятора наведено на рис.10. Перевірку адекватності роботи моделі виконано через порівняння із вихідним значенням реальної АС при відслідковуванні траєкторії, яка задана гармонічним сигналом, і реакції на імпульсну функцію.

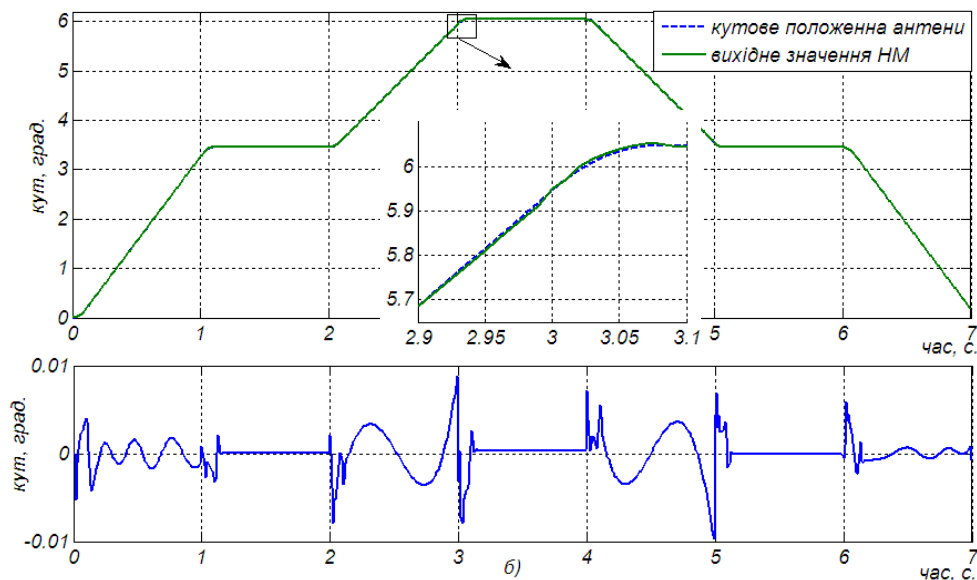


Рис. 10. Кутове положення АС та вихідне значення з НМ-емюлятора (а), похибка відтворення вихідного сигналу (б)

Враховуючи максимальне вихідне значення кутової величини моделі опорно-поворотного приводу АС та максимальне відхилення між кутовим положенням НМ ідентифікатором, відносна величина похибки рівна 0,998%. Проведенні дослідження запропонованого варіанту модифікованої НМ Елмана показують, що похибка у відхиленнях прогнозованого вихідного сигналу від реального дозволяє використовувати розроблену модель у випадках, коли вплив зовнішніх факторів на роботу системи надто складно описувати математично.

На рис.11 представлена схема порівняння роботи НМ-контролера та налаштованого ПІД-регулятора для керування антеною. Для побудови НМ-контролера вибрано НМ Елмана із 14 нейронами проміжного шару та введенням глобальних ліній затримки із виходу на вхід. Навчальну послідовність подано із отриманих значень кутового положення та заданого значення кутової швидкості на вхід моделі антени згідно принципу інверсного керування, описаного в попередніх розділах.

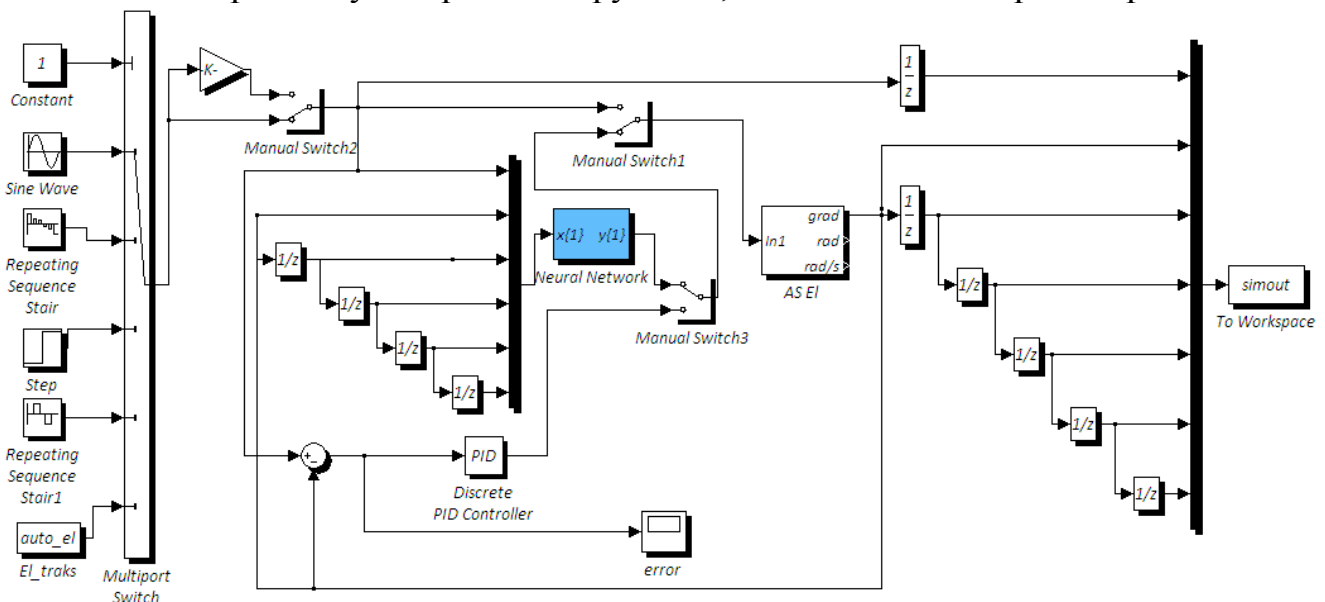


Рис. 11 Проведення порівняння роботи НМ контролера та ПІД-регулятора

На рис.12 представлено супровід антеною тестової траєкторії. Наведено середньоквадратичне відхилення від заданої траєкторії осі кута місця антени для ПД-контролера – $0,1043^\circ$, для НМ-контролера – $0,0703^\circ$.

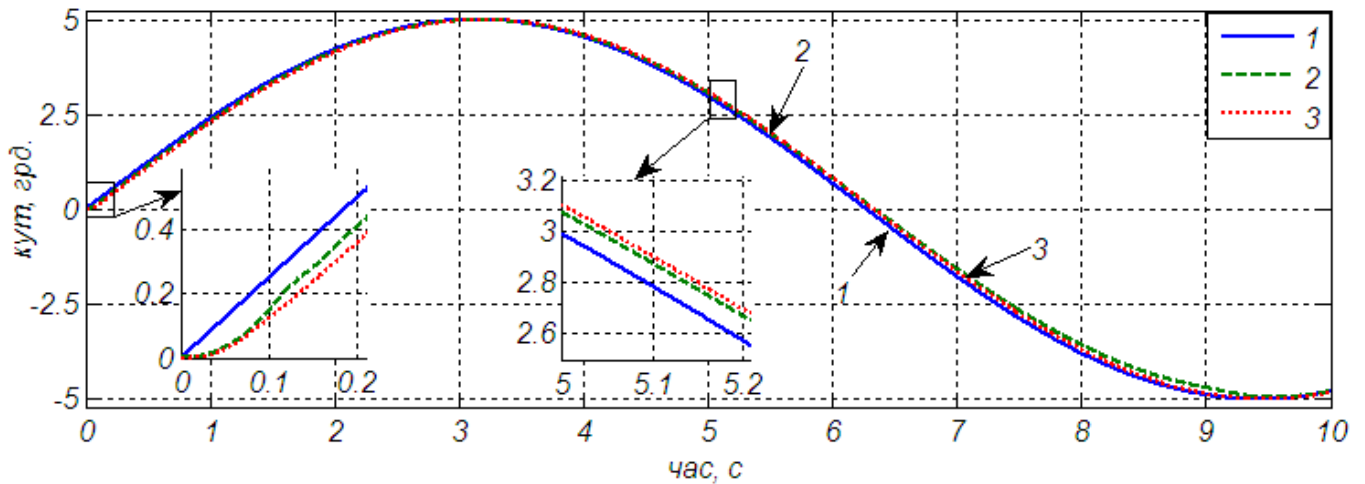


Рис. 12. Проведення по траєкторії осі кута місця антени: 1 – задана траєкторія, 2 – кутове положення антени

У четвертому розділі наведено результати аналізу експериментальних даних роботи НМ контролера наведення антени на основі модифікованої НМ Елмана, зокрема, проведено порівняння результатів роботи НМ контролера та налаштованого ПД-регулятора. Описано спосіб отримання навчальної послідовності при синтезі НМ регулятора для дослідної установки. Також запропонована програмна та апаратна реалізація комплексу для синтезу контролера наведення антени.

Моделювання роботи НМ Елмана проводили з використанням прикладної програми Matlab/Simulink. З доступних функцій утиліти nntool синтезовано нейроконтролер, для якого задано кількість входів, число нейронів у прихованому шарі, встановлено сигмоїдальну функцію активації для проміжного шару та лінійну для вихідного. В середовищі Matlab/Simulink синтезовано схему для отримання та передачі даних у послідовний порт, що реалізується блоками Serial Receive – для прийому, та Serial Send – для відправки даних. Налаштовуваними параметрами послідовного порту є вибір порядкового номеру порту та швидкості прийому/передачі даних. В полі Data type вказано тип прийнятих даних. Оскільки значення кутового положення передбачено приймати від оптоелектронного давача, що видає двохбайтні дані, то вибрано тип прийнятих даних uint16, перший прийнятий байт молодший. В полі Communication port із випадуючого списку вибрано COM1, порт по якому буде проводитись прийом даних із давача кутового положення. Block sample time – вказується інтервал часу між прийнятими байтами. Вибираємо значення 0,01с.

На рис. 13. наведено схему використання НМ в якості регулятора наведення антени синтезована в Matlab/Simulink.

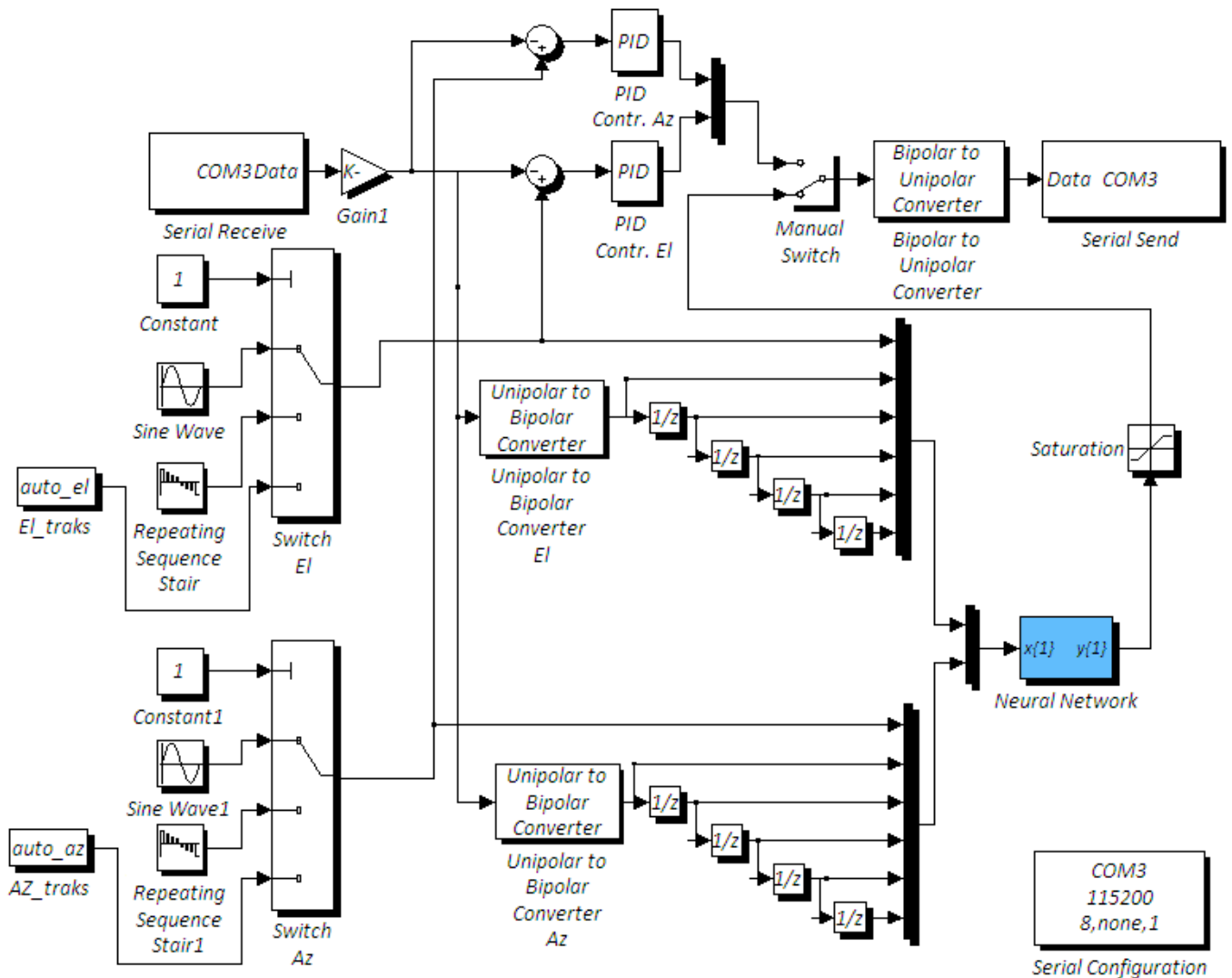


Рис.13. Схема використання НМ в якості регулятора наведення антени синтезована в Matlab/Simulink

Результати тестування синтезованого НМ-регулятора на основі модифікованої НМ Елмана свідчать про підвищення якості регулювання для сигналу заданого стрибкоподібною функцією з амплітудою в 20° . Середньоквадратичне значення похибки для ПІД-регулятора становить 7,3020, для НМ-регулятора – 7,0748, час регулювання для ПІД-регулятора – 9с, для НМ-регулятора – 7,6с. Із приведених значень середньоквадратичного відхилення очевидно, що регулювання із НМ-контролером забезпечує менше знання похибки при наведенні антени.

На рис. 14. приведено значення похибки регулювання: 1 – для нейроконтролера при керуванні віссю кута місця, середньоквадратичне відхилення – $0,0433^\circ$, 2 – для нейроконтролера при керуванні віссю азимута, середньоквадратичне відхилення – $0,0417^\circ$, 3 – для ПІД-регулятора при керуванні віссю кута місця, середньоквадратичне відхилення – $0,0757^\circ$, 4 – для ПІД-регулятора при керуванні віссю азимута, середньоквадратичне відхилення – $0,0806^\circ$.

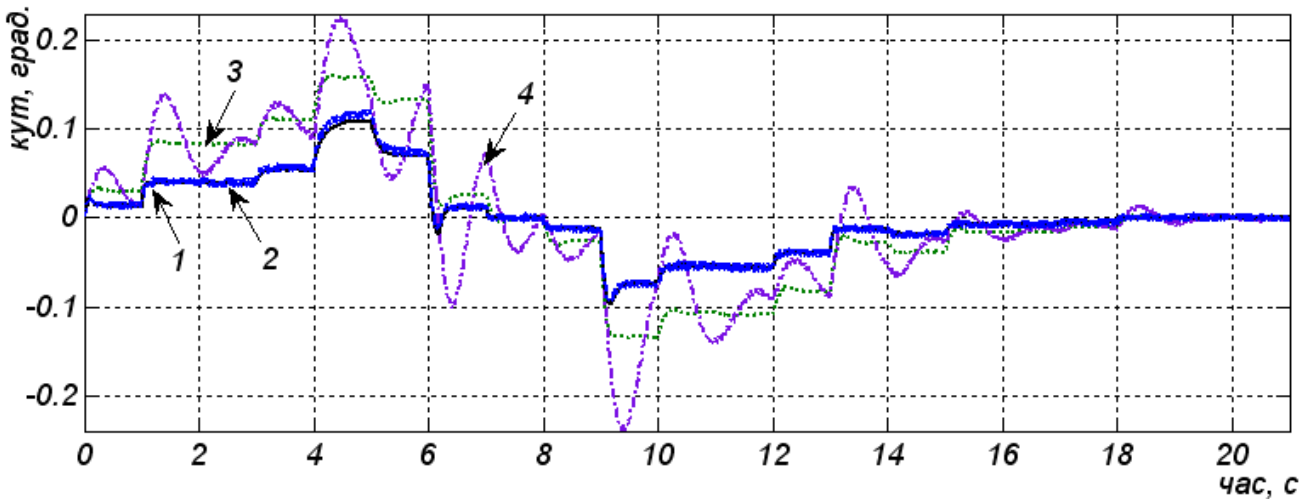


Рис 14. Похибка наведення антени

Запропонована система синтезу нейромережевого контролера наведення антенної системи на основі модифікованої рекурентної НМ Елмана забезпечує меншу середньоквадратичну похибку керування в умовах дії різних збурюючих факторів.

Запропоновані методи використання модифікованої рекурентної НМ Елмана для керування наведенням антени дозволяють синтезувати ефективний регулятор. Перевагою використання запропонованих методів є відсутність потреби побудови точної математичної моделі керованого об'єкта, що робить процедуру синтезу регулятора універсальною.

Запропонована система керування наведенням антени, порівняно з ПІД-регулятором, зменшує час регулювання, а також максимальне значення похибки при проведенні антени по заданій траєкторії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу – розвитку теоретичних засад побудови системи наведення антенної установки. Проведені дослідження дали змогу покращити точність, надійність та ефективність використання нейромережевих технологій в задачах керування наведенням антени.

1. Запропоновано використання контролера на основі рекурентної НМ для наведення антени, який шляхом реалізації нейромережевого емулятора забезпечує відображення інверсної динаміки системи наведення антени, яке не потребує знання точної математичної моделі керованого об'єкта і дозволяє уникнути громіздких розрахунків на стадії опису моделі керування.

2. Запропоновано нове застосування методу ідентифікації параметрів антенної системи, при реалізації якого подані на вхід тестові сигнали та врахування перехідного процесу дало змогу формувати послідовності для проведення навчання нейромережевого контролера наведення антени без використання детального математичного опису керованого об'єкта.

3. Запропоновано метод вибору способу навчання рекурентної НМ Елмана для наведення антени, при відтворенні інверсної динаміки керованого об'єкта, який

забезпечує зменшення похибки при проведенні навчання синтезованої нейромережевої структури.

4. Удосконалено метод синтезу нейроконтролера керування антенним пристроєм на основі рекурентної нейронної мережі Елмана введенням глобальних зворотних зв'язків, що дало змогу підвищити точність керування при супроводі антенною системою тестової траєкторії на 3,7% у порівнянні з розрахованим та налаштованим аналітичним методом ПІД-регулятором.

5. Удосконалено метод керування наведенням антенної установки для розподіленої системи, застосування якого підвищило швидкодію регулятора на 3% у порівнянні з налаштованим ПІД-регулятором..

6. Результати дослідження використані для нейромережевого контролера, синтезованого засобами Matlab, і який через послідовний інтерфейс зчитує поточне значення положення осей антенної системи та виробляє керуючу дію для супроводу та наведення АС, що може бути використано для керування та супроводу по траєкторії в системах наведення реальних антен.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Palamar M. Synthesis and Optimization of Neural Network Parameters to Control Non-linear Objects / Palamar M., Aleksander M., Pohrebennyk V., Strembickyy M. // *Przegląd elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 5/201. - p. 207-210.
2. Стрембіцький М.О Дослідження ефективності алгоритмів навчання модифікованої нейронної мережі Елмана / М.О Стрембіцький // *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. – 2014. №4(76). – С.182-188.
3. Стрембіцький М.О. Дослідження ефективності застосування нейронної мережі в системі керування нелінійними динамічними об'єктами / Паламар М.І., Пастернак Ю.В., Стрембіцький М.О. // *Автоматика, вимірювання та керування*. - *Вісник НУ "Львівська політехніка"*. - 2013. - № 753. - С.8-14.
4. Стрембіцький М.О. Алгоритм керування обробкою при тонкому точінні багато різцевою головкою / Луців І.В., Шарик В., Стрембіцький М. // *Науковий журнал «Технологічні комплекси»*, 2014, №1(9). - С.57-62.
5. Стрембіцький М.О. Застосування рекурентної нейронної мережі для керування об'єктами з невизначеними динамічними параметрами / Паламар М.І., Гнатюк О.Б., Стрембіцький М.О. // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. - 2013. - № 2(107) - С.5-10.
6. Стрембіцький М.О. Управління двигуном безконтактним моментним без зворотнього зв'язку / Паламар М.І., Стрембіцький М.О. // *Матеріали науково-технічної конференції ТНТУ ім. І.Пулюя «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування»* (11-12 травня 2011 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2011 – С.39-40.
7. Стрембіцький М.О. Керування наведенням антени з опорно-поворотним пристроєм на основі платформи Стюарта / Паламар М.І., Пастернак Ю.В., Стрембіцький М.О. // *Матеріали XV наукової конференції ТНТУ ім. І.Пулюя* (14 – 15 грудня 2011 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2011 – С.85

8. Стрембіцький М.О. Застосування рекурентної нейронної мережі для керування об'єктами з невизначеними динамічними параметрами / М. Паламар, О. Гнатюк; М. Стрембіцький // Матеріали XI Міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2012) (09 - 11 жовтня). Вінниця: – 2012 – С. 28.
9. Стрембіцький М.О. Навчання рекурентної НМ для прямого інверсного керування динамічним об'єктом / М.І. Паламар, М.О. Стрембіцький // Матеріали четвертої науково-технічної конференції “GEO-UA” – Київ, 26-30 травня 2014р. – С.171 – 174.
10. Стрембіцький М.О. Дослідження ефективності застосування нейронної мережі в контурі систем керування динамічними об'єктами із невизначеними параметрами / М. Паламар, О. Гнатюк; М. Стрембіцький // Матеріали науково-технічної конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль, 19-20 грудня 2012р. – С.117-118.
11. Стрембіцький М.О. Дослідження ефективності структури нейронних мереж для керування динамічними об'єктами / Паламар М.І., Пастернак Ю.В., Стрембіцький М.О., // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”. – Київ, 23-24 квітня 2013р. – С.280
12. Стрембіцький М.О. Використання модифікованої рекурентної нейронної мережі Елмана для ідентифікації динамічних об'єктів / Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Стрембіцький В.О., // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції “Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування” – Тернопіль, 5-6 червня 2013р. – С. 25
13. Стрембіцький М.О. Синтез нейромережевого контролера для керування наведення антенної системи / М. Паламар, О. Гнатюк; М. Стрембіцький // Матеріали XI Міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2014) (14 - 16 жовтня). Вінниця: - 2012 – С.13.
14. Стрембіцький М.О. Комп'ютерна програма Моделювання роботи антенної системи супроводу низькоорбітальних супутників дистанційного зондування Землі ”ACS_SAT_Track” / М.І. Паламар, М.О. Стрембіцький, Я.М. Паламар // А.с. про реєстрацію авторського права на твір № 47062. «Комп'ютерна програма Моделювання роботи антенної системи супроводу низькоорбітальних супутників дистанційного зондування Землі ”ACS_SAT_Track”» [Текст]. – 2013.
15. Пат. 102637, МПК (2013. 01) G06F 3/033 Спосіб введення графічної інформації в комп'ютер / М.І. Паламар, М.О. Стрембіцький, Я.М. Паламар; заявник і патентовласник Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя. – u201504498; заявл. 18.05.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21.

АНОТАЦІЯ

Стрембіцький М.О. Нейромережеві технології підвищення точності вимірювання та керування в системах наведення антен. – *Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти (технічні науки). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2016.

Дисертацію присвячено вирішенню наукового завдання підвищення точності вимірювання та керування в системах наведення антен із використанням нейромережевих технологій.

Проаналізовано тенденції розвитку систем керування наведенням антен. Зроблено висновки про процес налаштування параметрів класичного ПД-регулятора, який потребує побудови детальної моделі системи керування антени. Проведений огляд підходів до застосування нейронних мереж у моделюванні динамічних систем. Запропоновано використання рекурентної нейронної мережі для побудови контролера наведення антени.

Запропоновано метод ідентифікації параметрів антени, реалізація якого потребує подання на вхід тестових сигналів та врахування перехідного процесу. Такий спосіб дозволяє формувати послідовності для проведення навчання нейромережевого контролера наведення антени.

Запропонована схема навчання нейронної мережі, яка відтворює інверсну динаміку антени, використана для синтезу контролера керування антеною. Використання модифікованої нейронної мережі Елмана підвищило точність керування антеною порівняно із розрахованим та налаштованим аналітичним методом ПД-регулятором.

На основі отриманих результатів розроблено розподілену систему для керування антеною. Навчання нейромережевого контролера для запропонованої системи проведено шляхом відтворення інверсної динаміки самого об'єкту керування.

Ключові слова: система наведення, антенна система, азимутальна вісь, вісь кута місця, нейронна мережа, прогнозування, ідентифікація, інверсне керування, контролер швидкості, похибка супроводу, відхилення.

АНОТАЦІЯ

Стрембицкий М.А. Нейросетевые технологии повышения точности измерения и управления в системах наведения антенн. - *Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - Компьютерные системы и компоненты (технические науки). – Тернопольский национальный технической университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2016.

Диссертация посвящена решению научной задачи повышения точности измерения и управления в системах наведения антенн с использованием нейросетевых технологий.

Проанализированы тенденции развития систем управления для наведения антенн. Сделаны выводы о процессе настройки параметров классического ПИД-регулятора, который требует построения детальной модели системы управления антенны. Проведенный обзор подходов к применению НС в моделировании динамических систем. Предложено использование рекуррентной нейронной сети для построения контроллера наведения антенны.

Использование наследуемого нейроуправления не обеспечивает желаемого результата, так как погрешность регулирования не может принимать значения менее чем при управлении с применением эталонной модели. В отличие от наследуемого нейроуправления реализация инверсного нейрокерування не требует использования эталонной модели контроллера управления, а модель для формирования обучающей выборки формируют на основе идентификационной модели объекта управления.

Предложен метод идентификации параметров антенны, реализация которого требует представления на вход тестовых сигналов и учета переходного процесса. Такой подход позволил формировать последовательности для проведения обучения нейросетевого контроллера наведения антенны.

Предложено использование контроллера на основе рекуррентной НС для наведения антенны, который путем реализации нейросетевого эмулятора обеспечивает отображение инверсной динамики системы наведения антенны, не требует знания точной математической модели управляемого объекта и позволяет избежать громоздких расчетов на стадии описания модели управления.

Проведено моделирование работы нейросетевого контроллера наведения антенны и проведение идентификации антенной установки с использованием рекуррентной НС Элмана.

Предложен метод выбора способа обучения рекуррентной НС Элмана для наведения антенны, при воспроизведении инверсной динамики управляемого объекта, который обеспечивает уменьшение погрешности при проведении обучения синтезированной нейросетевой структуры.

Предложенная схема обучения нейронной сети для воспроизведения инверсной динамики антенны была использована для синтеза контроллера управления антенной. Усовершенствован метод синтеза нейроконтроллера управления антенным устройством на основе рекуррентной нейронной сети Элмана введением глобальных обратных связей, что позволило повысить точность управления при сопровождении антенной системой тестовой траектории на 3,7% по сравнению с рассчитанным и настроенным аналитическим методом ПИД-регулятором.

Усовершенствован метод управления вводом антенной установки для распределенной системы, путем использования рекуррентной нейронной сети. Обучена воспроизводить инверсную динамику антенной системы НС-регулятор повысил быстродействие системы на 3%, по сравнению с настроенным ПИД-регулятором.

Результаты исследования использованы для нейросетевого контроллера, синтезированного средствами Matlab, и который через последовательный интерфейс считывает текущее значение положения осей антенной системы и производит управляющую действие для сопровождения и наведения АС, может быть использовано для управления и сопровождения по траектории в системах наведения реальных антенн.

На основе полученных результатов разработано распределенную систему для управления антенной. Обучение нейросетевого контроллера для предложенной системы проводили, путем воспроизведения инверсной динамики самого объекта управления.

Ключевые слова : система наведения, антенная система, азимутальная ось, угломерная ось, нейронная сеть, прогнозирование, идентификация, инверсное управления, контроллер скорости, погрешность сопровождения, отклонения.

ANNOTATION

Strembitskyy M. Neural network technology improve the precision of measurement and control systems aiming antennas - Manuscript

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty, *specialty 05.13.05-Computer systems and components (technical sciences)*. Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 2016.

Dissertation is sanctified to the decision of scientific task of increase of efficiency of aiming of antenna complexes of accompaniment of space objects.

Basic factors that influence on exactness of management of antenna complexes are analyzed, using of neural network is offered as an identifier of dynamic object that recreates the mechanical part of the antenna system and allows to estimate work of neural network.

The use of recurrent neural networks is offered for the management of dynamic objects, in particular by the antenna complexes of accompaniment of space objects.

The use of the modified Elman neural network is reasonable for the construction of regulator in the contour of aiming of the aerial system, the optimal number of neurons in the intermediate layer of neural network is defined and an effective algorithm for realization of adjustment of weight and displacements of neural network is offered.

A hold neural network training using identity management model of the object, thus forming sequence for inputs and set the system into line output value.

Based on developed a distributed system designed to control antenna. Training neural network controller for the proposed system was performed conducted by inverse dynamics of reproduction facility management.

Key words: steering system, antenna system, azimuthal axis, elevation axis, neural network, prediction, identification, inverse control, speed controller, error tracking, deviation.