

9. ДСТУ ISO 14971:2009. Вироби медичні. Настанови щодо управління ризиком [Текст] / (ISO 14971:2007, IDT): введ.2012-01-01. – Київ: Держспоживстандарт: К.: ДП «УкрНДНЦ». 2012. – 61 с.
10. Ripley, B. D. Statistica laspects of neural networks [Text] / B. D. Ripley. – London.: Published by Chapman&Hall, 1994. – P. 40–111.

Проведені дослідження для створення інтелектуальної системи керування тяговим електроприводом. В результаті встановлено, що кількість ітерацій для знаходження оптимальної тягової характеристики та частинок в рої безпосередньо впливають на тривалість роботи алгоритму та відповідність реальній ситуації отриманої тягової характеристики. Окрім того розроблено методика забезпечення функціонування створеної системи керування на основі нейронних технологій

Ключові слова: електротехнічний комплекс, тяговий привод, методика, нейронна мережа, метод рою часток

Проведены исследования по созданию интеллектуальной системы управления тяговым электроприводом. В результате установлено, что количество итераций для нахождения оптимальной тяговой характеристики и частиц в рою непосредственно влияют на продолжительность работы алгоритма и соответствие реальной ситуации полученной тяговой характеристики. Кроме того, разработана методика обеспечения функционирования созданной системы управления на основе нейронных технологий

Ключевые слова: электротехнический комплекс, тяговый привод, методика, нейронная сеть, метод роя частиц

УДК 621.314.5:681.5:621.313.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39415

ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Д. О. Кулагін

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: kulagindo@gmail.com

І. С. Роменський

Аспірант*

E-mail: Ihor_Romensky@mail.ru

*Кафедра «Електропостачання

промислових підприємств»

Запорізький національний

технічний університет

вул. Жуковського, 64,

м. Запоріжжя, Україна, 69063

1. Вступ

При проектуванні тягових електроприводів першочерговим завданням є встановлення зв'язку експлуатаційних показників, тягової характеристики відповідного рухомого електротехнічного комплексу з параметрами та характеристиками тягового електродвигуна, який буде використовуватися для приводу ведучих коліс. Ці дані служать для обґрунтування вибору розрахункової потужності тягового електродвигуна, силового кола, діапазону регулювання напруги, магнітного потоку та інших конструкційних величин [1]. Основними експлуатаційними показниками рухомого електротехнічного комплексу, що виявляють вплив на вибір параметрів системи тягових електроприводів, є: повна маса комплексу, номінальна та максимальна швидкість руху, показники динаміки розгону (час розгону до заданої швидкості, величини прискорення та ривка) [2].

Забезпечення встановленого рівня експлуатаційних показників, тягової характеристики з параметрами тягового електродвигуна є важливою задачею

організації функціонування транспортного процесу, адже дозволяє точно виконувати встановлені показники графіка руху поряд із забезпеченням оптимальних паливно-енергетичних витрат та нормативних характеристик руху (швидкість, прискорення та ривок) [3].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Типовим варіантом забезпечення необхідної тягової характеристики є такий, при котрому відповідно до заданої потужності тягових агрегатів визначається механічна характеристика тягових електроприводів і відповідна їй тягова характеристика електротехнічного комплексу [2, 3]. Це потребує громіздких обчислень, значних наближень, викликає труднощі при проведенні оптимізаційних розрахунків. Проте, такий метод дозволяє отримувати системи тягового електроприводу для всього широкого різноманіття рухомих електротехнічних комплексів в залежності від прогнозованого максимального навантаження на виконавчий орган або тяговий електропривод. Відомий інший

підхід [2, 4, 5], за якого використовується зворотна схема проектування, коли на основі статистичного матеріалу експлуатації рухомих електротехнічних комплексів аналогічної конструкції на аналогічних ділянках шляху отримують найбільш типову тягову характеристику комплексу і відповідно до неї будують систему керування, топологію тягових електроприводів. Однак, такий підхід містить ряд негативних моментів, пов'язаних з отриманням середньостатистичної тягової характеристики, яка в більшості випадків є придатною лише для аналізованих типових ділянок шляху і майже виключає можливості збільшення тягового потенціалу для використання в нетипових умовах експлуатації. Такий підхід в більшості своїй є виправданим для міського та залізничного пасажирського електротранспорту, де навантаження та умови експлуатації є строго визначеними і майже не змінюються (незначний детермінований характер зміни експлуатаційних параметрів дозволяє використовувати такий підхід до проектування рухомого електротехнічного комплексу). Проте, забезпечення тягових характеристик для різко змінних навантажень, з якими працюють важкі кар'єрні самоскиди, трактори, промислова допоміжна техніка, комбайни та ін. є досить складним з огляду на невизначеність умов роботи та маршрутів використання. Проте жоден з методів не дає можливості встановити однозначний зв'язок між параметрами тягової динаміки та необхідними характеристиками тягових електроприводів [6, 7].

Проектування системи керування для забезпечення необхідного зв'язку між параметрами тягової динаміки та необхідними характеристиками тягових електроприводів, в умовах експлуатації вже спроектованої системи, пропонується виконувати з використанням стохастичних методів, що імітують поведінку, до яких відноситься відомий метод рою часток (Particle Swarm Optimization, PSO), який засновано на закономірностях соціальної поведінки [8–10].

3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету створення інтелектуальної системи керування тяговим електроприводом.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- синтез системи керування для забезпечення необхідного зв'язку між параметрами тягової динаміки та необхідними характеристиками тягових електроприводів з використанням сучасних стохастичних методів;

- розробка методики забезпечення функціонування створеної системи керування на основі нейронних технологій.

4. Матеріали та методика синтезу інтелектуальної системи керування

Метод PSO відноситься до евристичних методів оптимізації, використання якого не потребує знання точного градієнту функції, яка проходить оптимізацію. В даному алгоритмі агентами являються час-

тинки, котрі в кожний момент часу мають в просторі параметрів задачі оптимізації певне положення та швидкість, які визначаються на основі обчислення цільової функції частки: на кожній ітерації для визначення послідовного положення частинки враховується вся інформація про оптимальне положення від сусідніх часток та інформація про дану частинку на тому кроці ітерації, коли частинці відповідало найбільш оптимальне значення цільової функції.

Нехай множина часток (популяція) задана наступним чином:

$$P = \{P_i\}, \tag{1}$$

причому

$$i \in [1; K], \tag{2}$$

де K – кількість частинок в рою, що визначає розмір популяції.

В певний дискретний момент часу

$$t \in [0; T], \tag{3}$$

координати частинки P_i визначаються вектором

$$Y_{i,t} = (Y_{i,t,1}, Y_{i,t,2}, \dots, Y_{i,t,n}), \tag{4}$$

а швидкість частинки визначається вектором

$$\omega_{i,t} = (\omega_{i,t,1}, \omega_{i,t,2}, \dots, \omega_{i,t,n}), \tag{5}$$

де T – кількість ітерацій.

Нехай початкові координата та швидкість частинки P_i визначаються системою виразів

$$\begin{cases} Y_{i,0} = Y_i^0; \\ \omega_{i,0} = \omega_i^0; \end{cases} \tag{6}$$

де Y_i^0 – вектор випадкових чисел, розмірністю $(n \times 1)$; ω_i^0 – аналогічний нульовий вектор.

Нехай стан рою часток, заданого виразом (1) в момент часу, який визначається виразом (3), заданий наступним виразом:

$$s_t = \{Y_t, \omega_t\}, \tag{7}$$

де координати рою P визначаються вектором

$$Y_t = (Y_{t,1}, Y_{t,2}, \dots, Y_{t,K}), \tag{8}$$

а швидкість рою визначається вектором

$$\omega_t = (\omega_{t,1}, \omega_{t,2}, \dots, \omega_{t,K}). \tag{9}$$

Відповідно до вимог методу [8] ітерацію виконаємо за наступною схемою:

$$\begin{cases} \omega_{i,t+1} = \alpha \omega_{i,t} + U_1 [0, \beta] \otimes (Y_{i,t}^b - Y_{i,t}) + U_2 [0, \gamma] \otimes (Y_{g,t} - Y_{i,t}); \\ Y_{i,t+1} = Y_{i,t} + \omega_{i,t+1}, \end{cases} \tag{10}$$

де $U[a, b]$ – K -мірний вектор псевдовипадкових чисел, які рівномірно розміщені в інтервалі $[a, b]$; \otimes – символ покомпонентного множення векторів; Y_{it}^b – вектор координат частинки P_i з оптимальним значенням цільової функції за весь час пошуку, заданий виразом (3), який в процесі ітерацій утворює так званий власний шлях (private guide) даної частинки; Y_{gt} – вектор координат сусідньої з даною частинки з оптимальним значенням цільової функції за весь час пошуку, заданий виразом (3), який в процесі ітерацій утворює так званий локальний шлях (local guide) даної частинки; α, β, γ – довільні параметри, детерміновані для даного варіанту алгоритму пошуку оптимальної функції. При цьому параметр α визначає інерційні властивості частинок рою.

Перерахунок параметрів стану системи відповідно до формули (10) може відбуватися наступними способами:

- оновлення координат часток рою здійснюється лише після визначення поточних швидкостей всіх часток рою;

- оновлення координат часток рою здійснюється до визначення поточних швидкостей всіх часток рою.

Варто відмітити, що для вирішення поставленої задачі керування електричною передачею рухомого електротехнічного комплексу, значення швидкості та координати частинок рою мають бути представлені у вигляді векторних значень і містити значну чисельність компонентів, а не одне скалярне значення. При цьому кількість ітерацій для знаходження оптимальної тягової характеристики та частинок в рої безпосередньо впливають на тривалість роботи алгоритму та прямим чином впливають на якість та відповідність реальній ситуації отриманої тягової характеристики. Окрім того, значення констант варто визначати безпосередньо експериментально виходячи з особливостей поставленої задачі пошуку оптимальної в даній ситуації тягової характеристики.

5. Результати дослідження методики забезпечення функціонування створеної системи керування на основі нейронних технологій

Реалізуємо схему керування тяговим електроприводом на основі нейронної мережі. Процес навчання нейронної мережі являє собою стандартний метод зворотного розповсюдження помилки. Після роботи даного методу синаптична вага додатково корегується.

Синаптична вага кожного нейрона розраховується за допомогою метода зворотного розповсюдження помилки. Потому, синаптична вага додатково корегується методом рою часток на основі наступного алгоритму [9]:

1. Отриманий результат методу зворотного розповсюдження помилки записується до вектору координат сусідньої з даною частинки з оптимальним значенням цільової функції за весь час пошуку, заданий виразом (3), який в процесі ітерацій утворює локальний шлях даної частинки – Y_{gt} .

2. Утворюється рій часток з кількістю часток, що дорівнює кількості синаптичних зв'язків кожного нейрона в шарі.

3. Випадково генеруються початкові координати кожної з часток рою та відповідні їм швидкості руху в рої.

4. Після кожної ітерації алгоритму до вектору координат частинки P_i з оптимальним значенням цільової функції за весь час пошуку, заданий виразом (3), який в процесі ітерацій утворює власний шлях даної частинки – Y_{it}^b – записується вектор синаптичної ваги для кожного еталонного прикладу роботи тягових електроприводів.

Для розробки нейронної мережі, яка буде реалізовувати керування тяговим електроприводом для забезпечення оптимальної тягової характеристики рухомого електротехнічного комплексу задамося наступними вихідними положеннями: нехай в процесі експлуатації електротехнічного комплексу бортова керуюча система щомиті визначає поточний стан комплексу, відповідно до якого буде утворюватися прогнозна тягова характеристика всього комплексу, яка реалізовується засобами тягових електроприводів. В базі даних бортової керуючої системи наявні всі можливі комбінації тягових характеристик даного комплексу (часткові характеристики), які можливо отримати засобами керування енергетичною установкою та тяговим електроприводом даного рухомого комплексу. Задачею нейронної мережі є необхідність визначення максимальної ідентичності поточної і прогнозованої тягової характеристик та наявних часткових тягових характеристик з метою вибору найбільш підходящої в даній ситуації.

Для такої задачі найбільш підходящою є радіально-базисні нейрони [9]. Нейронні мережі з радіально-базисними функціями мають ряд переваг перед відомими багат шаровими мережами прямого поширення. По-перше, вони моделюють довільну нелінійну функцію за допомогою всього одного проміжного шару. По-друге, параметри лінійної комбінації у вихідному шарі можна повністю оптимізувати за допомогою добре відомих методів лінійної оптимізації, які працюють швидко й не викликають труднощів з локальними мінімумами, що створюють проблеми при навчанні з використанням алгоритму зворотного поширення помилки. Задамо радіально-базисну функцію нейрона наступним відомим виразом [9, 10]:

$$W_n = e^{-\frac{i_{vx}^2}{\sigma}}, \quad (11)$$

де i_{vx} – вхідна величина передаточної функції; σ – коефіцієнт, який визначає ширину функції.

Таким чином, вихідний сигнал шаблонного нейрона – це функція тільки від відстані між вхідним вектором і збереженим центром.

Двовірсна функція Гауса досягає максимального значення тільки в тому разі, коли вхідне значення дорівнює нулю. Для того, щоб забезпечити дану умову, на вхід передаточної функції будемо подавати скалярний добуток величини зміщення на вектор евклідової відстані між вектором вхідних значень та вектором зміщень даного нейрона:

$$i_{vx} = \|I_n - Z_n\| \cdot b_n, \quad (12)$$

де b_n – зміщення даного нейрона; I_n – вектор вхідних значень; Z_n – вектор зміщень даного нейрона.

Тоді можна записати наступне:

$$\|i_n - z_n\| = \sqrt{\sum_n (i_n - w_n)^2}, \quad (13)$$

де i_n – елемент вектора вхідних значень; w_n – елемент вектора зміщень.

Нейрони з радіально-базисною функцією будемо використовувати лише в прихованому шарі. В інших шарах будемо використовувати нейрони з логістичною передаточною функцією. Навчання шару зразків нейронів мережі має проводитись на основі попереднього проведення кластеризації для знаходження еталонних векторів і певних евристик для визначення значень. Нейрони схованого шару з'єднані за повнозв'язною схемою з нейронами вихідного шару, які здійснюють зважене підсумовування. Для знаходження значення ваг від нейронів схованого до вихідного шару використовується лінійна регресія. Нейронна мережа буде проводити ідентифікацію тягової характеристики, яка являє собою двомірний об'єкт в одномірний вхідний вектор. Кількість нейронів у вхідному шарі буде визначатись наступним виразом:

$$K_n = F_n \cdot v_n, \quad (14)$$

де F_n – кількість точок, що визначають розмірність тягової характеристики за віссю сили тяги; v_n – кількість точок, що визначають розмірність тягової характеристики за віссю швидкості руху електротехнічного комплексу.

У вихідному шарі розмістимо один нейрон логістичної структури, який має кількість входів, що визначається відповідно до виразу (14).

Нехай передаточна логістична функція має вигляд:

$$W_{\text{лог}} = \frac{1}{1 + e^{-\theta p}}, \quad (15)$$

де θ – активаційний потенціал логістичної функції; p – абсциса логістичної функції.

Нехай активаційний потенціал дорівнює 0.1. Подальше збільшення величини активаційного потенціалу призводить до переходу логістичної функції у порогову функцію Хевісайда. Збільшення величини активаційного потенціалу призводить до зменшення області логістичної функції, а відповідно за змістом логістичної функції до більш чіткого спрацювання нейрону. Для подальших досліджень обираємо величину активаційного потенціалу, рівну 10.

6. Обговорення результатів дослідження вимог щодо побудови тягових електроприводів

Використання визначеної логістичної функції для побудови приведеної нейронної мережі дозволяє отримати певні переваги, з огляду на те, що похідна цієї функції може бути виражена через її значення. Це полегшує використання обраної логістичної функції при навчанні мережі по алгоритму зворотного поширення. Особливістю нейронів з такою передаточною характеристикою є те, що вони підсилюють сильні сигнали суттєво менше, чим слабкі, оскільки області сильних

сигналів відповідають пологим ділянкам характеристики. Це дозволяє запобігти насиченню від більших сигналів.

Налаштування нейронної мережі включає в себе завдання вагового вектора і величин зміщень для нейронів з радіально-базисною функцією прихованого шару, вагового вектора та величин зміщень для нейронів вихідного шару.

В загальному вигляді можна провести навчання розробленої нейронної мережі, що є обов'язковим етапом забезпечення робочого стану мережі, адже після створення вага нейронів має випадкове значення, тому сама мережа в цілому неспроможна виконувати своє призначення. В результаті процедури навчання значення ваги кожного нейрону встановлюються на необхідному рівні.

Використання коректора для нейронної мережі є припустимим тільки в тому разі, коли мережа дає відповідь, близьку до заданої. В протилежному випадку синаптичні ваги різко змінюються, що викликає ще більшу неточність в роботі алгоритму навчання мережі.

Для запобігання зміщення синаптичних ваг в бік однієї з можливих комбінацій значень вихідного шару нейронної мережі необхідно подавати еталонні приклади для навчання з однаковою вірогідністю отримання бажаної тягової характеристики. При цьому бажано подавати одночасно декілька прикладів з усіма можливими комбінаціями вихідних значень нейронної мережі.

Проте, навчання мережі потребує значного часу і для рухомих електротехнічних комплексів майже завжди є можливість здійснювати налаштування за відомими даними про параметри маршруту та необхідні значення змінних руху.

Вхідними значеннями радіально-базисних нейронів є значення швидкості руху електротехнічного комплексу, яке необхідно привести до діапазону значень $[0;1]$. Тоді вектор зміщень для нейронів з радіально-базисною функцією прихованого шару являє собою нормовані значення швидкостей руху електротехнічного комплексу, відповідно до певної часткової тягової характеристики. Для виконання операції нормування вхідних значень радіально-базисних нейронів використаємо перехід до системи відносних одиниць з базисними одиницями відповідно до межової тягової характеристики рухомого електротехнічного комплексу.

Виходячи з того, що кожний нейрон прихованого шару має два входи приймаємо, що максимальне значення евклідової відстані складає $\sqrt{2}$.

Варто відмітити, що величини припустимих відхилень відносяться до категорії адаптивних параметрів і змінюються в процесі руху електротехнічного комплексу в залежності від різноманітних обставин (зміна температури навколишнього середовища, що призведе до зміни опорів системи тягових електроприводів та ін.) чи необхідності збільшення точності роботи отриманої мережі.

Вихідний сигнал нейронної мережі, який належить діапазону значень $[0;1]$, визначає відповідність обраної тягової характеристики оптимальній, відповідно до комплексу параметрів навколишнього середовища та параметрів стану електротехнічного комплексу, часткової характеристики.

На розроблену нейронну мережу послідовно подаються всі наявні комбінації часткових характеристик з мінімальним зміщенням між ними. При ідентичності частини робочих точок тягової характеристики відповідні нейрони прихованого шару переходять до активного стану. Активація вихідного нейрону відбувається лише в разі подолання величини, заданої у векторі зміщень нейронів вихідного шару. При цьому ширина логістичної передаточної функції вихідного нейрону у сукупності з величиною, закладеною у векторі зміщень нейронів вихідного шару, визначають точність визначення необхідної тягової характеристики. Пошук базової тягової характеристики відбувається до першої активації вихідного нейрона мережі.

Розглянемо випадок, при якому після перебору всіх наявних комбінацій тягових характеристик вихідний нейрон не пройшов активацію. В цьому разі можливо зменшити порогові значення і повторити заново ітераційні процеси пошуку необхідної тягової характеристики. Іншим можливим підходом до подолання даної проблеми є вибір варіанту часткової характеристики з найбільшим ступенем ідентичності до необхідної.

Після визначення базової тягової характеристики виконується налаштування нейронної мережі.

Для аналізу ефективності роботи отриманої мережі проведемо дослідження на основі розробленого модулю з методом рою часток та нейронної мережі. Проведемо декілька етапів процесу навчання наново генерованої нейронної мережі для запобігання помилок у отриманих результатах. Усереднені значення середньоквадратичних помилок записані до табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика роботи розробленої нейронної мережі для забезпечення тягової характеристики

| Кількість прикладів для навчання | Середньоквадратична похибка при навчанні за прикладами | Середньоквадратична похибка при введенні даних в ручному режимі |
|----------------------------------|--|---|
| 50 | 0,00261 | 0,00211 |
| 100 | $3,74 \cdot 10^{-5}$ | $2,89 \cdot 10^{-5}$ |
| 500 | $2,15 \cdot 10^{-5}$ | $1,98 \cdot 10^{-5}$ |
| 1000 | $0,95 \cdot 10^{-5}$ | $0,89 \cdot 10^{-5}$ |
| 2000 | $0,77 \cdot 10^{-5}$ | $0,68 \cdot 10^{-5}$ |
| 5000 | $0,52 \cdot 10^{-5}$ | $0,50 \cdot 10^{-5}$ |
| 8000 | $0,15 \cdot 10^{-5}$ | $0,11 \cdot 10^{-5}$ |
| 10000 | $8,11 \cdot 10^{-6}$ | $8,02 \cdot 10^{-6}$ |
| 15000 | $6,11 \cdot 10^{-6}$ | $5,98 \cdot 10^{-6}$ |
| 20000 | $5,04 \cdot 10^{-7}$ | $4,08 \cdot 10^{-7}$ |
| 30000 | $6,73 \cdot 10^{-8}$ | $5,07 \cdot 10^{-8}$ |
| 40000 | $2,03 \cdot 10^{-10}$ | $1,15 \cdot 10^{-10}$ |
| 50000 | $9,44 \cdot 10^{-11}$ | $7,13 \cdot 10^{-11}$ |
| 80000 | $5,78 \cdot 10^{-13}$ | $4,03 \cdot 10^{-13}$ |
| 100000 | $1,88 \cdot 10^{-15}$ | $0,97 \cdot 10^{-15}$ |

З даних табл. 1 видно, що при використанні розробленого алгоритму визначення тягової характеристики величина середньоквадратичної помилки прямує до нуля зі збільшенням величини прикладів для навчання нейронної мережі.

7. Висновки

В результаті проведеного аналізу отримала подальший розвиток методика розробки інтелектуальних керуючих систем для засобів електроприводу шляхом розробки нейронної мережі з використанням систем ройового інтелекту для забезпечення оптимальної тягової характеристики рухомого електротехнічного комплексу, що дозволяє отримувати встановлені часткові тягові характеристики засобами електричної трансмісії з мінімальними значеннями середньоквадратичної похибки. В роботі запропоновано інтелектуальну систему керування тяговим електроприводом на основі наступної послідовності:

– синтез системи керування, для забезпечення необхідного зв'язку між параметрами тягової динаміки та необхідними характеристиками тягових електроприводів з використанням методу рою часток, що дає можливість встановити однозначний зв'язок між параметрами тягової динаміки та необхідними характеристиками тягових електроприводів;

– розробка відповідної нейромережевої технології забезпечення функціонування розробленої системи.

Окрім того, була показана послідовність оптимального налаштування параметрів визначеного рою частинок, що робить вплив на хід процесу навчання методом зворотного поширення помилок, поступово знижуючи значення помилки налаштування всієї мережі системи керування, збільшуючи тим самим відповідність отриманої тягової характеристики реальній ситуації під час даного руху. Для реалізації запропонованої методики було розроблено мережу, в якій реалізована вищеописана система, що навчається по одному з обраних методів.

Література

1. Флоренцев, С. Н. Тяговый электропривод в гибридных транспортных средствах. Часть 3. Разработки КТЭО для гибридных транспортных средств в концерне «РУСЭЛПРОМ» [Текст] / С. Н. Флоренцев, Д. Б. Изосимов и др. // Электронные компоненты. – 2010. – № 1. – С. 62–65.
2. Florentsev, S. N. Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles [Text] / S. N. Florentsev // Proceedings of International Exhibition & Conference “Power Electronics, Intelligent Motion. Power Quality (PCIM-2009). – Nuremberg, Germany, 2009. – P. 625–627.
3. Ефремов, И. С. Теория и расчет тягового привода электромобилей [Текст] / И. С. Ефремов – М.: Высш. шк., 1984. – 383 с.
4. Кулагін, Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів [Текст]: монографія / Д. О. Кулагін. – Бердянськ: ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 с.
5. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл [Текст] / Д. О. Кулагін // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 6. – С. 103–110.

6. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення [Текст] / Д. О. Кулагін // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 49–55.
7. Сафонов, А. И. Обоснование тяговой характеристики, проблема выбора электродвигателя и вспомогательных источников энергии троллейбуса [Текст] / А. И. Сафонов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 3. – С. 72–81.
8. Kennedy, J. Particle swarm optimization [Text] / J. Kennedy, R. Eberhart // Proceedings of IEEE International conference on Neural Networks. – 1995. – P. 1942–1948. doi: 10.1109/icnn.1995.488968
9. Картамышев, Д. А. Обнаружение ddos-атак на основе нейронных сетей с применением метода роя частиц в качестве алгоритма обучения [Текст] / Д. А. Картамышев, К. А. Власов, В. А. Частикова // Фундаментальные исследования. – 2014. – Том. 8-4. – С. 829–832.
10. Moody, J. Fast learning in networks of locally tuned processing units [Text] / J. Moody, C. J. Darken // Neural Computation. – 1989. – Vol. 1, Issue 2. – P. 281–294. doi: 10.1162/neco.1989.1.2.281

Досліджено особливості роботи ретрансляційних систем міліметрового діапазону радіохвиль супергетеродинного типу з аналого-цифровою обробкою сигналу. Запропоновано математичний опис перетворень сигналів та радіохвиль для моделювання роботи системи у зоні дифракції Фраунгофера, коли відбивач має стабільний та флюктуючий елементи. Показано розділення ділянок аналогової та цифрової обробки за максимального використання чисельних методів

Ключові слова: вимірювальна ретрансляційна система, завадове відбиття, фаза, моделювання, аналого-цифрове перетворення

Исследованы особенности работы ретрансляционных систем миллиметрового диапазона радиоволн супергетеродинного типа с аналого-цифровой обработкой сигнала. Предложено математическое описание преобразований сигналов и радиоволн для моделирования работы системы в зоне дифракции Фраунгофера, когда отражатель содержит стабильный и флюктуирующий элементы. Показано разделение участков аналоговой и цифровой обработок при максимальном использовании численных методов

Ключевые слова: измерительная ретрансляционная система, помеховое отражение, фаза, моделирование, аналого-цифровое преобразование

УДК 621.371

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40452

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ТИПА С АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

А. Ф. Величко

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: afvel@yandex.ru

Д. А. Величко

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент*

E-mail: davel@yandex.ru

С. А. Величко

Кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Отдел дистанционного зондирования Земли**

E-mail: s.a.velichko@yandex.ru

А. В. Вичкань

Младший научный сотрудник*

E-mail: vichkan@ire.kharkov.ua

А. Н. Ключева

Кандидат технических наук, научный сотрудник*

E-mail: nushyna@mail.ru

К. В. Нетребенко

Кандидат технических наук, научный сотрудник*

E-mail: vichkan@ire.kharkov.ua

*Отдел обработки радиосигналов**

**Институт радиопизики и электроники

им. А. Я. Усикова НАН Украины

ул. Проскуры, 12, г. Харьков, Украина, 61085

1. Введение

Развитие средств и методов дистанционной диагностики технологических процессов вызвано расту-

щими требованиями к точности и помехозащищенности используемых устройств и систем в условиях роста производства и внедрения новых технологий. Погрешности контроля технологических процессов