

УДК 536.531(532)

ПОХИБКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НЕЙРОННИМИ МЕРЕЖАМИ ЗА ІДЕАЛЬНИМ ПЕРЕХІДНИМ ПРОЦЕСОМ

© Лопатко Ольга, Микитин Ігор, 2017

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Описано результати дослідження похибок прогнозування значення температури із використанням нейронних мереж, алгоритм створення та навчання нейронних мереж. Наведено результати дослідження залежності похибки прогнозування значення температури від кількості шарів у мережі, від кількості входів мережі та від кількості послідовностей для навчання. Дослідження залежності похибки прогнозування температури від кількості входів мережі виконано для двох випадків: за однакового часу вимірювання температури перехідного процесу і за різного. Крім того, нейронну мережу перевірено на тестових послідовностях, які збігались та не збігались з тестовими послідовностями, на яких нейронна мережа вчилася. Ключові слова: нейронна мережа, прогнозування значення температури, температурний перехідний процес.

Описаны результаты исследования погрешностей прогнозирования значения температуры с использованием нейронных сетей, алгоритм создания и обучения нейронных сетей. Приведены результаты исследования зависимости погрешности прогнозирования значения температуры от количества слоев в сети, от количества входов сети и от количества последовательностей для обучения. Исследование зависимости погрешности прогнозирования температуры от количества входов сети проводилось для двух случаев: когда время измерения температуры переходного процесса одинаковое и когда время измерения разное. Кроме того нейронная сеть проверялась на тестовых последовательностях, которые совпадали и не совпадали с тестовыми последовательностями, на которых нейронная сеть училась. Ключевые слова: нейронная сеть, прогнозирование значения температуры, температурный переходный процесс.

The present article describes the results of the study of the prediction error of temperature values using neural networks. In the introduction, the authors point out problems that arise (come up) during the measurement of high temperatures.

The method proposed to solve these problems is neural networks application.

At the very beginning the authors present a neural networks classification based on their architecture (feedforward neural networks, recurrent neural networks and completely linked neural networks were specially highlighted). Also mentioned previous researches where were made conclusions about the most relevant neural network architecture in case of temperature prediction problem using transition process.

The studies described in the article are implemented in the MATLAB computing environment. An algorithm for creating and teaching neural networks was described. Sequences modeling for the neural network training, the functions using for neural network creation and studding, the formula for calculating the absolute error of temperature prediction were given. During the sequences creation, the measurement error was not taken into account, that is, the network studied on ideal sequences.

The results of the study of dependence of the temperature value prediction error on the number of layers in the network, on the number of network inputs and on the number of sequences for training are presented. Investigation of the dependence of the temperature prediction error on the number of network inputs was carried out for two cases: when the time of transition process temperature measurement is the same and when the measurement time is different. In addition, the neural network was tested on sequences that coincided and did not coincide with the sequences on which the neural network studied. Each research was provided with drawings.

At the end of the article the authors make conclusions about the most relevant neural network parameters (number of layers, number of inputs and the number of sequences for training neural network). Maximum temperature prediction error value was mentioned. Plans for further research were also outlined.

Key words: neural network, temperature prediction, temperature transition process.

Вступ. У багатьох технологічних процесах потрібно вимірювати високі температури [1; 2]. Тривале перебування первинного перетворювача (ПП) за високих температур призводить до зміни номінальної статичної характеристики ПП, а отже, погіршує метрологічні характеристики ПП, що істотно зменшує термін його експлуатації. Зменшити тривалість вимірювання можна прогнозуванням значення температури за перехідним процесом [3], не очікуючи стану теплової рівноваги. У такому випадку значення температури визначають за температурним перехідним процесом, що описується виразом [4]:

$$T(t) = T_P + (T_0 - T_P)(1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

де t – час; τ – стала часу первинного перетворювача; T_0 – температура об'єкта вимірювання; T_P – початкове значення температури первинного перетворювача; T – поточне значення температури.

Одним із перспективних способів розв'язання задачі прогнозування значення температури за перехідним процесом є застосування нейронних мереж (НМ). НМ можуть виявляти приховані залежності між вхідними та вихідними даними. Навчання мережі можна здійснювати як за моделлю процесу, так і за експериментальними даними. Навчена мережа з достатньо високою точністю дає змогу прогнозувати значення температури об'єкта вимірювання за перехідним процесом.

Мета. Дослідження залежності похибки прогнозування значення температури нейронними мережами за ідеальним перехідним процесом.

Виклад матеріалу. Штучні нейронні мережі складаються з нейронів, що взаємодіють, які дозволяють виконувати паралельні обчислення [5]. З погляду структури можна виділити три основні типи нейронних мереж [6; 7]: мережі прямого поширення, рекурентні нейронні мережі (нейронні мережі зі зворотним зв'язком), повністю зв'язані мережі. Аналітичний огляд структур нейронних мереж [8] показав, що оптимальним для прогнозування температури є застосування нейронної мережі з архітектурою прямого поширення.

Дослідження, описані в статті, реалізовано в програмному середовищі. Спочатку проводилось моделювання температурного перехідного процесу за виразом (1) для значень температури об'єкта в діапазоні від 200 до 220 °C з кроком ΔT_0 (рис. 1), де значення часу t

змінювалось від 0 до $t_{\text{вум}}$. За проміжок часу $t_{\text{вум}}$ було розраховано n значень температури перехідного процесу. Кожному значенню температури об'єкта вимірювання відповідає певна тестова послідовність (ТП), причому останнє значення температури в тестовій послідовності не перевищувало половини значення температури об'єкта вимірювання, щоб уникнути перегрівання ПП. Усі тестові послідовності утворюють масив тестових послідовностей. Під час створення тестових послідовностей не враховували похибку вимірювання, тобто мережа навчалась на ідеальних послідовностях. У статті використано такі позначення: k – кількість послідовностей для навчання; m – кількість шарів нейронної мережі; n – кількість входів нейронної мережі.

Створювалась нейронна мережа з архітектурою прямого поширення (функція feedforwardnet) із урахуванням кількості нейронів у прихованих шарах. Нейронну мережу навчали функцією train, для якої вказували назву мережі, масив тестових послідовностей, для якого кожна із тестових послідовностей є входом нейронної мережі, та масив відповідних значень температури об'єкта вимірювання, які є виходом нейронної мережі (рис. 2).

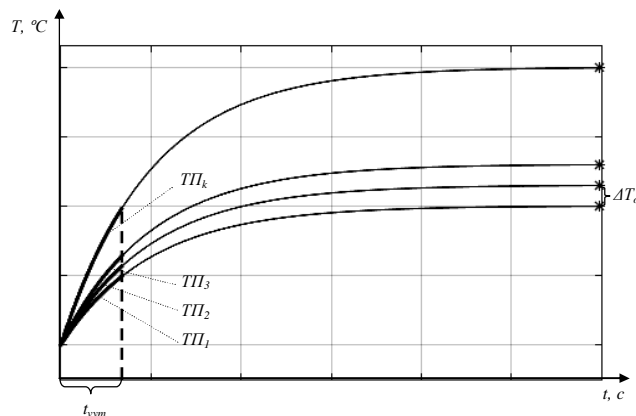


Рис. 1. Масив тестових послідовностей для навчання нейронної мережі

Fig. 1. Array of test sequences for neural network training

Надалі навчену нейронну мережу використовували для прогнозування температури за ідеальним перехідним процесом та розраховували абсолютну похибку прогнозування температури за формулою:

$$\Delta T = T_{PR} - T_0, \quad (2)$$

де T_{PR} – прогнозоване значення температури; T_0 – температура об'єкта вимірювання для цієї тестової послідовності.

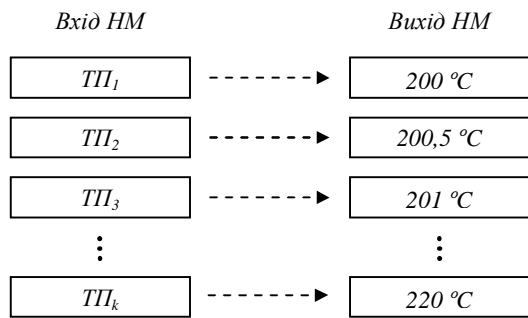


Рис. 2. Входи та виходи нейронної мережі

Fig. 2. Inputs and outputs of neural network

Нижче подано результати дослідження похибки прогнозування температури із застосуванням тестових послідовностей, які використовували для навчання НМ. На рис. 3 наведено залежність похибки прогнозування значення температури від кількості шарів у мережі.

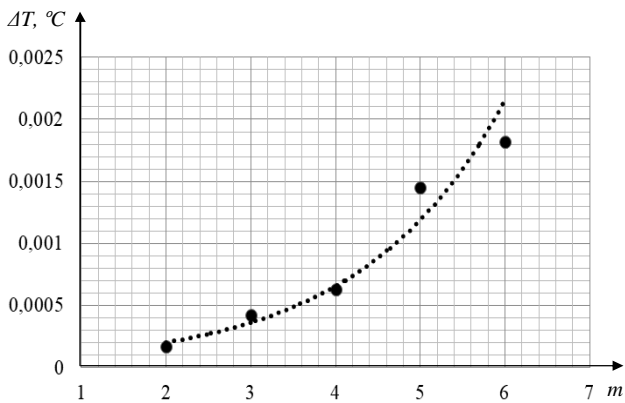


Рис. 3. Залежність похибки прогнозування значення температури від кількості шарів у мережі

Fig. 3. Dependence of the temperature value prediction error on the number of layers in the network

Здійснено дослідження п'яти нейронних мереж, які відрізняються кількістю шарів m (2, 3, 4, 5, 6). Кількість входів кожної нейронної мережі n – 25. Навчання нейронних мереж проводилось на 41 тестовій послідовності (температура об'єкта вимірювання змінювалась від 200 до 220 °С з кроком 0,5 °С). Враховуючи результати (рис. 3), можна зробити висновок, що зі збільшенням кількості шарів у мережі зростає похибка прогнозування. Отже, доцільно використовувати нейронну мережу з найменшою кількістю шарів. Значення абсолютної похибки прогнозування температури для ідеальних тестових послідовностей двошаровою

мережею менше за $2 \cdot 10^{-4}$ °С. У подальших дослідженнях використовували двошарову нейронну мережу прямого поширення.

Дослідження нейронної мережі за кількістю входів проводили для двох випадків: 1) час вимірювання однаковий, а крок за часом різний ($t_{\text{вим}} = \text{const}$, $\Delta t = \text{var}$) (рис. 4, а); 2) час вимірювання різний, а крок за часом однаковий ($t_{\text{вим}} = \text{var}$, $\Delta t = \text{const}$) (рис. 4, б).

На рис. 5 подано залежність похибки прогнозування значення температури від кількості входів нейронної мережі (крок за часом різний).

Кількість входів нейронних мереж n становила 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 100; температура об'єкта вимірювання змінювалась від 200 до 220 °С з кроком 0,5 °С.

На рис. 6 подано залежність похибки прогнозування значення температури від кількості входів нейронної мережі (крок за часом однаковий).

Кількість послідовностей для навчання k становила 41, 51, 68, 101, 201. Зі збільшенням кількості послідовностей для навчання НМ (рис. 7) похибка прогнозування температури зменшується. Проте навіть для найменшої кількості послідовностей для навчання абсолютна похибка прогнозування значення температури не перевищує $2,5 \cdot 10^{-5}$ °С, а цього є достатньо для більшості практичних задач вимірювання температури.

На рис. 8 подано залежність похибки прогнозування температури від температури об'єкта вимірювання.

Як можна побачити з рис. 8, найбільшою похибка прогнозування є на краях діапазону вимірювання, проте в найгіршому випадку вона не перевищує $2,5 \cdot 10^{-5}$ °С. У середині діапазону навчання мережі (від 200 до 220 °С) похибка не перевищує $0,3 \cdot 10^{-5}$ °С.

Крім того, нейронну мережу перевіряли на тестових послідовностях, які не збігались із тестовими послідовностями, на яких НМ вчилася (рис. 9).

У цьому випадку мережа навчалася на тестових послідовностях для температури об'єкта вимірювання 201,5 °С та 202 °С. Як видно з рис. 9, спостерігається неістотне зростання похибки прогнозування значення температури. Найбільше значення похибки прогнозування отримано всередині діапазону, воно не перевищує $3 \cdot 10^{-5}$ °С.

Рис. 4. Два випадки дослідження нейронної мережі за кількістю входів: а – час вимірювання однаковий, б – час вимірювання різний

Fig. 4. Cases of neural network research by number of inputs: a – the measurement time is the same, b – the measurement time is different

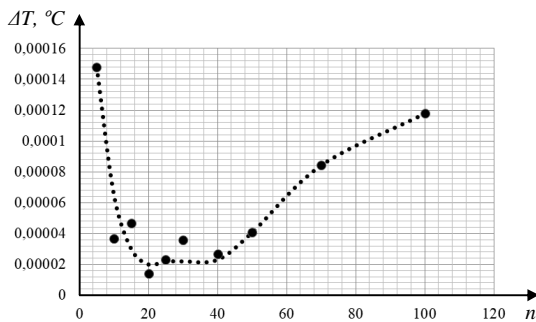
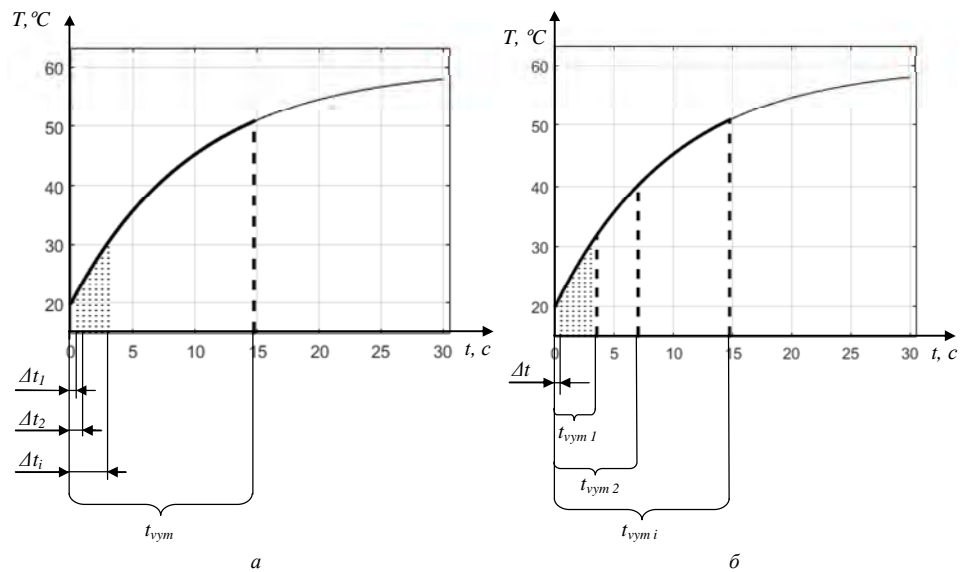


Рис. 5. Залежність похибки прогнозування значення температури від кількості входів нейронної мережі (крок за часом різний)

Fig. 5. Dependence of the temperature value prediction error on the number of neural network inputs (time step is different)

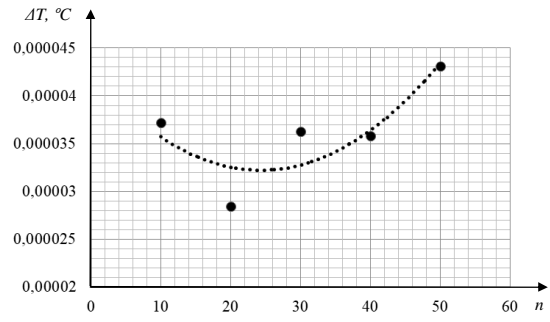


Рис. 6. Залежність похибки прогнозування значення температури від кількості входів нейронної мережі (крок за часом однаковий)

Fig. 6. Dependence of the temperature value prediction error on the number of neural network inputs (time step is the same)

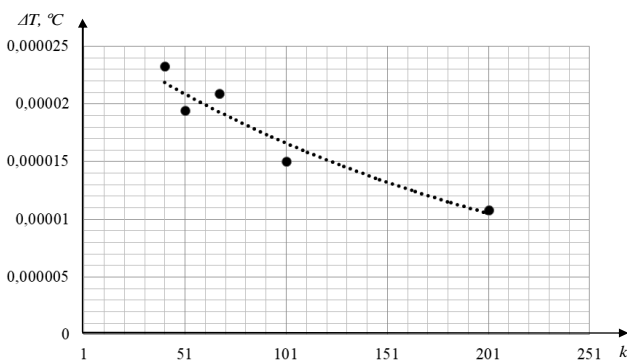


Рис. 7. Залежність похибки прогнозування значення температури від кількості послідовностей для навчання

Fig. 7. Dependence of the temperature value prediction error on the number of sequences for training

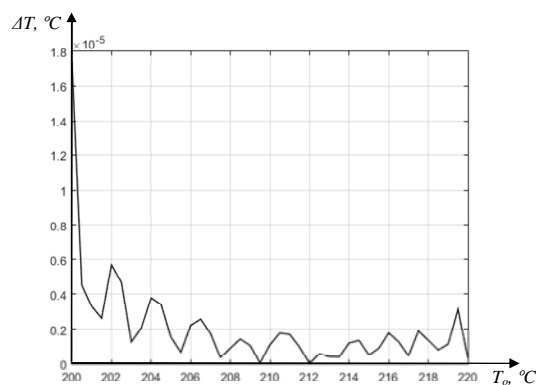


Рис. 8. Залежність похибки прогнозування температури для кожної тестової послідовності, на якій вчилася нейронна мережа

Fig. 8. Dependence of the temperature value prediction error on sequences on which the neural network has been studied

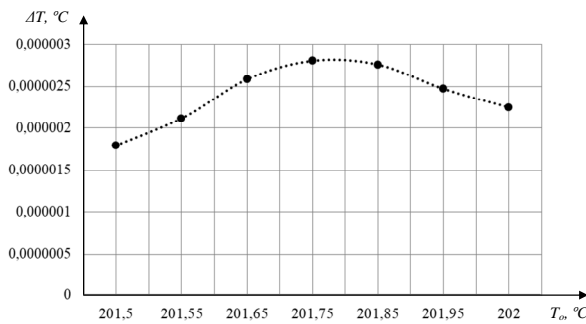


Рис. 9. Залежність похибки прогнозування температури від температури об'єкта, для значень на яких мережа не навчалась

Fig. 9. Dependence of the temperature value prediction error on sequences on which the neural network has not been studied

Висновок. Проведені дослідження показали, що доцільно використовувати нейронну мережу з одним внутрішнім шаром (двошарову). Оптимальна кількість входів нейронної мережі – в межах від 20 до 40. Похибка прогнозування значення температури зменшується зі збільшенням кількості послідовностей для навчання. Похибка прогнозування значення температури для ідеальних тестових послідовностей не перевищує $3 \cdot 10^{-5}$ °C.

Надалі планується дослідження впливу інструментальних похибок вимірювання температури на похибку прогнозування.

1. Alexander von Beckerath, Anselm Eberlein, Hermann Julien, Peter Kersten, Jochem Kreutzer, WIKA Handbook Pressure & Temperature Measurement. – Cumming: Corporate Printers, 2008. – 423 p.
2. Yatsyshyn S. Research in Nanothermometry. Part 2. Methodical Error Problem of Contact Thermometry. S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, O. Kozak. Sensors & Transducers,

Spane. – 2012. – Vol.140. – Issue 5. – pp. 8–14.
3. Ковальчук Н. Г., Полищук Е. С., Пытель И. Д., Семенистый К. С. Современные методы и средства определения динамических характеристик преобразователей. Обзорная информация ТС-6, НИИТЭИ приборостроения. – 1983. – Вып. 1. – 46 с.
4. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
5. Наконечний М., Гірняк Ю., Івахів О., Репетило Т. Проектування нейроконтролерів для керування нелінійними об'єктами другого порядку // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2014. – № 75. – С. 102–106.
6. Kriesel D. A Brief Introduction to Neural Networks, 2007, http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks.
7. Rajesh Bordawekar, Bob Blainey, Ruchir Puri, Analyzing Analytics. – Morgan & Claypool Publishers, 2015. – 124 p.
8. Лопатко О. О., Микитин І. П. Нейронні мережі як засіб прогнозування значення температури за перехідним процесом // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2016. – № 77. – С. 65–69.