

В спеціалізовану вчену раду Д 35.052.08  
Національного університету «Львівська політехніка»

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, д.т.н., с.н.с. Воробйова Л.Й.

на дисертаційну роботу Лопатко Ольги Олегівни «Прогнозування значення температури за перехідним процесом із використанням нейронних мереж», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин.

### **1. Актуальність теми дисертації**

Застосування сучасних методів опрацювання первинних даних у інформаційно-вимірвальній техніці забезпечує покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик, підвищення надійності вимірвальної техніки. Це загальне положення повною мірою відноситься до засобів вимірювання температури, і особливо, високої температури, яка негативно впливає на довговічність перетворювачів. Методи розрахунку температури об'єкта вимірювання за температурним перехідним процесом забезпечують збільшення терміну експлуатації первинних перетворювачів та розширення діапазону їх застосування, а запропоноване у представленій роботі використання нейронної мережі дозволяє ефективно вирішити це завдання. Отже, тема представленої дисертації Ольги Олегівни Лопатко, без сумніву, є актуальною.

### **2. Загальна характеристика структури та змісту дисертаційної роботи.**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 69 найменувань та додатків. Основний зміст роботи викладений на 137 сторінках, включаючи 50 рисунків та 17 таблиць.

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і завдання досліджень; визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів досліджень; наведена інформація про методи досліджень, особистий внесок здобувача, апробацію результатів, публікації, структуру та обсяг роботи.

*У першому розділі* подано інформацію про методи прогнозування температури за перехідним процесом. Розглянуті математичні моделі температурного перехідного процесу та прогнозування при відомих та невідомих сталих часу первинного перетворювача. Наведений стислий опис методу прогнозування значення температури за перехідним процесом із

використанням фільтра Калмана. Проведений аналітичний огляд нейронних мереж. Зроблено висновок, що застосування нейронної мережі дозволяє створити ефективний засіб вимірювання температури, який не потребує інформації про об'єкт вимірювання.

*Другий розділ* присвячено вибору структури нейронної мережі та дослідженню похибок, що виникають при прогнозуванні температури в залежності від характеристик мережі та параметрів навчальної інформації. Показано, що за критерієм мінімуму похибки прогнозування температури доцільним є використання двошарової нейронної мережі з кількістю входів від 20 до 40. Встановлено, що існує певна кількість навчальних пар, після збільшення якої покращення метрологічних характеристик устави з нейронною мережею є незначним. Обґрунтовано висновок, що запропонований метод може використовуватись для вимірювання температур, які знаходяться за межами діапазону температур, на якому навчалась нейронна мережа, причому чим більше відхилення вимірюваної температури від межі діапазону навчання, тим більшою є похибка прогнозування.

*У третьому розділі* розглянуто вплив похибок вимірювання на похибку прогнозування температури. Встановлено, що застосування нейронної мережі суттєво зменшує вплив детермінованих складових похибки вимірювання (мультиплікативної та нелінійної) на похибку прогнозування, а випадкова похибка має набагато більший вплив на похибку прогнозування. Випадкова похибка вимірювання фактично визначає значення сумарної похибки прогнозування. Проведені також дослідження похибки прогнозування значення температури об'єкта вимірювання від похибки зразкового термометра, розрядності АЦП, багаторазового зсуву тестових послідовностей.

*Четвертий розділ* містить опис експериментальних досліджень устави для вимірювання температури за перехідним процесом із використанням нейронної мережі. Наведена структура обладнання Інституту вимірювань та сенсорних технологій Технічного Університету Ільменау (Німеччина), яке використовувалось для експериментальних досліджень. Розглянуті методики та наведені результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик устави в повітряному та водному середовищах.

Встановлено, що експериментально отримана похибка прогнозування температури при використанні способу навчання нейронної мережі на моделі температурного перехідного процесу є приблизно в 4 рази більшою за похибку, отриману при застосуванні способу навчання на об'єкті

вимірювання або способу навчання на моделі з подальшим донавчанням нейронної мережі на об'єкті вимірювання.

*У висновках* по дисертаційній роботі наведені основні результати проведених досліджень, а саме показано, що вирішено актуальне науково-прикладне завдання розроблення методу вимірювання температури за перехідним процесом із застосуванням нейронної мережі.

*Додатки* містять перелік публікацій за темою дисертації, акти впровадження результатів дослідження, програми створення тестових послідовностей, програми створення, навчання та перевірки мереж.

### **3. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертації забезпечена використанням відомих та перевірених законів метрології та термометрії, теорії похибок та опрацювання результатів вимірювань, теорії електричних кіл та окремих розділів теорії штучних нейронних мереж.

Експериментальні дослідження метрологічних характеристик створеної установки для вимірювання температури за перехідним процесом із використанням нейронної мережі виконувались із застосуванням стандартних методів та засобів вимірювальної техніки.

Апробація основних наукових положень дисертації проведена на 4-х міжнародних та всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференціях, що відповідають тематиці роботи.

### **4. Значущість роботи для науки і практики.**

#### **4.1 Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше запропоновано метод вимірювання температури за перехідним процесом із використанням нейронної мережі, який дозволяє мінімізувати вплив адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки застосованих робочих засобів вимірювальної техніки..

2. Вперше отримано залежність похибки прогнозування значення температури об'єкта вимірювання за температурним перехідним процесом від кількості шарів, кількості входів нейронної мережі та кількості тестових послідовностей для навчання, що дозволяє оптимізувати структуру нейронної мережі за критерієм мінімуму похибки прогнозування температури.

3. Вперше отримано залежність похибки прогнозування значення температури із використанням нейронної мережі від мультиплікативної, нелінійної та випадкової складових похибки вимірювання миттєвих значень температурного перехідного процесу, що дозволяє встановити вимоги щодо

інструментальних похибок засобів для вимірювання миттєвих значень температури.

#### **4.2 Практичне значення одержаних результатів**

Розроблений метод вимірювання високих температур за перехідним процесом із використанням нейронної мережі дозволяє збільшити термін експлуатації первинних перетворювачів, зменшити час вимірювання температури та розширити допустимий діапазон температури, в якому може застосовуватись первинний перетворювач. Це дозволяє використовувати запропонований метод у галузях народного господарства, де вимірюються високі температури.

#### **5. Повнота викладення основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях.**

Основні результати, отримані при виконанні дисертаційної роботи О.О. Лопатко достатньо повно опубліковані у 9-ти наукових працях, у тому числі у 5 статтях у науковому фаховому виданні України, яке індексується у міжнародній наукометричній базі даних.

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертаційної роботи.

#### **6. Зауваження до тексту дисертації**

1. Інформація, подана на сторінці 40 у підрозділі 1.5 «Математичні моделі температурного перехідного процесу» фактично є частковим повторенням та витікає з інформації, наведеної на сторінках 21, 22.

2. Формула (2.1) розрахунку середнього значення температури містить суму значень, але відсутній поділ на кількість результатів вимірювань температури об'єкта. Аналогічна помилка присутня на рисунку 2.5.

3. Рисунки 2.5 та 2.6 мають назви «Алгоритм навчання нейронної мережі...», але саме навчання мережі у кожному алгоритмі представлено єдиним блоком «Навчання НМ на масиві навчальних пар». Усі інші блоки алгоритмів та зв'язки між ними описують процес накопичення навчальних пар і саме це повинні відображати назви цих рисунків.

Взагалі, процес створення та навчання нейронних мереж у роботі представлений дуже стисло. Вказано лише, що навчання проводиться за алгоритмом Левенберга-Марквардта, але відсутні подробиці використання цього алгоритму, наприклад, як задаються початкові значення параметрів. На мій погляд було би доцільним надати більш детальний опис процесів створення та навчання нейронних мереж.

4. При дослідженні залежності похибки прогнозування від кількості шарів в мережі використовується середнє значення модулів цієї складової

похибки. На мій погляд, більш коректною та важливою є оцінка максимального за модулем значення похибки.

Також не зрозуміло, чому при визначенні впливу похибок вимірювання на похибку прогнозування використовувалася середнє значення похибки прогнозування чотирьох значень температури (формула (3.9)), а не максимальне значення похибки.

5. Не зрозуміло яким чином задавалися значення випадкової похибки вимірювання - наведені лише граничні значення похибки, але немає інформації про закон розподілу та його параметри. Відповідно, було би доцільним дослідити закон розподілу результатів прогнозування нейронною мережею.

6. Деякі вирази у тексті дисертації сформульовані невдало та можуть мати неоднозначне тлумачення, наприклад:

- стор. 90 «Під час досліджень значення відносної випадкової складової похибки  $\delta_{rand}$  змінювалося від 0,5 % до 2,5 % з кроком 0,5 %» - на мій погляд більш коректним буде «під час досліджень *граничні* значення відносної випадкової складової похибки...»;

- стор. 81 - до формули (3.1) входить параметр температури об'єкту  $T_{OV}$ , але в поясненнях до формули вказана  $T_{max}$  - максимальна вимірювана температура перехідного процесу.

7. Було би доцільним провести більш глибокий аналіз, порівняння з результатами інших досліджень за літературними джерелами та узагальнення деяких з отриманих в роботі результатів, а саме:

- для якого класу завдань оптимальною є двошарова нейронна мережа;  
- з чим пов'язана наявність оптимальної кількості входів нейронної мережі в діапазоні 20...40;

- з чим пов'язана наявність періодичної складової похибки прогнозування температури в залежності від температур об'єкта вимірювання, на яких не навчалась нейронна мережа (рис. 2.19).

Останнє зауваження (п.7) є скоріше побажанням подальших досліджень у вибраному перспективному науковому напрямі.

Наведені зауваження та побажання жодним чином не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи О.О. Лопатко.

## **7. Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.**

Дисертаційна робота Лопатко О.О. «Прогнозування значення температури за перехідним процесом із використанням нейронних мереж», є завершеним науковим дослідженням, що містить отримані особисто здобувачем нові наукові результати, які вирішують важливу науково-прикладну задачу розвитку методу вимірювання високих температур за

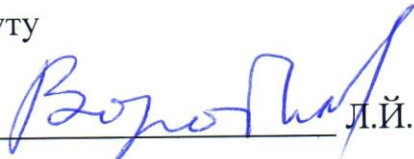
перехідним процесом із використанням нейронної мережі. Запропонований метод дозволяє збільшити термін експлуатації первинних перетворювачів, зменшити час вимірювання температури та розширити допустимий діапазон температури, в якому може застосовуватись конкретний первинний перетворювач.

Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації повністю відображені у наукових статтях, опублікованих у фахових виданнях, та доповідалися на міжнародній та національних наукових конференціях.

Дисертаційна робота Лопатко О.О. відповідає паспорту спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин і профілю спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи Лопатко Ольги Олегівни «Прогнозування значення температури за перехідним процесом із використанням нейронних мереж» можна зробити висновок про те, що за актуальністю розв'язуваного завдання, отриманими науковими результатами і практичною цінністю роботи, вона відповідає пп. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. за № 567 зі змінами, а її авторка, Лопатко О.О., заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, с. н. с.,  
провідний науковий співробітник Інституту  
технічної теплофізики НАН України

  
Л.І. Воробйов

Підпис Воробйова Леоніда Йосиповича  
засвідчую:

Вчений секретар ІТТФ НАН України



К. Т. Н.

  
Р.В. Сергієнко