

## **Відгук**

### **офіційного опонента**

**на дисертаційну роботу Романюка Олександра Сергійовича на тему:  
«Нейромережеве прогнозування нестационарних послідовностей», що  
представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 122– Комп'ютерні науки,  
галузь знань 12 – Інформаційні технології**

#### **1. Актуальність теми**

Тема роботи є високо актуальною оскільки створені нейромережеві моделі, методи їх навчання та оптимізації можуть бути використані для моделювання і прогнозування нестационарних та нелінійних нестационарних фінансово-економічних, екологічних та багатьох інших різновидів процесів, наприклад у сучасних технологіях. Отримані автором результати також придатні для використання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень.

Виходячи з цього, можна зробити висновок про високу актуальність теми дисертаційної роботи Романюка О.С.

#### **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетної теми НДР «Нейро-фаззі системи для поточної кластеризації і класифікації послідовностей даних за умов їх викривленості відсутніми та аномальними спостереженнями» (№ ДР 0113U000361), затвердженої Міністерством освіти і науки України.

#### **3. Ступінь обґрунтованості, і достовірності наукових положень, висновків, сформульованих у дисертації**

Достовірність результатів дисертації забезпечується коректністю постановки задачі дослідження, використанням відомих методів обчислювального інтелекту для прогнозування, зокрема, штучних нейронних мереж, методи робастного оцінювання та методи теорії оптимізації дозволили синтезувати швидкодіючі процедури навчання мереж;

Вхідний № 01/27-89  
" 11 " 02 2022р.

методи імітаційного моделювання дозволили підтвердити ефективність отриманих результатів.

Таким чином можна стверджувати, що вихідні положення дисертації є коректними, отримані результати та висновки аргументовані, достовірність отриманих результатів підтверджується перевіркою функціональності моделей на реальних процесах.

#### **4. Новизна наукових положень і висновків**

В ході роботи сформульовано нові наукові положення і висновки, отримано ряд нових результатів, які мають суттєве значення, а саме:

1. Вперше запропоновано використання для навчання штучної нейронної мережі АДАЛЛНИ в задачі оцінювання параметрів, які описуються марківською моделлю першого порядку, регуляризованих алгоритмів Качмажа та Нагумо-Ноди. Визначено умови збіжності та отримано неасимптотичні оцінки точності цих алгоритмів, що дозволяє встановити потенційно можливий виграш від їх використання.

2. Вперше запропоновано використання в задачах прогнозування комбінованого функціоналу, який складається з критерію четвертого ступеня і модульного, та градієнтну процедуру його мінімізації. Досліджено умови збіжності процедури в середньому і середньоквадратичному. Отримано аналітичні оцінки неасимптотичних та асимптотичних значень помилки оцінювання параметрів моделі та точності її ідентифікації, що забезпечило робастність оцінок шуканих параметрів мережі.

3. Отримав подальший розвиток нейромережевий метод прогнозування який, на відміну від існуючих використовує рекурентну форму 1-крокової проекційної процедури навчання, що дозволило підвищити швидкість навчання штучної нейронної мережі.

4. Удосконалено метод вибору оптимальних значень параметрів процедур навчання, що дозволяє забезпечити максимальну швидкість збіжності процедур і їхню стійкість та попередньо оцінити досліднику можливості та ефективність процедур, які використовуються, під час вирішення практичних завдань.

5. Отримав подальший розвиток метод факторизації 1-крокових процедур навчання штучних нейронних мереж, що дозволило поліпшити їх обчислювальні властивості та підвищити стійкість.

## **5. Практична значимість і шляхи використання результатів**

Результати виконання роботи мають суттєву практичну значимість. Вони можуть бути використані для моделювання і прогнозування нестаціонарних та нелінійних нестаціонарних фінансово-економічних, екологічних, технологічних та багатьох інших різновидів процесів. Отримані автором результати також придатні для використання в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень та навчальному процесі.

## **6. Зміст, завершеність, стиль викладу, публікації, апробація**

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків списку використаних джерел з 140 найменувань та 7 додатків. Оформлення виконано у відповідності до вимог.

У першому розділі. Проведено системний аналіз проблеми прогнозування в різних сферах застосування. Проведений порівняльний аналіз моделей прогнозування дозволив виявити їх переваги та недоліки.

Одними з найбільш ефективних є нейромережеві моделі і методи, основною перевагою яких є нелінійність, тобто здатність встановлювати нелінійні залежності між майбутніми та фактичними значеннями процесів. Іншими важливими перевагами є: адаптивність, масштабованість (паралельна структура ШНМ прискорює обчислення) і однаковість їх аналізу та проектування. Здійснено огляд та аналіз нейромережевих структур, що використовуються для вирішення задач прогнозування. Проаналізовано критерії оцінки роботи нейронної мережі в разі прогнозування. У зв'язку з тим, що на різних наборах даних виходять різні результати оцінок помилок прогнозування, а кожен критерій має недоліки, які можуть призводити до неточного визначення якості прогнозування, неможливо виділити один універсальний критерій. Тому раціональним є використання певного набору метрик помилки. Проаналізовано методи побудови ШНМ для вирішення задачі прогнозування та розглянуто задачі їх структурної та параметричної оптимізації.

У другому розділі розглянуто задачу навчання ШНМ, яка полягає в мінімізації деякої опуклої функції втрат, вибір якої залежить від наявності інформації щодо статистичних властивостей сигналів і завад. В основі процедур навчання зазвичай лежать градієнтні алгоритми мінімізації. Розглянуто найбільш поширені на цей час алгоритми, зокрема РМНК та найбільш швидкодіючий серед однокрокових алгоритм Качмажа (Уїдроу–Хоффа). Розглянуто БШП в якості нейромережевої моделі для прогнозування. Описано процедуру вибору його структури та запропоновано процедуру навчання. Вивчено умови її збіжності та отримано вираз для оптимального значення параметра  $\gamma$ , при якому швидкість збіжності процедури навчання буде максимальною. Досліджено особливості прогнозування нестационарних часових рядів на основі ШНМ АДАЛІНА. У зв'язку з тим, що для навчання АДАЛІНИ використовується алгоритм Качмажа, проведено дослідження його властивостей для оцінювання параметрів, які описуються марківською моделлю першого порядку. Отримано неасимптотичні оцінки точності регуляризованого алгоритму Качмажа. Запропоновано використання для навчання АДАЛІНИ в нестационарному випадку більш простого, ніж алгоритм Качмажа, регуляризованого алгоритму Нагумо-Ноди. Визначено умови його збіжності та отримано неасимптотичні оцінки точності цього алгоритму, які дозволяють встановити потенційно можливий виграш від його використання.

Запропоновано використання для прогнозування нестационарних часових рядів еволюційну ШНМ СМАС, розглянуто формат її хромосоми і відповідність параметрів мережі генам, що зберігаються в хромосомі. Наведено її алгоритм роботи.

У третьому розділі показано, що якщо інформація про приналежність завади  $\xi$  деякому певному класу розподілів є відомою, то шляхом мінімізації оптимального критерію, що представляє собою узятий з оберненим знаком логарифм функції розподілу завади, може бути отримана оцінка максимальної правдоподібності ( $M$ -оцінка). Якщо ж такої інформації немає, то для оцінювання шуканого вектору параметрів  $\theta$  слід застосувати будь-

який неквадратичний критерій, що забезпечує робастність одержуваної оцінки. Одним з таких критеріїв є модульний критерій, що приводить до знакового алгоритму. Іншим підходом до отримання робастних оцінок, позбавлених зазначеного недоліку, є використання комбінованого критерію, заснованого на поєднанні квадратичного і модульного критеріїв більш простим способом, ніж запропонованих Хьюбером і Хемпелем.

Розглянуто особливості робастного навчання на основі мінімізації комбінованих функціоналів, які поєднують квадратичний і модульний критерій, а також запропоновано використання комбінованого функціоналу, що складається з критерію четвертого ступеня та модульного. Визначено умови збіжності градієнтного алгоритму навчання в середньому і середньоквадратичному. Отримано аналітичні оцінки неасимптотичних та асимптотичних значень помилки оцінювання параметрів і точності ідентифікації моделі. Показано, що ці значення помилки оцінювання і точності ідентифікації залежать від вибору параметра змішування. Отримані оцінки є досить загальними і залежать від статистичних характеристик корисних сигналів і завад. Тому для їх практичного застосування слід скористатися оцінками цих параметрів.

Четвертий розділ присвячено оптимізації процедур навчання; розглянуто питання вибору оптимальних параметрів цих процедур. У зв'язку з тим, що метою використання параметра регуляризації  $\delta$  є підвищення обчислювальної стійкості процедур оцінювання, виникає проблема ефективного вибору цього параметра. Як показали результати досліджень, використання регуляризуючої добавки, покращуючи стійкість алгоритмів, призводить до деякого уповільнення процесу побудови моделі. Розглянуто існуючі підходи до вирішення даного питання і запропоновано процедуру рекурентного налаштування параметра регуляризації для навчання АДАЛПНІ. Для зменшення часу навчання мережі, який визначається величиною параметра швидкості навчання  $\gamma$ , розглядалася задача вибору оптимального значення цього параметра, яке забезпечує максимальну швидкість збіжності процедури. Отримано вирази для оптимальних значень

параметрів швидкості навчання для алгоритмів Качмажа та Нагумо-Ноди, які є досить загальними і залежать від статистичних характеристик корисних сигналів і завод. Тому для їх практичного застосування слід скористатися оцінками цих параметрів. Слід зазначити, що ці оцінки дозволяють досліднику при вирішенні практичних завдань попередньо оцінити можливість досліджуваного алгоритму і ефективність його застосування.

У цілому дисертація має логічну структуру, її мова відповідає необхідному науковому рівню викладення результатів дослідження, термінологія використана коректно, стиль ясний та зрозумілий.

Основні положення і наукові результати дисертації досить повно викладено у 18 наукових працях автора за темою дисертації, серед яких з них 6 статей у фахових періодичних виданнях України з технічних наук, 2 розділи у колективних монографіях, 1 стаття у інших виданнях, 9 тез доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій. В роботі зазначений особистий вклад автора у кожную публікацію. Робота відповідає принципам академічної доброчесності щодо відсутності в дисертації та публікаціях академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації.

Дисертація відповідає сучасним вимогам до стилю і оформлення наукового тексту.

## **7. Зауваження по дисертаційній роботі**

1. У першому розділі необхідно дати означення структури математичної моделі, яка будується на основі статистичних/експериментальних даних, і означення прогнозу згідно з теорією оцінювання.

2. Немає обґрунтування чому випадкові похибки утворюють «білий шум» (стор. 36)?

3. Модель експоненціального згладжування не призначена для прогнозування, а для згладжування даних. Результат застосування цієї моделі не відповідає означенню прогнозу.

4. Стор. 43: до недоліків регресійних моделей відносяться «низька адаптивність і відсутність здатності моделювання нелінійних процесів» – це не відповідає дійсності.

5. Стор. 44: Про моделі експоненціального згладжування: «Даний клас моделей частіше інших використовується для довгострокового прогнозування» – це не відповідає дійсності.

6. В роботі зустрічаються орфографічні та синтаксичні помилки («похибки» замість «помилки», «так як» замість «оскільки», «приватні моделі» замість «часткові описи (моделі)» тощо)

## **8. Висновки по роботі**

Подані вище зауваження не знижують загального позитивного враження та оцінки виконаної роботи. Науковий рівень отриманих результатів є високим та відповідає пунктам 10-12 «Тимчасового порядку з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 6 березня 2019 р. № 167 зі змінами.

Вважаю, що дисертаційна робота на здобуття ступеня доктора філософії на тему: «Нейромережеве прогнозування нестационарних послідовностей» являє собою завершене дослідження, у якому одержані нові науково обгрунтовані результати, які у сукупності є подальшим розвитком комп'ютерних технологій, а її автор Романюк Олександр Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки, галузь знань 12 – Інформаційні технології.

### **Офіційний опонент:**

Професор Інституту прикладного системного аналізу

Національного технічного університету України

«КПІ імені Ігоря Сікорського», д.т.н.



Петро Бідюк