

## РЕЦЕНЗІЯ

**офіційного рецензента, доктора технічних наук, доцента,  
доцента кафедри комп'ютерних наук  
навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук  
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича  
УГРИНА Дмитра Ілліча  
на дисертаційну роботу Токарєвої Катерини Анатоліївни  
«Гібридні та ансамблеві методи та моделі машинного навчання  
прогнозування фінансових часових рядів»,  
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 113 «Прикладна математика»  
у галузі знань 11 «Математика та статистика».**

### **Актуальність дисертаційного дослідження.**

Ускладнення наукових систем є невід'ємною частиною розвитку будь-якої галузі знань, включно з математикою та її прикладними аспектами. Розглядаючи теорію часових рядів, найпростіші моделі, такі як авторегресійні (AR) та моделі ковзного середнього (MA), базувалися на припущеннях про гомоскедастичність та незалежність залишків. Ці класичні моделі були зручними для теоретичних міркувань і практичного застосування завдяки простоті оцінювання параметрів. Однак, як зазначили багато дослідників, така простота маловірогідна в реальному світі через неможливість уникнути впливу зовнішніх чинників. У зв'язку з цим, теорія часових рядів зосередилася на комбінованих моделях, де основний процес описується класичними моделями, а додаткові процеси моделюються за допомогою інших математичних підходів. Найпростішим прикладом такої комбінації є моделі ARCH та GARCH, які враховують гетероскедастичність дисперсії  $\sigma_t^2$  основного процесу  $x(t)$ , а також моделі часових рядів, що враховують вплив екзогенних змінних та додаткових процесів. Оцінювання

параметрів таких моделей стало можливим завдяки швидкому розвитку теорії оптимізації, а також зростанню обчислювальних потужностей пересічних користувачів.

Другим кроком для узагальнення класичних моделей часових рядів є використання гібридних моделей. У таких моделях основний процес описується за допомогою певної моделі часового ряду, тоді як залишки можуть моделюватися більш складними математичними підходами. У цій роботі основна увага приділяється випадку, коли для опису залишків використовуються моделі машинного навчання. Як буде показано далі, такий підхід добре себе зарекомендував для задачі прогнозування часових рядів. Для цього були використані кілька основних підкласів нейронних мереж, які найчастіше зустрічаються в літературі для прогнозування часових рядів: рекурентні нейронні мережі (RNN), мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM), нейронні мережі зі зворотним поширенням помилки, мережі Елмана та багат шарові перцептрони. Крім того, для візуалізації багатовимірних даних шляхом конфігурації нейронів з метою квантування або кластеризації вхідного простору в топологічну структуру застосовувалися самоорганізаційні карти Кохонена. Оскільки при використанні відсутнє припущення про те, що одна модель здатна "охопити динаміку" всього часового ряду, здійснено її інтеграцію з адаптивною нейро-нечіткою системою виведення. Ці моделі дозволили достатньо повно описати загальний підхід до побудови гібридних моделей часових рядів на основі нейронних мереж.

Крім випадкових чинників, динамічні системи досить часто зазнають впливу детермінованого хаосу. За наявності детермінованого хаосу, навіть детерміновані процеси можуть демонструвати випадкову поведінку. У зв'язку з цим, у дисертаційній роботі було розроблено підхід до виявлення

хаотичної складової в часовому ряді, що дозволить покращити оцінку прогнозів.

Отже, мета дисертаційної роботи полягає у розробці гібридних моделей на основі нейронних мереж для опису динаміки залишків традиційних моделей часових рядів, а також використанні методів для визначення наявності детермінованого хаосу в системі. Це дозволить зменшити вплив детермінованих чинників на систему.

Іншими словами, в роботі пропонується комбінований підхід, який інтегрує нейронні мережі для моделювання залишків та методи для врахування детермінованого хаосу, спричиненого складною динамікою системи. Такий підхід повинен забезпечити більш точні прогнози завдяки кращому розумінню та опису нелінійної поведінки часових рядів.

### **Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами**

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку, яким займається кафедра прикладної математики та інформаційних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Дослідження, проведені в рамках цієї дисертації, виконувалися в межах науково-дослідної теми кафедри "Математичне моделювання і числово-аналітичні методи дослідження динамічних та інформаційних процесів", яка зареєстрована в державному реєстрі за номером 0102U006591.

Тематика дисертації узгоджується з науковими інтересами кафедри та виконувалася як частина ширшого наукового проєкту, пов'язаного з математичним моделюванням динамічних та інформаційних процесів за допомогою числових та аналітичних методів. Дослідження підтримувалося та проводилося під егідою зазначеної кафедри університету.

## **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Наукові положення, висновки та результати дисертації обґрунтовані за допомогою гібридних і ансамблевих методів та моделей машинного навчання прогнозування фінансових часових рядів.

У роботі ідеї та обчислення подані послідовно та логічно. Велика кількість посилань на наукову літературу дозволяє читачу легко здобути додаткову інформацію про використані математичні та статистичні підходи при розв'язуванні поставлених у дисертації задач. Кваліфікаційне дослідження Токаревої Катерини Анатоліївни включає приклади застосування та порівняння отриманих результатів з класичними підходами на реальних даних. Робота містить багато рисунків, які покращують розуміння та сприйняття отриманих висновків. Результати дисертаційного дослідження, застосовані до реальних даних, узгоджуються із результатами інших науковців, які використовували ті ж дані, але інші підходи до прогнозування фінансових часових рядів. Кваліфікаційне дослідження було представлено в 7 наукових конференціях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації. Основні результати дослідження були опубліковані в дев'яти наукових виданнях, два з яких індексуються в базах даних Scopus та/або Web of Science.

## **Структура дисертації**

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, загальним обсягом 157 сторінок (з них: 117 сторінки основного тексту, 18 сторінок – література). Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів з підрозділами, висновків, списку використаних джерел (158 позицій) та додатку (список публікацій здобувачки за темою дисертації).

## **Наукова новизна**

Результати і висновки дисертації, які становлять наукову новизну, включають наступні аспекти:

- розроблено алгоритм зменшення складності оцінки прогнозу часового ряду із використанням генетичного алгоритму для пошуку початкових значень ваг нейронної мережі;
- розроблено розширену LSTM модель нейронної мережі із врахуванням залежності типу AR;
- розроблено алгоритми оцінки параметрів часового ряду на основі стохастичних диференціальних рівнянь із запізненням та здійснено перехід від непараметричної оптимізаційної задачі до параметричної оптимізаційної задачі пошуку коефіцієнтів часового ряду або відповідного стохастичного диференціального рівняння.

## **Практичне значення отриманих результатів**

Результати дисертаційної роботи є вагомим внеском у розвиток теорії часових рядів та побудови гібридних алгоритмів. Розроблені та апробовані запропоновані алгоритми можуть використовуватися для подальших досліджень у цій галузі, адже на сьогодні немає універсального способу побудови прогнозу часових рядів, зокрема фінансових. Цю проблему поставлено в дисертаційній роботі, простежено, що розроблені генетичні алгоритми оцінки прогнозу часового ряду дають кращі результати порівняно з існуючими класичними алгоритмами як для реальних задач, так і для класичних теоретичних динамічних систем.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблений гібридні системи можуть бути використані в прогностичних системах для аналізу фінансових ринків з метою побудови більш чітких прогнозів.

**До зауважень та побажань слід віднести наступне:**

1. Робота містить окремі неточності в оформленні роботи та зустрічаються деякі граматичні помилки;
2. Частина пункту 2.1 можна було б перенести до першого розділу, оскільки багато уваги було приділено аналізу загально відомого моделі ARIMA.
3. Не повністю розкрито особливості порівняння характеристик «Рис. 2.2 Автокореляційна функція (ACF) та частинна автокореляційна функція (PACF)»
4. Результати побудови ARIMA-моделі, що наведено в Табл. 2.1, Табл. 2.2. Оцінка прогнозу моделлю ARIMA та гібридною моделлю, Табл. 2.3. Оцінка прогнозу за гібридною моделлю ARIMA та рекурентної нейронної мережі є незрозумілими і потребують доопрацювання.
5. В дисертації двічі повторюється один рисунок під різними номерами і назвами: Рис. 2.3. Тестові та прогнози значення оцінені з допомогою ARIMA (зверху) та гібридної моделі (знизу) та Рис. 2.6. Тестові та прогнози значення оцінені з допомогою гібридної моделі.
6. У дослідженні теоретично доведено, але практично на тестах не продемонстровано, що часові ряди із явною періодичною залежністю погано оцінюються за допомогою класичної LSTM нейронної мережі, проте дана проблема вирішується на основі узагальненої моделі.
7. У роботі варто було б приділити більше уваги реальним прикладним задачам.

Висловлені зауваження не применшують наукові досягнення дисертації Токаревої К. А. та не впливають на висновок про належний рівень дослідження і його загальну позитивну оцінку.

## Загальний висновок

Дисертаційна робота Токарєвої Катерини Анатоліївни «Гібридні та ансамблеві методи та моделі машинного навчання прогнозування фінансових часових рядів», є завершеним науковим дослідженням, яке за актуальністю, науково-технічним рівнем, новизною постановки та розв'язання проблем, практичним значенням отриманих результатів відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 (із змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №341 від 21.03.2022 р. та №502 від 19.05.2023), а її авторка Токарєва К. А. заслуговує на присудження їй ступеня доктора філософії у галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

Рецензент

доктор технічних наук, доцент,

доцент кафедри комп'ютерних наук


навчально-наукового інституту

фізико-технічних та комп'ютерних наук

Чернівецького національного університету

імені Юрія Федьковича

 Дмитро УГРИН

Підпис  засвідчую  
Учений секретар Чернівецького національного  
університету імені Юрія Федьковича  
" 01 " травня 2024 р.

