

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара
доктору фізико-математичних наук, професору,
в.о. проректора ДНУ імені Олеся Гончара
з науково-педагогічної роботи
Гук Наталії Анатоліївни

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента Зайцева Вадима Григоровича,
кандидата фізико-математичних наук, доцента,
доцента кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
на дисертаційну роботу

Інкін Олександра Андрійовича
«Застосування нейромережевого моделювання для діагностики
епілепсії за ритмами електроенцефалограм»

подану на здобуття ступеня доктора філософії
у галузі знань 11 Математика та статистика
зі спеціальності 113 Прикладна математика

Дисертаційна робота Інкін Олександра Андрійовича присвячена дослідженню проблеми діагностики епілепсії за ритмами електроенцефалограм за допомогою нового інструментарію, пов'язаного з використанням так званих систем нейронних сингулярних звичайних диференціальних рівнянь (NSODE systems).

В першому розділі роботи проведено всебічне дослідження сучасних підходів до обробки електроенцефалографічних сигналів (ЕЕГ) та їх класифікації з використанням методів глибокого навчання, включаючи критичний аналіз переваг та обмежень існуючих алгоритмів, дається огляд досліджень за обраною тематикою.

Основою всього дослідження є математичне моделювання ЕЕГ сигналів, як розв'язків деякої динамічної системи, що описується за допомогою диференціальних рівнянь. Найчастіше простота чи складність такої математичної моделі пов'язані з тим, скільки до неї входить параметрів, які враховують ті чи інші особливості об'єкта. Значення параметрів характеризують властивості даного конкретного об'єкта. Чим більше параметрів входить у модель, тим докладніше вдається охарактеризувати і тим точніше описати поведінку системи.

Розділ завершується підсумком, що узагальнює проаналізовану літературу та формує базу для подальшого дослідження в галузі прогнозування мозкової активності за допомогою методів обробки сигналів та штучного інтелекту.

У другому розділі досліджуються якісні властивості деяких конкретних математичних моделей: Фітц-Хью-Нагумо (2.1), Лоренца (2.2) та комбінованої моделі (2.3), які використовуються для опису ЕЕГ сигналів. Оскільки процес моделювання сигналу є динамічним процесом, який відбувається у реальному часі і має, як правило, хаотичну поведінку, то основна увага автором приділяється методам дослідження і прогнозування хаотичних процесів. За основу в роботі обирається метод часових рядів. Суть цього методу полягає в тому, що спочатку (в певні моменти часу) фіксуються спостережувані змінні, за допомогою яких описується динаміка досліджуваного процесу. Поведінка в часі таких змінних утворює відповідні часові ряди.

Зазвичай дослідження поведінки часових рядів базується на методах теорії ймовірності та математичної статистики. Проте технології аналізу даних, які використовують статистичні підходи, мають ряд недоліків. Зокрема, такі методи, як правило, ґрунтуються на усереднених показниках, за якими важко з'ясувати реальну поведінку систем в окремо взяті моменти часу. Крім того, стандартні статистичні методи зазвичай нехтують спостереженнями, які виходять за рамки статистично надійних: піками, аномальними відхиленнями і т. п. Разом з тим, саме така поведінка часових рядів може бути вирішальною для прогнозування подальшої динаміки електричних сигналів в корі головного мозку. Виходячи з наведеного, автор надає перевагу залученню нових методів дослідження, які б базувалися на нелінійній динаміці, теорії катастроф та інформаційних технологіях інтелектуального аналізу даних (Data Mining).

Зауважимо, що в задачі вивчення захворювань мозку ЕЕГ-ритми описують часовий ряд, який має хаотичну поведінку. Поширеною практикою в аналізі хаотичних часових рядів є реконструкція фазового простору за допомогою методу вбудовування координат затримки, а потім обчислення динамічних інваріантних величин, таких як нестабільні періодичні орбіти, фрактальна розмірність базової хаотичної множини та її спектр Ляпунова. Оскільки існує велика кількість публікацій щодо застосування методу часових рядів для вивчення хаотичних процесів, відносно невивченим питанням є його застосування до систем диференціальних рівнянь, що залежать від параметрів. Наша увага буде зосереджена на аналізі впливу параметрів знайденої динамічної системи на поведінку її розв'язків. Ці параметри визначаються структурою часового ряду та вибором апроксимуючих функцій у правих частинах отриманої системи диференціальних рівнянь. Для створення моделі шляхом вимірювання змінних, що характеризують будь-який динамічний процес, необхідно вирішити наступні три основні проблеми.

Зазвичай, неперервний динамічний процес описується за допомогою системи диференціальних рівнянь. Це зауваження призводить до першої проблеми.

1. Необхідно встановити тип функцій у правих частинах диференціальних рівнянь, які найбільше відповідають опису процесів, представлених на електроенцефалограмах.

Відомо, що будь-який динамічний процес залежить від багатьох змінних. Більшість цих змінних є функціями деякої невеликої кількості незалежних змінних. Ідентифікація цих незалежних змінних призводить до другої задачі.

2. Визначити розмірність фазового простору, в якому відбувається досліджуваний процес.

I, нарешті, залишається третя проблема.

3. Після того, як встановлено структуру диференціальних рівнянь, що описують динамічний процес, необхідно визначити числові значення коефіцієнтів цих рівнянь.

До основних результатів другого розділу варто віднести запропоновану автором математичну модель у формі певної системи звичайних диференціальних рівнянь, а також використання квадратичних та кубічних активаційних функцій для моделювання процесу поведінки електричного сигналу. Автором також отримано низку нових результатів стосовно дослідження якісної поведінки запропонованого класу динамічних систем.

У третьому розділі досліджуються властивості конкретної системи диференціальних рівнянь (3.10) (це NSODE система). Тут встановлюються достатні умови існування обмежених розв'язків цієї систем при будь-яких початкових умовах. В подальшому система (3.10) зводиться до більш простої системи (3.34), за допомогою якої і проводяться прогнози поведінки ритмів ЕЕГ.

Розділ розкриває методологію прогнозування та класифікації різних станів мозкової активності на основі ЕЕГ сигналів, описує математичні передумови та теоретичні основи запропонованого підходу. Особлива увага приділяється методам коригування параметрів моделі через моделювання часових рядів, отриманих на основі експериментальних ЕЕГ даних, що дозволяє адаптувати модель до реальних характеристик нейронної активності. Детально представлено алгоритм оптимізації моделей ЕЕГ, який забезпечує підвищення точності прогнозування, а також результати числового експерименту, що демонструють ефективність розробленого підходу. Завершується розділ практичними прикладами застосування моделі для прогнозування епілептичних нападів на основі інформації, що міститься в ЕЕГ сигналах.

До основних результатів даної дисертаційної роботи я би відніс такі:

1. Запропонована нова модель для апроксимації та прогнозування одновимірних нестационарних часових рядів за допомогою системи нейронних сингулярних диференціальних рівнянь (3.34), а також теореми про обмеженість розв'язків таких систем. При цьому вказуються області значень основних параметрів, в яких в системі виникає хаотична поведінка.
2. Досліджено запропоновану систему нейронних диференціальних рівнянь і показано її суттєву відмінність від класичних моделей. Саме ця обставина дозволила виявити існування досі невідомої хаотичної поведінки системи, яка не могла бути згенерованою за допомогою класичних моделей.
3. Розроблена модель прогнозування епілептичних нападів демонструє чітку диференціацію параметрів для трьох клінічних сценаріїв, де основні коефіцієнти змінюються від стабільно низьких значень у здорових пацієнтів до проміжних значень під час прогнозування нападів та критично змінних під час іктального епізоду, що відображає перехід від нормальної нейронної активності до високочастотної епілептичної дезорганізації.

Вважаю, що всі отримані в роботі результати є новими та оригінальними. Вони можуть знайти своє застосування не лише в проблемі діагностики, але і в багатьох інших задачах (наприклад, при моделюванні зміни погоди чи процесів еволюції біологічних популяцій), де аналіз та дослідження часових рядів є першочерговим завданням. Головні результати дисертаційної роботи були опубліковані у фаховому математичному журналі «Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications» (квартиль Q3). Результати роботи неодноразово доповідались на семінарах і конференціях. Дисертація оформлена у відповідності до вимог, які висуваються до робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Порухень академічної доброчесності у дисертації та наукових працях О.А. Інкіна я не виявив.

Разом з тим за матеріалами дисертації є певні зауваження та побажання.

1. При розробці нейромережових моделей вагому роль відіграє швидкість налаштування (або тренування) таких моделей. Проте в дисертаційній роботі автор ніде не наводить жодних даних щодо згаданої швидкості налаштування запропонованих моделей.
2. Як відомо, при побудові будь-якої моделі, визначальним фактором є її перевірка на адекватність та точність відтворення бажаного сигналу. Для цього існує багато напрацьованих метрик таких як нарахування коефіцієнта Пірсона, метрика PSNR чи популярна нині метрика структурної подібності SSIM. У випадку моделі, яку пропонує автор даної роботи, її адекватність суттєво залежить від багатьох факторів, включаючи вибір параметрів впливу, їх налаштування та конструювання моделі сингулярності в

знаменниках системи (3.34) (або в знаменниках системи (3.10)). Проте дослідженню проблеми адекватності, включаючи аналіз чутливості моделі до обраних параметрів впливу, приділено недостатньо уваги.

3. Хотілося б побачити в роботі більш детальне обґрунтування методології вибору в запропонованих моделях інших активаційних функцій, крім лінійних, квадратичних та кубічних.

Попри наведені зауваження, я вважаю, що дана дисертація відповідає всім вимогам, які затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40. Основні результати пройшли достатню апробацію, а отримані в дисертаційній роботі наукові результати є новими, та мають важливе практичне значення.

Виходячи з наведеного, вважаю, що дисертаційне дослідження Інкіна О.А. відповідає вимогам "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, а її автор -- Інкін О.А. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії.

Рецензент,
кандидат фізико-математичних наук, доцент
кафедри комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету
ім. О. Гончара



Вадим ЗАЙЦЕВ

Підпис доц. Зайцева Вадима Григоровича засвідчую:



Тетяна ХОДАНЕН