

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 Байбуза Олега Григоровича,
доктора технічних наук, професора,
професора кафедри математичного забезпечення електронних обчислювальних
машин 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 прогнозування та виявлення епілепсії на електроенцефалограмі головного мозку за допомогою нового інструментарію, пов'язаного з використанням систем нейронних звичайних диференціальних рівнянь та нейромережевим моделюванням.

В першому розділі дисертаційної роботи розглянуто предметну область дослідження та проаналізовано основні напрями попередніх наукових праць, присвячених моделюванню й обробці електроенцефалографічних сигналів для задач діагностики епілепсії. Основну увагу зосереджено на сучасних підходах до моделювання ЕЕГ-сигналів, методах математичного опису нейронної активності, засобах попередньої обробки та аналізу сигналів, а також на застосуванні нейромережевих архітектур для прогнозування та класифікації епілептичних станів. Розділ формує теоретичну основу дослідження та обґрунтовує вибір методів, використаних у подальших частинах роботи.

В другому розділі дисертаційної роботи автор детально досліджує методи аналізу та прогнозування електроенцефалографічних сигналів у задачі діагностики епілепсії на основі реальних даних пацієнтів. Важливою перевагою розділу є його прикладна спрямованість, оскільки в ньому не лише розглядаються теоретичні підходи до аналізу ЕЕГ, а й демонструється їх використання для обробки клінічних даних. На початку розділу наведено опис та обробку експериментальних даних, виконано попередній аналіз часових рядів ЕЕГ та застосовано елементи

спектрального аналізу, зокрема дослідження спектра потужності, що дозволяє виявити характерні частотні особливості сигналів і встановити їх діагностичну значущість для виявлення епілептичної активності.

Суттєве місце у розділі посідає порівняння математичних моделей динаміки, за допомогою яких моделюється поведінка ЕЕГ-сигналу. Автор не обмежується лише описом відомих підходів, а показує їх здатність відтворювати складну нелінійну структуру біомедичного сигналу. Зокрема, у розділі розглянуто модель Фіц'ю–Нагумо, записану у вигляді формули (2.1), яка є однією з базових моделей збудливих систем і дозволяє описувати динаміку нейронної активності. Також наведено систему Лоренца у формі (2.2), яка використовується як класичний приклад нелінійної динамічної системи з хаотичною поведінкою. Важливим є те, що автор не лише аналізує ці моделі окремо, а й пропонує їх поєднання у вигляді моделі (2.3), використовуючи таку комбінацію для моделювання ЕЕГ-сигналів та відтворення характерних режимів їх зміни у часі. Такий підхід свідчить про прагнення автора врахувати складну природу електричної активності мозку, яка поєднує ознаки нелінійності, стохастичності та хаотичної поведінки.

Окрему увагу в другому розділі приділено нейромережевому прогнозуванню ЕЕГ-сигналів. Для цього автором побудовано LSTM-модель, яка використовується для аналізу часових залежностей у сигналі та прогнозування його подальшої поведінки. При цьому відзначається, що в моделі застосовано гіперболічний тангенс як функцію активації, а також введено гаусівський шум і синусоїдний доданок, що дозволяє краще враховувати як випадкові коливання, так і періодичні компоненти досліджуваного сигналу. Така модифікація LSTM-моделі є обґрунтованою в контексті дослідження ЕЕГ, оскільки реальні електроенцефалографічні сигнали є складними, нерегулярними та водночас містять окремі ритмічні складові.

Позитивною рисою розділу є те, що автор не обмежується лише базовою архітектурою LSTM, а розглядає також її сучасні інтерпретації та розширення, зокрема TPA-LSTM, LSTNet та DARNN. У роботі показано особливості цих моделей, їх відмінності та можливості застосування для аналізу і прогнозування часових рядів ЕЕГ. Це істотно підсилює наукову цінність розділу, оскільки дозволяє порівняти класичні та більш сучасні нейромережеві підходи до роботи з багатовимірними часовими даними та оцінити доцільність їх використання в задачах медичної діагностики.

Важливим науковим результатом другого розділу є також розробка автором власної математичної моделі у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь, поданої формулою (2.5). Подальше розгортання цієї моделі у вигляді співвідношень (2.6) свідчить про детальне опрацювання її структури та намагання автора побудувати більш гнучкий інструмент для опису динаміки ЕЕГ-сигналів. Окремо слід відзначити, що у розділі описано алгоритм визначення параметрів цієї моделі, що має важливе значення для її практичного використання. Саме наявність алгоритмічного апарату налаштування параметрів дає змогу перейти від суто

теоретичного опису до реального моделювання та адаптації системи до конкретних даних пацієнтів.

Особливої уваги заслуговує запропоноване автором поєднання побудованої системи звичайних диференціальних рівнянь із LSTM-моделлю. Такий підхід є методично цінним, оскільки поєднує переваги двох різних напрямів: з одного боку, диференціальні рівняння дозволяють описати внутрішню динаміку процесу та його нелінійну природу, а з іншого — LSTM-мережа забезпечує ефективне врахування часових залежностей, прихованих закономірностей і варіативності сигналу. У результаті формується комплексна модель, здатна не лише описувати, але й прогнозувати поведінку ЕЕГ-сигналів, що є надзвичайно важливим у задачах раннього виявлення патологічної активності, пов'язаної з епілепсією.

Таким чином, другий розділ дисертаційної роботи є змістовним, логічно побудованим і добре аргументованим. У ньому вдало поєднано аналіз реальних клінічних даних, спектральні методи дослідження, порівняння відомих математичних моделей, побудову та аналіз сучасних нейромережових архітектур, а також розробку власної математичної моделі у вигляді системи рівнянь (2.5)–(2.6) з подальшим її поєднанням із LSTM. Це дозволяє зробити висновок, що розділ має не лише теоретичне, а й вагоме практичне значення для створення ефективних засобів діагностики епілепсії за ритмами електроенцефалограм.

В третьому розділі дисертаційної роботи автором розглянуто побудову та теоретичне обґрунтування математичної моделі для аналізу й моделювання електроенцефалографічних сигналів на основі нейромережового підходу та систем звичайних диференціальних рівнянь. Відправною точкою дослідження є опис залишкової нейронної мережі ResNet у вигляді рівняння (3.1). Важливо, що автор не обмежується дискретною постановкою моделі, а здійснює її подальше узагальнення, переходячи до неперервного опису. Такий підхід дозволяє розглядати еволюцію сигналу ЕЕГ у вигляді динамічного процесу, що є цілком природним для задач аналізу біомедичних часових рядів.

У розділі показано, що на основі введених перетворень ResNet-модель може бути подана у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь. Зокрема, після введення відповідних векторних функцій (3.3) та співвідношення (3.4) отримано дискретно-неперервний перехід до рівняння (3.5), яке далі узагальнюється у формі (3.6). При цьому автор послідовно демонструє логіку переходу від дискретної архітектури нейронної мережі до неперервної системи, що є важливою методичною перевагою роботи. Такий підхід дозволяє використовувати апарат теорії диференціальних рівнянь для дослідження властивостей нейромережових моделей та їх придатності до опису складної динаміки ЕЕГ-сигналів.

Суттєвою частиною розділу є аналіз коректності побудованої системи. Автор обґрунтовано звертає увагу на те, що в системі (3.6) знаменник може набувати нульових значень, унаслідок чого модель потребує додаткової модифікації. Для усунення цього недоліку використано тотожне перетворення (3.7) та введено

параметр регуляризації у співвідношенні (3.8). У результаті отримано модифіковану систему (3.9), яка вже позбавлена вказаної некоректності та може використовуватися як математично обґрунтована модель для подальшого аналізу. Саме ця система є одним із ключових результатів розділу, оскільки вона забезпечує більш стійкий та коректний опис нелінійної динаміки досліджуваних сигналів.

Надалі система (3.9) подається у вигляді (3.10) як система NSODE, що дозволяє інтерпретувати побудовану модель у межах сучасного підходу нейронних звичайних диференціальних рівнянь. Така постановка є особливо цінною, оскільки поєднує класичні ідеї динамічних систем із сучасними методами глибокого навчання. У контексті задачі діагностики епілепсії це відкриває можливість будувати моделі, які не лише апроксимують часові ряди ЕЕГ, а й враховують їх внутрішню нелінійну структуру та особливості еволюції в часі.

Позитивною рисою третього розділу є те, що автор не обмежується лише побудовою моделі, а подає також перелік теорем із доведеннями, спрямованими на обґрунтування коректності вибраної системи та її пристосованості до моделювання електроенцефалографічних сигналів. Такий підхід свідчить про належний рівень математичної строгості дослідження. Наявність теоретичного обґрунтування дозволяє вважати, що запропонована система не є лише евристичною конструкцією, а має достатню математичну базу для застосування в задачах аналізу складних біомедичних сигналів.

Особливої уваги заслуговує розроблений у розділі алгоритм пошуку оптимальної кількості параметрів моделі та їх числових значень. Для цього автор використовує комплексний підхід, що поєднує рекурентний аналіз, функції помилок, SVD-розкладання та дослідження матриці Якобі. Таке поєднання методів є цілком виправданим, оскільки дає змогу, з одного боку, оцінити внутрішню геометрію та структуру часових рядів ЕЕГ, а з іншого — забезпечити належну ідентифікацію параметрів моделі та контроль її чутливості до зміни станів системи. Використання SVD-розкладання сприяє аналізу структури даних і зменшенню надлишковості, а застосування Якобіана дозволяє оцінити локальні властивості динаміки системи та стабільність побудованої моделі.

Важливим досягненням розділу є також те, що автор подає повну схему оптимізації та формалізує її у вигляді алгоритму 1. Це істотно підвищує практичну цінність роботи, оскільки запропонований підхід стає відтворюваним і придатним для подальшої реалізації в обчислювальних експериментах. Фактично, у третьому розділі здійснено перехід від концептуального опису моделі до створення цілісної процедури її налаштування та застосування до реальних ЕЕГ-даних.

Таким чином, у третьому розділі автором послідовно здійснено перехід від залишкової нейронної мережі ResNet, заданої рівнянням (3.1), до системи звичайних диференціальних рівнянь (3.9) та її подання у формі NSODE у співвідношенні (3.10). Важливо, що цей перехід супроводжується не лише математичними перетвореннями (3.3)–(3.8), а й належним теоретичним обґрунтуванням, а також побудовою

алгоритму оптимізації параметрів моделі. Усе це свідчить про високий рівень опрацювання матеріалу, логічну завершеність розділу та його вагоме значення для розв'язання задачі моделювання й аналізу ЕЕГ-сигналів у контексті діагностики епілепсії.

Треба відзначити, що всі отримані в роботі результати є новими. Вони можуть знайти своє застосування не тільки в проблемі прогнозування епілепсії, але і в багатьох інших проблемах (наприклад, моделювання хвороб мозку людини або процесів розмноження 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». Результати роботи доповідались на семінарах і конференціях. Дисертація оформлена у відповідності до вимог, які висуваються до робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Поршень академічної доброчесності у дисертації та наукових працях О.А. Інкіна я не виявив.

Разом з тим по дисертації є деякі зауваження.

1. При розробці нейромережових моделей одного або іншого процесу вагому роль відіграє швидкість налаштування (або тренування) моделей. У своїй роботі автор ніде не проводить дослідження швидкості налаштування моделей з різними активаційними функціями для одного і того ж динамічного процесу.
2. Як відомо, при побудові будь-якої моделі, адекватність моделі і процесу суттєво залежить від розмірності простору вкладення. Єдине, про що згадує автор, так це те, що ця розмірність задовольняє умовам теореми Такенса. Але ця теорема дає значення нижньої границі розмірності і нічого не говорить про реальну розмірність простору вкладення для даного процесу.

Попри зазначені зауваження, я вважаю, що дисертація має високий науковий рівень і заслуговує на високу оцінку, а її автор, Інкін О.А., заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії.

Рецензент,

доктор технічних наук, професор

кафедри математичного забезпечення

електронних обчислювальних машин

Дніпровського національного університету

ім. О. Гончара

Підпис проф. Байбуза Олега Григоровича засвідчую:

Олег БАЙБУЗ

Тетяна ХОДАНЕН



Олег Маренков