

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

В І Д Г У К

офіційного опонента Мороза Бориса Івановича,
доктора технічних наук, професора кафедри програмного забезпечення
комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська
політехніка»

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 за спеціальністю 113 Прикладна математика

Дисертаційна робота Інкін Олександра Андрійовича присвячена дослідженню методів аналізу ЕЕГ-сигналів та математичному моделюванню поведінки електричних потенціалів мозку з метою прогнозування епілептичних сценаріїв, що ґрунтується на побудові керування для систем звичайних диференціальних рівнянь та інтерпретації їх траєкторій. Проблема попереднього виявлення епілепсії є популярним напрямком досліджень, в якому було розроблена велика кількість моделей і методів, що забезпечують попереднє виявлення епілептогенезу із певною ефективністю, в межах попередньо визначених мір. Такі моделі зазвичай побудовані або на базі класичних підходів математичного моделювання з різнорівневою локалізацією або за допомогою глибоких нейромережевих моделей різноманітних архітектур. Не зважаючи на це, підхід, запропонований здобувачем у дисертації є новітнім та малодослідженим, а отже і тема дисертаційного дослідження є актуальною та перспективною.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, наведено чітке визначення предмета та об'єкта дослідження, охарактеризовано взаємозв'язок дисертаційної роботи з відповідними науковими програмами та темами. Підкреслено наукову новизну, сформульовано мету дослідження, визначено його практичне значення, окреслено особистий внесок здобувача в розвиток теми та наведено інформацію про апробацію отриманих результатів у наукових колах.

У **першому розділі** дисертаційної роботи наведено огляд предметної області та попередніх досліджень, присвячених моделюванню й аналізу електроенцефалографічних сигналів. Розглянуто основні підходи до моделювання ЕЕГ, зокрема континуальні, стохастичні, біофізичні, мережеві моделі, моделі нейронних мас і підходи, пов'язані з колективною самоорганізацією. Також висвітлено математичні методи опису ЕЕГ-сигналів, методи попередньої обробки та сучасні нейромережеві підходи до прогнозування і діагностики. Розділ логічно структурований і формує підґрунтя для подальшого розгляду задач прогнозування ЕЕГ-станів.

У **другому розділі** дисертаційної роботи аспірантом розглянуто методи аналізу та прогнозування ЕЕГ-сигналів із поєднанням класичних засобів обробки часових рядів і сучасних нейромережевих підходів. Подано етапи автоматизації обробки ЕЕГ, включаючи опис і підготовку даних, а також використання елементів спектрального аналізу. Проведено порівняльний аналіз математичних моделей динаміки щодо їх придатності до опису ЕЕГ-сигналів. Окремо розглянуто LSTM-архітектури DARNN, LSTNet та TPA-LSTM і наведено їх порівняння за точністю та обчислювальною складністю. Також у розділі представлено комбіновану модель FHN–Лоренца, інструмент налаштування її параметрів і результати моделювання. Крім того, наведено алгоритм налаштування параметрів із використанням системи звичайних диференціальних рівнянь у поєднанні з LSTM-підходом.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи викладено підхід до побудови моделі електроенцефалографічних сигналів у класі нейронних сингулярних звичайних диференціальних рівнянь. Розгляд починається з апарату залишкових нейронних мереж типу ResNet і далі послідовно переходить до безперервного опису динаміки у вигляді системи NSODE. У розділі наведено теоретичні положення та математичні перетворення, на основі яких отримано кінцевий вигляд системи рівнянь для моделювання ЕЕГ-сигналів.

Окрему увагу приділено реконструкції прихованих змінних динамічного процесу на основі спостережуваних часових рядів. У цьому зв'язку розглянуто питання визначення розмірності простору вкладення та часової затримки, що

використовується при побудові моделі. Такий підхід покладено в основу подальшої формалізації системи нейронних сингулярних диференціальних рівнянь.

У розділі також наведено повний алгоритм визначення параметрів моделі та їх подальшого корегування. Описано формування вектора невідомих параметрів, побудову часових рядів і числових похідних, запис моделі у різницевій формі, обчислення векторів похибок, побудову матриці Якобі та ітераційну процедуру уточнення параметрів. Окремо подано постановку задачі оцінювання параметрів у вигляді задачі нелінійної оптимізації методом найменших квадратів із використанням регуляризації. Також розглянуто застосування SVD-розкладу для обчислення псевдооберненого оператора в процедурі оновлення параметрів.

Крім аналітичного виведення моделі, у третьому розділі наведено схематичне подання основних етапів побудови та налаштування системи, що відображає послідовність переходу від часового ряду ЕЕГ до параметризованої моделі. Таким чином, розділ охоплює як теоретичне виведення системи NSODE, так і алгоритмічні засоби її параметричної ідентифікації.

У **четвертому розділі** наведено результати числового дослідження розроблених моделей і методів аналізу ЕЕГ-сигналів. Подано результати обчислювальних експериментів щодо збіжності алгоритму, вибору розмірності простору вкладення, точності відтворення часових рядів та ефективності багатоканального аналізу. Наведено оцінки параметрів моделей для різних типів вхідних даних, а також результати моделювання для сценаріїв, пов'язаних із нормальним станом, прогнозуванням епілептичного нападу та виявленням аномальної активності. Отримані результати використовуються для експериментальної перевірки запропонованого підходу до моделювання та аналізу електроенцефалографічних сигналів.

В загальних висновках здобувач резюмує проведену роботу, наводить свої основні досягнення та результати дисертації, та перераховує напрями для подальших досліджень.

До ключових результатів дисертації належать:

1. Розв'язання актуальної науково-прикладної задачі розроблення методів аналізу та прогнозування епілептичних станів на основі ЕЕГ-сигналів.
2. Розроблення нової математичної моделі типу NSODE, для якої сформовано належне теоретичне підґрунтя та доведено відповідні положення, що обґрунтовують можливість її застосування у задачах прогнозування епілепсії.

Результати дисертації опубліковано у чотирьох статтях, одна з яких у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, а три — у

аукових фахових виданнях України категорії Б, а також опубліковано 7 тез наукових конференцій. Особистий внесок здобувача в усіх публікаціях є істотним.

Робота виконана якісно та є завершеною. Теоретичним результатом роботи є нова модель для прогнозування епілепсії, а практичним — програмний продукт, що її реалізує. Оформлення роботи відповідає правилам оформлення дисертацій, а матеріал викладено послідовно та логічно. Усі необхідні для розуміння тексту терміни та поняття розкриті у повному обсязі.

Проте до роботи є декілька зауважень:

1. У роботі недостатньо повно розкрито окремі аспекти теорії автоматичного керування, зокрема питання стійкості, спостережуваності та чутливості запропонованої динамічної моделі до параметричних змін і зовнішніх збурень.
2. Практична цінність роботи могла б бути підсилена більш розгорнутим аналізом перспектив застосування запропонованого підходу в системах підтримки прийняття рішень або в задачах синтезу інтелектуальних систем керування. Принципових помилок або суттєвих недоліків у дисертації немає.

Враховуючи все сказане вище, вважаю дисертацію Інкіна Олександра Андрійовича за темою «Застосування нейромережевого моделювання для діагностики епілепсії за ритмами електроенцефалограм» такою, що відповідає спеціальності 113 Прикладна математика та вимогам, наведеним в «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 Олександр Андрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор
кафедри програмного забезпечення
комп'ютерних систем

Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»

Підпис Мороза
засвідчую:
вчений секретар
Вченої ради
Касюк




Борис МОРОЗ