

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Зайченко Юрія Петровича на дисертаційну роботу Чернодуба А.М.

«Навчання динамічних нейронних мереж на задачах довгострокового прогнозування», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту

Актуальність теми. Пришвидшення життя, спричинене розвитком інформаційних технологій, призводить до зменшення термінів життєвого циклу продуктів і сервісів. За таких умов часто стає неможливим або конкурентно не вигідним використання класичних методів побудови алгоритмів для прогнозування процесів та керування приладами, що полягають в тотальному осмисленні цільової задачі та розробці методів для її вирішення на основі цього розуміння. На перший план виходять методи автоматичного виявлення закономірностей та синтезу алгоритмів розпізнавання, прогнозування та управління на основі наявних емпіричних даних, серед яких важливе місце займають штучні нейронні мережі.

Динамічні нейронні мережі є різновидом штучних нейронних мереж, що використовуються для вирішення задач, пов'язаних з обробкою послідовностей. Це, наприклад, задачі прогнозування часових рядів для вирішення фізичних та економічних задач, розпізнавання мовних команд та обробки аудіо-сигналів, обробка текстів, ідентифікація та управління динамічними об'єктами. Незважаючи на те, що для кожної кожній з цих предметних областей існують свої спеціалізовані методи для вирішення задач, наприклад, методи ARMA, ARIMA, Вох-Jenkins для прогнозування часових рядів, приховані марковські моделі для розпізнавання мовних команд або ПД-контролери для керування динамічними об'єктами, нейромережеві методи в багатьох випадках випереджають за точністю

роботи і зручністю використання інші популярні методи за рахунок своєї нелінійної природи та універсальності.

Серед найбільш значних проблем навчання динамічних нейромереж, що критично впливає на точність їх роботи, є проблема виявлення довгострокових причинно-наслідкових залежностей в даних. Довгострокові залежності в модельованих процесах потребують формування всередині нейромереж довготривалої пам'яті, що одночасно є складною задачею для динамічних нейромереж з лініями затримки і для рекурентних нейромереж. Особливо сильно це відчувається при моделюванні нейромережами динамічних об'єктів, що мають невідому внутрішню структуру з нелінійними внутрішніми і зовнішніми зворотними зв'язками.

Це зумовлює **актуальність наукової задачі** розробки методів навчання динамічних нейромереж на основі багат шарового перцептрона для ефективного навчання довгостроковим залежностям в даних для систем штучного інтелекту, де застосовують динамічні нейронні мережі.

Основні наукові результати, отримані здобувачем:

1. Проаналізовано існуючі топології архітектури динамічних нейронних мереж на базі багат шарового перцептрона, методів їх навчання для вирішення задач прогнозування та методів їх застосування для управління динамічними об'єктами. Серед найбільш значних проблем використання динамічних нейромереж, на думку автора, є наступні питання. Для рекурентних нейромереж це відомий "ефект зникнення градієнтів". При навчанні нейромереж з великою кількістю шарів нейронів градієнт похибки експоненціально зростає або падає разом з кількістю шарів, через які його було пропущено назад під час виконання процедури зворотного поширення. Для рекурентних нейромереж це призводить до унеможливлення виявлення довгострокових залежностей у даних. Для динамічних нейромереж з затримками на вході – необхідність структурної ідентифікації динамічних процесів, що моделюються, що означає необхідність визначення кількості й

порядків затримок на основі використання апріорної інформації або просто методом спроб і помилок.

2. Автором розроблено метод псевдорегуляризації градієнтів для боротьби з ефектом зникнення градієнтів в рекурентних нейромережах. Ідея метода базується на принципі штучного підсилення градієнтів під час навчання нейромережі шляхом введення додаткового члена, відповідального за величини зворотно-поширених градієнтів в загальний функціонал навчання. Для того, щоб уникнути протиріччя між членами функціоналу оптимізації, відповідальними за цільову похибку навчання та похибку псевдорегуляризації, автором було запропоновано *метод семплювання*. Метод семплювання засновано на відборі придатних для навчання на поточній ітерації прикладів вибірки для зменшення похибки псевдорегуляризації, для чого автором аналітично було виведено достатні умови збільшення і зменшення евклідової норми вектора локальних градієнтів похибки в процесі навчання простих рекурентних нейромереж.

3. Розроблений метод псевдорегуляризації градієнтів було адаптовано для задач нейроуправління, а саме для метода нейроуправління з еталонною моделлю шляхом керування нормою зворотнопоширених градієнтів в нейромодуляторах. Це дозволяє підвищити ефективність навчання нейроконтролерів з використанням нейромодуляторів для розрахунку похідних навчання нейроконтролерів за рахунок подолання проблеми зникнення градієнтів в об'єднаній нейромережі «нейроконтролер + нейромодулятор», що в підсумку забезпечує кращу точність управління нелінійним динамічним об'єктом 2-го порядку на 40-60%, похибка ІАЕ (Integrate Absolute Error).

4. Для архітектури динамічних нейромереж прямого поширення з лінією затримок автором розроблено метод навчання на основі розширеного фільтра Калмана, який відрізняється введенням в функціонал навчання в явному вигляді похибки багатокрокової прогнозовної траєкторії, що забезпечує кращу точність багатокрокового прогнозування. Це дозволило зменшити

середньоквадратичну похибку багатокрокового прогнозування часових рядів, що включають в себе хаотичні процеси і курси банківських металів на 10-80% при прогнозуванні на горизонт $H = 14...16$ кроків.

Достовірність та обґрунтованість одержаних результатів роботи забезпечена строгістю використаних математичних методів, апарату лінійної алгебри, математичної статистики, імітаційного моделювання, використанням відомих методик дослідження якості роботи нейронних мереж, задовільним збігом результатів, отриманих за допомогою розроблених моделей із даними стандартних тестових баз синтетичних та реальних даних, розглядом прикладів реалізації запропонованих методів, а також впровадженням розроблених технологій у профільних та державних установах.

Теоретичне значення дисертаційної роботи полягає у створенні нових методів навчання динамічних нейронних мереж, що забезпечують підвищення якості виконання довгострокових прогнозів часових рядів, а також методів навчання нейроконтролерів для управління динамічними об'єктами.

Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні низки програмних засобів і класів для удосконаленого навчання динамічних нейронних мереж для розв'язання прикладних задач прогнозування часових рядів та керування складними нелінійними динамічними системами.

Практичні результати досліджень використовуються для прогнозування економічних показників в компанії «Укрзолото» та в навчальному процесі Фізико-технічного навчально-наукового центра НАН України на кафедрі «Теоретична кібернетика і методи оптимального управління» при ІК НАН України. Впровадження і використання результатів дисертаційного дослідження підтверджено двома актами впровадження.

Повнота викладу основних результатів в публікаціях.

Результати дисертації в достатньо повному об'ємі представлено у 14 наукових працях, у тому числі у 5 статтях у фахових виданнях, які включено

до переліку ДАК України, у 2 статтях в міжнародних наукових журналах, у 1 главі в монографії та у 6 публікаціях в матеріалах національних та міжнародних конференцій. З них 11 наукових праць опубліковано одноосібно.

Оцінка змісту дисертації, відповідність встановленим вимогам щодо оформлення. Дисертаційна робота А.М. Чернодуба представлена на 156 сторінках, включає 38 рисунків і 12 таблиць і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку.

В першому розділі розглянуто архітектури та методи навчання динамічних нейромереж на базі багат шарового перцептрону, що використовуються для задач прогнозування та управління нелінійними динамічними об'єктами. Проаналізовано проблеми навчання динамічних нейромереж, а саме ефект зникнення градієнтів для рекурентних нейромереж і проблему вибору порядку лінії затримок для динамічних нейромереж прямого поширення з лінією затримок. Зазначено, що в розглянутих наукових роботах, присвячених рекурентним нейромережам, основною проблемою є ефект зникнення градієнтів, коли градієнти похибки експоненціально зменшуються до нуля або вибухають при пропусканні похибки через розгорнуту назад у часі методом ВРТТ нейромережу, що робить неможливим навчання довгостроковим залежностям.

В другому розділі розглянуто метод фільтра Калмана для навчання нейромереж та його експериментальне випробовування для нейромереж різного типу. Досліджено вплив вибору архітектури динамічних нейромереж на якість їх роботи. Експериментально показано, що для однокрокових прогнозів динамічні нейромережі прямого поширення з лінією затримок за точністю значно випереджають рекурентні нейромережі. Удосконалено навчання методом розширеного фільтра Калмана для динамічних нейромереж прямого поширення з лінією затримок для багатокрокового прогнозування за рахунок явного введення траекторної похибки довгострокового прогнозування в функціонал оптимізації.

В третьому розділі запропоновано метод псевдорегуляризації для подолання ефекту зникнення градієнтів. Метод засновано на ідеї включення похибки, що відповідає за норму зворотно-поширених градієнтів в функціонал оптимізації для навчання нейромережі. Детально розглянуто механізм зворотного поширення похибки в перцептронно-подібних нейромережах, проведено теоретичний аналіз ефекта зникнення градієнтів. Доведено теорему про достатні умови збільшення/зменшення норми зворотно-поширених градієнтів, яка використовується в розробленому методі семплювання для псевдорегуляризації. Проведено експериментальне дослідження розробленого методу на синтетичних тестових задачах з моделювання довгострокової динаміки, показано підвищення якості навчання для простих рекурентних нейромереж на 5-20%.

В четвертому розділі розглядаються задачі управління нелінійними динамічними об'єктами. Показано, що проблема зникнення градієнтів є прихованою проблемою навчання нейроконтролерів. Розроблений метод псевдорегуляризації було адаптовано та застосовано для методу нейроуправління з еталонною моделлю. Експериментально показано підвищення якості на 40-60% за рахунок застосування запропонованого методу. Експерименти проводились на модельній задачі управлінням нелінійним об'єктом другого порядку та реальною системою магнітної левітації, що використовується в дистанційному міжнародному змаганні «Automatic Control Telelab».

В Додатку представлено два акти про впровадження результатів роботи і сертифікат про участь в міжнародному змаганні зі створення алгоритмів для автоматичного управління. Дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам щодо оформлення та паспорту спеціальності 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації. Автореферат достатньо повно відповідає основним положенням та змісту дисертації.

Зауваження щодо змісту і оформлення дисертації.

- 1) На жаль в роботі відсутній критичний огляд та аналіз літератури по тематиці дисертації, на основі якого були б сформульовані мета та основні завдання дисертаційної роботи.
- 2) Практичне значення дисертації погано сформульоване по суті і зводиться лише до переліку отриманих практичних результатів.
- 3) В дисертації та авторефераті відсутній пункт щодо достовірності основних наукових висновків та рекомендацій виконаної роботи.
- 4) Проведено експериментальні дослідження запропонованих методів навчання нейронних мереж для прогнозування довгострокових залежностей лише на тестових задачах. Відсутнє порівняння з відомими методами прогнозування часових рядів, зокрема методом ARIMA, Бокса – Дженкінса на реальних задачах, що не дає можливість в повній мірі оцінити практичну значимість отриманих результатів.
- 5) Не зрозуміло, чому для оцінки точності прогнозування автор використовує лише критерій СКВ (MSE). Критерій САПО (середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE) є більш інформативним, але, на жаль, не використовується в дисертації.

Вказані зауваження суттєво не зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи А.М. Чернодуба.

Висновки.

Дисертаційна робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, що присвячено вирішенню актуальної наукової задачі – підвищенню ефективності навчання нейронних мереж довгостроковим залежностям в задачах прогнозування та нейромережевого управління.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні та відповідає вимогам пп. 9, 11 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня

2013 р., а її автор Чернодуб А.М. заслугоує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту.

Офіційний опонент,

професор кафедри математичних методів системного аналізу

Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу»

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»,

доктор технічних наук, професор



Ю.П. Зайченко

