

Принято до
спеціалізованої вченої
ради РНД 13419
Ф2-06.2026
Голова с.б.р. у.т.н. проф
А.І. Гудя.

Голові разової спеціалізованої
вченої ради
Українського державного
університету
науки і технологій
д.т.н., проф. Гуді А.І.

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора Кіріченко Людмили Олегівни на
дисертаційну роботу Жадана Артема Анатолійовича
на тему

«КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФРАКТАЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
122 Комп'ютерні науки

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

У сучасних інформаційних системах часові ряди є базовою формою представлення даних, що описують динаміку складних процесів у технічних, економічних, біологічних та кіберфізичних системах. Зростання обсягів даних, їх нелінійності, структурної неоднорідності та багаторівневої організації формує потребу у створенні нових підходів до аналізу часової динаміки, здатних враховувати не лише статистичні характеристики процесів, а й особливості їх внутрішньої структури.

Традиційні методи аналізу часових рядів, включаючи статистичні моделі, спектральні підходи та сучасні методи машинного навчання, демонструють високу ефективність у задачах прогнозування та апроксимації поведінки процесів. Проте більшість таких підходів орієнтована переважно на відтворення зовнішньої динаміки даних і не забезпечує можливості реконструкції механізмів формування часових рядів. У результаті виникають

обмеження при розв'язанні задач структурної ідентифікації, аналізу ієрархічних залежностей та дослідження самоподібних процесів.

Особливої актуальності набувають підходи, спрямовані на моделювання структурної організації часових рядів на основі формальних описів процесів генерації. У цьому контексті конструктивно-продукційне моделювання, засноване на використанні апарату формальних граматики та L-систем, створює передумови для переходу від традиційного аналізу поведінки процесів до дослідження закономірностей їх побудови та еволюції.

Використання конструктивно-продукційного підходу дозволяє формалізувати процес генерації часових рядів у вигляді системи продукційних правил та ітеративних перетворень, що відкриває можливість аналізу складних структурних залежностей, характерних для фрактальних і самоподібних процесів. Разом із тим практичне застосування таких моделей потребує розробки методів відновлення параметрів та породжувальних структур на основі спостережуваних даних, що є складною задачею через високу комбінаторну складність простору можливих моделей та неоднозначність структурної інтерпретації часових рядів.

У дисертаційній роботі запропоновано підхід до відновлення параметрів конструктивно-продукційних моделей часових рядів із використанням генетичних алгоритмів та процедур структурної декомпозиції. Такий підхід спрямований на вирішення задач реконструкції породжуючих механізмів складних динамічних процесів та розвитку методів структурної ідентифікації часових рядів.

Таким чином, актуальність дисертаційної роботи визначається необхідністю розвитку методів конструктивно-продукційного моделювання, спрямованих на реконструкцію внутрішньої структури часових рядів, а також потребою створення нових підходів до аналізу складних динамічних систем із використанням апарату формальних граматики, L-систем та еволюційних алгоритмів.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень

Наукові положення дисертаційної роботи базуються на використанні методів конструктивно-продукційного моделювання, теорії формальних грамастик, L-систем, генетичних алгоритмів та методів структурної ідентифікації складних систем. Запропоновані у роботі підходи формалізовані у вигляді відповідних процедур відновлення параметрів моделей та алгоритмів реконструкції породжуючих структур часових рядів.

Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується проведеними експериментальними дослідженнями, які демонструють можливість відтворення заданих структурних характеристик часових рядів у межах запропонованого підходу. У роботі наведено результати тестування на синтетичних часових рядах, породжених за допомогою правил розгортки L-систем, що дозволило дослідити ефективність методів відновлення параметрів конструктивних моделей.

Достатньо обґрунтованим є використання генетичних алгоритмів для задач параметричної ідентифікації, оскільки задача відновлення структури та параметрів конструктивних моделей характеризується високою комбінаторною складністю та наявністю значної кількості локальних екстремумів.

У роботі запропоновано модифікацію функції оцінювання близькості реалізацій часових рядів, а також підхід до кодування гібридних хромосом, які поєднують символічні правила L-систем і числові параметри моделей. Це дозволило розширити можливості застосування еволюційних методів у задачах реконструкції породжувальних структур часових процесів.

Позитивною рисою роботи є поєднання теоретичних положень із програмною реалізацією запропонованих методів та проведенням експериментальних досліджень для оцінювання їх ефективності.

3. Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг роботи є достатнім для повного викладення результатів дослідження.

Структура роботи є логічною та послідовною, розділи взаємопов'язані та завершуються узагальнюючими висновками, що забезпечує цілісність викладення матеріалу.

Оформлення дисертаційної роботи відповідає чинним вимогам Міністерства освіти і науки України до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

4. Характеристика змісту роботи та наукової новизни

У дисертаційній роботі послідовно розглянуто задачі аналізу часових рядів, підходи до структурної ідентифікації складних динамічних систем та інноваційні методи конструктивно-продукційного моделювання. Загальна логіка викладення матеріалу відповідає класичній структурі наукового дослідження та забезпечує цілісність отриманих результатів.

У першому розділі здійснено аналіз існуючих підходів до моделювання часових рядів. Розглянуто основні класи моделей, включаючи авторегресійні моделі, моделі простору станів із використанням фільтра Калмана, методи експоненційного згладжування, регресійні моделі з часовими ознаками та сучасні методи машинного навчання. Встановлено, що зазначені підходи орієнтовані переважно на задачі прогнозування та апроксимації, однак не забезпечують відновлення внутрішньої породжувальної структури процесів, що обмежує їх застосування у задачах структурної ідентифікації.

Окремо у розділі розглянуто особливості фрактальних часових рядів як класу складних динамічних процесів, що характеризуються властивостями самоподібності та масштабної інваріантності. Обґрунтовано доцільність врахування фрактальних властивостей при моделюванні складних систем та необхідність розвитку відповідних методів аналізу.

У другому розділі запропоновано конструктивно-продукційний підхід до моделювання часових рядів. Розроблено формалізовану систему конструкторів

і відповідних алгоритмів, що дозволяє описувати процеси генерації часових рядів на основі L-систем, а також реалізувати обернений процес – відновлення параметрів моделі за спостережуваними даними. Показано, що використання формальних граматики забезпечує можливість гнучкого опису складних структурних залежностей у часових рядах різної природи.

У третьому розділі розглянуто методи параметричної ідентифікації конструктивних моделей із використанням генетичних алгоритмів. Запропоновано ітеративний підхід до відновлення параметрів моделей, який базується на декомпозиції часових рядів та поетапному уточненні їх структурних компонентів. Удосконалено функцію оцінювання (fitness function), яка, на відміну від класичного попарного порівняння, використовує ансамблеве зіставлення реалізацій, що дозволяє враховувати стохастичний характер даних та підвищує стабільність процесу оптимізації.

Також отримав подальший розвиток метод кодування гібридних хромосом, що поєднує символічні правила L-систем та числові параметри, що забезпечує узгоджену обробку структурної та параметричної інформації в межах єдиного генетичного алгоритму. Вдосконалено також генетичні оператори, адаптовані до обробки таких структур.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень, виконаних на синтетичних детермінованих, стохастичних та реальних часових рядах. Реалізовано програмний комплекс для автоматизації процесу відновлення конструктивних моделей та проведення обчислювальних експериментів. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованого підходу та його здатність до відтворення структурних характеристик часових рядів різної природи.

5. Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження

1. Вперше розроблено метод відновлення конструктивно-продукційних моделей часових рядів. На відміну від існуючих рішень прямого граматичного виведення, метод забезпечує зворотну реконструкцію символічних правил L-систем на основі аналізу спостережуваних дискретних даних, забезпечуючи перехід від описового аналізу до відтворення породжувальних механізмів.

2. Вперше запропоновано ітеративний підхід до параметричної ідентифікації конструктивних моделей. Підхід базується на попередній структурній декомпозиції ряду та поетапному послідовному уточненні його складових компонентів, що дозволяє значно знизити комбінаторну складність простору пошуку рішень.

3. Вперше формалізовано комплексну систему конструкторів конструктивно-продукційного моделювання. Створена система математично описує взаємодію конструкторів в межах оберненого процесу, розширюючи класичний формальний апарат L-систем для ідентифікації фрактальних і самоподібних структур.

4. Отримав подальший розвиток метод оцінювання близькості реалізацій часових рядів у генетичному алгоритмі. Розроблено модифікацію цільової функції (fitness function), яка базується на перехресному ансамблевому зіставленні генерованих та еталонних послідовностей, що нівелює вплив випадкового шуму та підвищує стійкість оптимізації.

5. Вперше запропоновано метод кодування гібридних хромосом для задач структурно-параметричної ідентифікації. Метод забезпечує інтеграцію символічних продукційних правил та безперервних числових параметрів у межах єдиної популяції, що дозволяє одночасно оптимізувати як граматичну структуру, так і коефіцієнти моделі.

6. Удосконалено алгоритми еволюційного пошуку для гібридних структур. Адаптовано генетичні оператори (кросинговер, мутація та селекція) для узгодженої та коректної обробки хромосом, що містять одночасно дискретні символічні та безперервні числові типи даних.

7. Удосконалено архітектурний підхід до реалізації обчислювально навантажених процедур генетичного пошуку. Шляхом декомпозиції операцій на основі методології Domain-Driven Design (DDD) та мікросервісної організації забезпечено ефективно ізольоване масштабування алгоритму при обробці великих масивів часових рядів.

6. Прикладна цінність результатів дослідження

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у розробці та програмній реалізації конструктивно-продукційного підходу до моделювання та структурної ідентифікації часових рядів різної природи, що дозволяє перейти від класичного описового аналізу до реконструкції породжуючої структури динамічних процесів.

Запропоновані методи забезпечують можливість обробки як детермінованих, так і стохастичних часових рядів, включаючи дані зі складною нелінійною структурою та фрактальними властивостями. Це розширює клас задач, для яких може бути застосовано конструктивно-продукційне моделювання, зокрема в умовах неповної інформації про механізми генерації даних.

Розроблений ітеративний підхід до відновлення параметрів моделей дозволяє підвищити точність і стійкість реконструкції при роботі з реальними часовими рядами, а використання генетичного алгоритму забезпечує ефективний пошук оптимальних структурних і параметричних конфігурацій у складних просторах рішень.

Отримані результати можуть бути використані в задачах аналізу фінансових показників, моніторингу технічних систем, дослідження природних процесів та інших прикладних областях, де часові ряди характеризуються складною структурною динамікою.

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертаційна робота оформлена відповідно до чинних вимог Міністерства освіти і науки України та стандартів підготовки здобувачів ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». Структура роботи є логічною, послідовною та повністю відповідає вимогам до викладу результатів наукового дослідження.

Матеріал дисертації розгорнуто у строгій системній послідовності; архітектоніка роботи демонструє явну логічну спадкоємність між розділами,

забезпечуючи концептуальну цілісність представлення запропонованого конструктивно-продукційного підходу та отриманих результатів.

Аналіз дисертаційної роботи та опублікованих праць здобувача свідчить, що основні наукові положення, методи та результати повною мірою відображені у фахових публікаціях та матеріалах конференцій, що забезпечує їх належну апробацію.

Під час виконання дослідження дотримано вимог академічної доброчесності. Усі запозичені ідеї, положення та результати інших авторів коректно оформлені з відповідними посиланнями на першоджерела, що виключає ознаки порушення академічної етики.

Таким чином, дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому забезпечено належне оформлення, повноту викладу результатів та дотримання принципів академічної доброчесності.

8. Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота виконана українською мовою, має чітку, логічно структуровану та послідовну побудову, що забезпечує системне викладення наукових положень, методів та результатів дослідження. Стиль викладення відповідає вимогам наукового мовлення, характеризується коректним використанням спеціалізованої термінології та дотриманням принципів наукової аргументації.

Автор демонструє належний рівень володіння науковим стилем викладу, що проявляється у логічній організації матеріалу, узгодженості структурних елементів дисертації та чіткості формулювання висновків. Виклад результатів є достатньо формалізованим і відповідає сучасним вимогам до представлення наукових досліджень у галузі комп'ютерних наук.

Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації», а також загальним положенням щодо оформлення наукових робіт здобувачів ступеня доктора філософії, визначеним чинними нормативними документами у сфері вищої освіти.

Таким чином, мова та стиль викладення результатів відповідають встановленим нормативним вимогам, забезпечують належний рівень наукової комунікації та повноцінне представлення результатів дисертаційного дослідження.

9. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційного дослідження оприлюднено у наукових працях здобувача, які відображають основні положення та висновки роботи. Основні наукові результати опубліковано у фахових виданнях України, а також у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій, зокрема тих, що індексуються у наукометричній базі Scopus.

Загалом результати дисертації відображено у 15 наукових працях, серед яких 3 статті у фахових виданнях, 3 публікації у виданнях, що індексуються Scopus, та 7 тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях. Такий обсяг публікацій забезпечує належний рівень апробації та публічного представлення результатів дослідження.

Прикладна вартість дисертації додатково підтверджується безпосереднім інтегруванням її результатів у поточні науково-дослідні проекти випускової кафедри, а також їх адаптацією для використання у лекційних курсах інформаційного профілю.

10. Недоліки та зауваження

Детальний аналіз представленої дисертаційної роботи дозволяє виділити ряд дискусійних положень, методологічних аспектів та зауважень, обговорення яких є важливим для окреслення перспектив подальшого розвитку запропонованого підходу:

1) У дисертаційній роботі відсутнє коректне універсальне визначення показника Герста. Зокрема, у першому розділі на сторінці 38 наведено не визначення показника Герста, а його оцінку, запропоновану безпосередньо Г.Герстом. Подання коректного визначення показника Герста для випадкових

процесів і часових рядів, безумовно, надало б дисертаційній роботі більшої теоретичної завершеності та наукової ґрунтовності.

2) У другому розділі на сторінці 55 зазначено, що часові ряди, згенеровані конструктивною моделлю, характеризуються значенням показника Герста, більшим за 0,8. Проте автор, на жаль, не навів пояснення та обґрунтування причин отримання саме таких значень показника. Хоча зрозуміло, що відповідні часові ряди мають персистентний характер, доцільно було б детальніше проаналізувати, чому показник Герста перевищує саме значення 0,8 та з якими властивостями моделі це пов'язано. Такий аналіз становив би інтерес як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

3) Одним із важливих підходів у роботі є моделювання фрактальних часових рядів на основі нормального розподілу. При цьому вводяться параметри, що відповідають математичному сподіванню (tVf) та дисперсії (Df). Водночас було б доцільно детальніше показати зв'язок зазначених параметрів із параметрами стандартного нормального розподілу, а також пояснити, як чисельно їх значення впливають на зміну дисперсії згенерованих часових рядів. Таке уточнення сприяло б кращому розумінню особливостей запропонованої моделі та інтерпретації отриманих результатів.

4) У третьому розділі наведено результати експериментів, що стосуються моделювання як синтетичних, так і реальних часових рядів. Кількість експериментів є доволі значною, а їх опис подано послідовно, без чіткої структуризації. У зв'язку з цим доцільно було б покращити спосіб подання матеріалу: наприклад, узагальнити експерименти у вигляді таблиці із зазначенням типів експериментів, параметрів та отриманих результатів. Це значно полегшило б сприйняття великого обсягу експериментального матеріалу та підвищило б структурованість викладу результатів.

5) У роботі широко використовуються реальні фінансові часові ряди, зокрема ряди NASDAQ, для їх аналізу та прогнозування. Відомо, що такі ряди зазвичай не підпорядковуються нормальному розподілу, а характеризуються наявністю «важких хвостів». У цьому контексті було б доцільно додатково дослідити, наскільки суттєво впливає ступінь відхилення від нормального розподілу (зокрема, важкохвостість) на якість прогнозування таких рядів,

особливо з урахуванням того, що моделювання в роботі базується на припущенні про нормальність вихідних часових рядів. Такий аналіз міг би надати додаткове обґрунтування стійкості або обмежень запропонованого підходу.

6) Як одну з базових моделей, з якими порівнювалися результати моделювання та прогнозування, було використано широко відому модель ARIMA. Оскільки часові ряди з самого початку інтерпретуються як фрактальні, а також для кожного ряду було оцінено показник Герста, доцільним виглядало б застосування моделі FARIMA як фрактального узагальнення ARIMA. Крім того, розширення порівняльного аналізу за рахунок нейронних мереж, які враховують довгострокові залежності у фрактальних часових рядах, могло б зробити порівняння результатів більш обґрунтованим.

7) Формула (2.8) описує обчислення фітнес-індикатора хромосоми (показника її придатності), який є важливою характеристикою в межах даного дослідження. Водночас доцільно було б подати це поняття більш детально та розгорнуто, зокрема пояснити інтерпретацію отриманих значень у контексті розв'язуваної задачі.

8) У роботі застосовується обчислення фрактальної розмірності Гаусдорфа, проте не наведено конкретного методу її розрахунку. Доцільно було б детальніше описати використаний метод та обґрунтувати його вибір.

9) У роботі недостатньо чітко окреслено практичні сценарії застосування розробленого підходу для конкретних прикладних предметних областей, що дещо ускладнює повну оцінку прикладної спрямованості відновлених моделей у специфічних інженерних чи інформаційних системах.

Зазначені зауваження та побажання спрямовані на розширення сфери застосування розроблених методів у майбутніх дослідженнях; вони не зачіпають фундаментальних положень дисертації та не знижують значимість роботи.

11. Загальна оцінка дисертаційної роботи

задовольняє встановленим вимогам, а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Професор кафедри
Математичного моделювання та аналізу
даних навчально-наукового інституту
комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна,

д.т.н., професор

Людмила КІРІЧЕНКО

Підпис д.т.н., професора Кіріченко Л.О. засвідчую

Директор ННІ комп'ютерних наук
та штучного інтелекту
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна



Дмитро УЗЛОВ