

## АНОТАЦІЯ

*Жадан А. А.* Конструктивно-продукційне моделювання фрактальних складових часових рядів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп’ютерні науки (галузь знань 12 – Інформаційні технології). – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2026.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню використання та автоматизації методів конструктивно-продукційного моделювання для відновлення параметричної конструктивної моделі наявного часового ряду. В межах цього дослідження розглядається розширення застосування конструктивізму для вирішення оберненої задачі моделювання, а саме визначення конструктивних моделей для вже відомих значень часового ряду.

Часовий ряд являє собою набір послідовних спостережень значень певної величини або станів системи, розташованих у хронологічному порядку відповідно до визначеного інтервалу часу. Часові ряди широко використовуються у різних прикладних сферах, таких як економіка, медицина, інженерія та інші. Вони дозволяють виявляти наявні залежності між значеннями спостережень на відповідному проміжку часу, що дає змогу визначати поточні тенденції, сезонні коливання та циклічні процеси.

Популярність досліджень часових рядів зумовлена насамперед зростаючими потребами в аналізі даних у реальному часі та прогнозуванні їх подальших значень. Залежно від сфери застосування кінцева мета аналізу може відрізнятися, проте загальна користь полягає у можливості виявлення ключових тенденцій зміни даних та передбачення їх розвитку. Це дозволяє заздалегідь обґрунтовувати рішення, оптимізувати поточні процеси та підвищувати ефективність управлінських чи виробничих рішень.

Сучасні методи дослідження часових рядів дозволяють виявляти як лінійні, так і нелінійні закономірності, аналізувати тренди даних та здійснювати прогнозування на різних часових інтервалах. Розвиток обчислювальних технологій спрощує етапи дослідження та впровадження методів, а збільшення обсягів даних розширює можливості для верифікації моделей та підвищення точності прогнозів.

Методи конструктивно-продукційного моделювання вже були успішно випробувані у сфері моделювання фрактальних часових рядів різної структури та поведінки, зокрема детермінованих і стохастичних. Втім, розв'язання оберненої задачі, а саме визначення конструктивної моделі та її набору параметрів для заданого часового ряду – як синтетичного, так і реального – залишається відкритим і малодослідженим питанням.

У цьому дослідженні розглядаються та пропонуються підходи до організації процесу відновлення конструктивної моделі та набору її параметрів для визначеного часового ряду. Зокрема, впроваджується поступовий ітеративний процес контрольованого підбору параметрів моделі з метою побудови ряду, максимально наближеного до вхідного. Досягнення рішення поставленої задачі включає розширення, уніфікацію та адаптацію методів конструктивно-продукційного моделювання для опису процесу відновлення.

Метою дисертаційної роботи є розробка, теоретичне обґрунтування та дослідження методу відновлення параметрів конструктивно-продукційних моделей часових рядів різної природи. Підхід базується на створенні універсального інструментарію, що дозволяє працювати як з детермінованими, так і зі стохастичними даними, використовуючи математичний апарат конструктивізму для виявлення прихованих закономірностей відповідно до внутрішніх фрактальних властивостей даних.

Об'єктом дослідження виступають процеси моделювання та відновлення параметрів часових рядів різної природи, а предметом – методи, моделі та алгоритмічні засоби реконструкції конструктивно-продукційних моделей. У межах поставлених задач формалізовано обернений процес моделювання, розроблено нові компоненти для аналізу стохастичних рядів, створено масштабоване програмне забезпечення для автоматизації експериментів та проведено оцінку адекватності отриманих моделей на реальних даних.

Наукова новизна результатів полягає у вперше запропонованому ітеративному підході до відновлення параметрів, що дозволяє отримати структурну математичну модель замість класичної апроксимації. Формалізовано систему конструкторів для відтворення логіки генерації ряду за його значеннями. Удосконалено метод оцінки близькості (фітнес-функцію) для стохастичних даних на основі ансамблевого зіставлення реалізацій, що підвищує точність реконструкції, а також оптимізовано архітектуру генетичного алгоритму через механізм ізольованого масштабування обчислень.

Подальшого розвитку набули методи гібридного кодування складних хромосомних структур, які поєднують символічні правила L-систем із безперервними числовими параметрами. Також розширено апарат формальних граматики для опису взаємодії фрактальних та стохастичних компонентів, що дозволило інтегрувати засоби генетичного пошуку як базові модулі у загальну систему імітаційного моделювання.

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасних підходів до дослідження часових рядів різної природи. Розглянуто як класичні лінійні та нелінійні моделі, що базуються на аналізі внутрішніх взаємозв'язків між відліками, так і специфічні підходи – зокрема, рекурентний аналіз та

конструктивно-продукційне моделювання. Досліджено їхні ключові особливості, переваги, недоліки та специфіку практичного застосування. Результатом цього етапу стало формування актуального аналітичного інструментарію та окреслення фундаментальних обмежень існуючих методів.

У другому розділі викладено теоретичні засади дослідження. Основну увагу приділено формалізації комплексу спеціалізованих конструкторів, їхнього функціоналу та правил взаємодії для забезпечення процедури відновлення параметрів конструктивної моделі. Відповідно до обраних підходів детально представлено процеси обробки детермінованих та стохастичних синтетичних рядів із виділенням їхніх ключових відмінностей та необхідних алгоритмічних модифікацій. Результатом розділу є узагальнена методика роботи з реальними наборами даних для ідентифікації параметрів їхніх конструктивних моделей.

У третьому розділі представлено експериментальні дослідження, що базуються на викладеному раніше теоретичному базисі. Окремо досліджено процеси моделювання синтетичних детермінованих, синтетичних стохастичних та реальних часових рядів. Для кожного типу даних було визначено специфічні особливості обробки, наведено репрезентативні приклади вибірок та узагальнено отримані результати.

У четвертому розділі розглянуто різні підходи до архітектурної реалізації програмного рішення, призначеного для автоматизації експериментальних випробувань та подальшого впровадження системи. Відповідно до еволюції завдань дослідження було розроблено та протестовано три парадигми побудови архітектури: монолітну однопотокową, мультиагентну та мікросервісну (безсерверну). Кожен із цих підходів було послідовно впроваджено для досягнення максимальної обчислювальної та часової ефективності системи.

Відповідно, у дисертаційній роботі представлено завершений цикл наукового дослідження – від теоретичного обґрунтування концепції до її практичного втілення у вигляді програмного комплексу. Отримані результати визначають нові можливості для застосування конструктивно-продукційного моделювання для аналізу синтетичних та реальних часових рядів. Практичну цінність отриманих висновків та створених програмних модулів підтверджено їхнім використанням у межах зазначених науково-дослідних робіт.

**Ключові слова:** фрактальні часові ряди, конструктивно-продукційне моделювання, L-система, конструктор, формальні граматики, генетичний алгоритм, програмне забезпечення, інформаційні технології, хмарні обчислення, показник Герста.

#### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

##### *Праці у фахових виданнях МОН України*

1. Шинкаренко, В. И., Жадан, А. А. (2025). Використання методів конструктивно-продукційного моделювання для прогнозування детермінованих часових рядів. Системи і технології, 6, с. 124-137. DOI: 10.34185/1562-9945-5-161-2025-12.
2. Шинкаренко, В. И., Жадан, А. А. (2025). Сучасні методи та засоби роботи з часовими рядами. Наука і прогрес транспорту. 4(112), 142–154. DOI: 10.15802/stp2025/341773
3. Шинкаренко, В. И., Жадан, А. А. (2025). Реалізація процесу відновлення конструктивно-продукційних моделей фрактальних часових рядів. 4, с. 3-11. DOI: 10.15407/pp2025.04

##### *Праці міжнародних конференцій, включені до міжнародної наукометричної бази Scopus*

4. Shynkarenko, V., Zhadan, A. (2020). Modeling of the deterministic fractal time series by one rule constructors. In: Proceedings of the 2020 IEEE 15th

International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, 23-26 September. pp. 336–339. DOI: 10.1109/CSIT49958.2020.9321923.

5. Shinkarenko, V., Zhadan, A. (2024). Multiservice Architecture of Software for Stochastic Fractal Time Series Forecasting. 2024 IEEE 19th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 14-17 October. pp. 1-4. DOI: 10.1109/CSIT65290.2024.10982626.

6. Shynkarenko, V., Zhadan, A., & Halushka, O. (2024). Multi-Agent System for Reconstruction Constructive Models of Stochastic Fractal Time Series. Proceedings of the Information Technology and Implementation (IT&I) Workshop: IT Infrastructure and Applied Solutions (IT&I-WS 2024: ITIAS), Kyiv, Ukraine, November 20 – 21, pp. 66-77.

#### *Матеріали міжнародних наукових конференцій*

7. Шинкаренко, В. І., Чигир, Р. Р., Жадан, А. А. (2017). Моделивання взаємопов'язаних часових рядів та зображень L-подібних конструктивно-продукційних структур. В «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні». Дніпро. с. 98.

8. Шинкаренко, В. И., Литвиненко, К. В., Чигирь, Р. Р., Жадан, А. А. (2018). Конструктивно-продукционное моделирование фракталов. В «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту». Матеріали міжнародної наукової конференції. Херсон: ПП Вишемирський В.С. 289–291.

9. Шинкаренко, В. І., Литвиненко, К. В., Чигір, Р. Р., Жадан, А. А. (2017). Вариативность уточняющих преобразований конструктивно-продукционного моделирования. В «Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем» (ТААПСД'2017) Київ. 225–230.

10. Шинкаренко, В. І., Жадан, А. А. (2022). Конструктивно-продукційне моделювання фрактальних складових часових рядів. В «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». Дніпро. с. 71.
11. Шинкаренко, В. І., Жадан, А. А. (2023). Конструктивно-продукційне моделювання детермінованих часових рядів з фрактальними властивостями. В «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні». Дніпро. с. 222–226. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.060.
12. Шинкаренко, В. І., Жадан, А. А., Галушко, О. В. (2023). Мультиагентне конструктивне моделювання часових рядів. В «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». Дніпро. с. 64
13. Шинкаренко, В. І., Жадан, А. А. (2024). Мультиагентне середовище відновлення фрактальних часових рядів. В «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні», Дніпро. с. 232–236. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.041.
14. Шинкаренко, В. І., Жадан, А. А. (2024). Проблеми синхронізації розподілених обчислень на прикладі мікросервісної реалізації генетичного алгоритму. В «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». Дніпро. с. 93.
15. Шинкаренко, В. І., Жадан, А. А. (2025). Реалізація розподілення процесу роботи генетичного алгоритму шляхом впровадження каналів та вузлів обробки повідомлень. В «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні». Дніпро. с. 215–219. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.037.
16. Шинкаренко, В. І., Жадан, А. А. (2025). Проблеми синхронізації розподілених обчислень на прикладі мікросервісної реалізації генетичного

алгоритму. В «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». Дніпро. с. 98.

***Матеріали наукових конференцій***

17. Шинкаренко, В. И., Литвиненко, К. В., Чигирь, Р. Р., Жадан, А. А. (2018). Конструктивно-продукционное моделирование фрактальных временных рядов на основе L-систем. В «Проблеми математичного моделювання». Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції. Кам'янське: ДДТУ. 161–163.

***Свідоцтва про реєстрацію авторського права***

18. Шинкаренко, В. І., Чигір, Р. Р., Жадан, А. А. (2019). Комп'ютерна програма «Рекурентний аналіз часових рядів породжуваних в L-системах». Рішення про реєстрацію договору, який стосується права автора на твір № 4367 від 29.05.2019.

19. Шинкаренко, В. І., Чигір, Р. Р., Жадан, А. А. (2019). Комп'ютерна програма «Моделювання взаємопов'язаних часових рядів й геометричних фракталів породжуваних в L-системах». Рішення про реєстрацію договору, який стосується права автора на твір № 4369 від 31.05.2019.

20. Шинкаренко, В. І., Чигір, Р. Р., Жадан, А. А. (2017). Комп'ютерна програма «Моделювання часових рядів із заданими фрактальними властивостями». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 72579 від 27.06.2017.

**ABSTRACT**

*Zhadan A. A.* Constructive-synthesizing modeling of time series fractal components. Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of PhD in specialty 122 "Computer Science" - Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2026.

The dissertation is devoted to the study of the application and automation of constructive–synthesizing modeling methods for reconstructing a parametric constructive model of a given time series. Within this research, the extension of constructivist approaches to solving the inverse modeling problem is considered, namely, the determination of constructive models for already known values of a time series.

A time series represents a sequence of observations of a certain variable or system states arranged in chronological order according to a specified time interval. Time series are widely used in various applied domains such as economics, medicine, engineering, and others. They enable the identification of dependencies between observed values over time, allowing for the detection of current trends, seasonal fluctuations, and cyclic processes.

The growing interest in time series research is primarily driven by the increasing demand for real-time data analysis and forecasting. Depending on the application domain, the goal of analysis may differ; however, the overall benefit lies in the ability to identify key patterns in data evolution and predict their future behavior. This makes it possible to justify decisions in advance, optimize ongoing processes, and improve the efficiency of managerial and operational decisions.

Modern methods for time series analysis allow the identification of both linear and nonlinear patterns, the analysis of trends, and forecasting across different time horizons. Advances in computational technologies simplify the research and implementation processes, while the growth of available data enhances model validation capabilities and improves forecasting accuracy.

Constructive–synthesizing modeling methods have already been successfully applied to modeling fractal time series of various structures and behaviors, including both deterministic and stochastic ones. However, solving the inverse problem –

namely, determining a constructive model and its parameter set for a given time series, whether synthetic or real – remains an open and insufficiently studied issue.

This research proposes approaches to organizing the process of reconstructing a constructive model and its parameter set for a given time series. A gradual iterative process of controlled parameter selection is introduced to generate a series that closely approximates the input data. Solving this problem involves the extension, unification, and adaptation of constructive–synthesizing modeling methods to describe the reconstruction process.

The dissertation aims to develop, theoretically substantiate, and investigate a method for reconstructing the parameters of constructive–synthesizing models for time series of various nature. The approach is based on creating a universal toolkit capable of handling both deterministic and stochastic data by employing the mathematical framework of constructivism to identify hidden patterns in accordance with the intrinsic fractal properties of the data.

The object of research is the processes of modeling and parameter reconstruction of time series of different nature, while the subject is the methods, models, and algorithmic tools for reconstructing constructive–synthesizing models. Within the scope of the study, the inverse modeling process is formalized, new components for analyzing stochastic series are developed, scalable software for automating experiments is created, and the adequacy of the obtained models is evaluated using real data.

The scientific novelty of the results lies in the proposed iterative approach to parameter reconstruction, which enables obtaining a structural mathematical model instead of a classical approximation. A system of constructors is formalized to reproduce the logic of series generation based on its values. The fitness evaluation method for stochastic data is improved through ensemble-based comparison of realizations, increasing reconstruction accuracy. Additionally, the architecture of the

genetic algorithm is optimized through a mechanism of isolated computational scaling.

Further development is achieved in hybrid encoding methods for complex chromosomal structures that combine symbolic L-system rules with continuous numerical parameters. The formal grammar framework is also extended to describe the interaction between fractal and stochastic components, allowing the integration of genetic search mechanisms as core modules within a general simulation modeling system.

The first chapter provides a comprehensive analysis of modern approaches to time series research. Both classical linear and nonlinear models based on internal dependencies between observations and specialized approaches such as recurrence analysis and constructive–synthesizing modeling are considered. Their key features, advantages, disadvantages, and application specifics are examined. The result of this stage is the formation of a relevant analytical toolkit and the identification of fundamental limitations of existing methods.

The second chapter presents the theoretical foundations of the research. Special attention is paid to the formalization of a set of specialized constructors, their functionality, and interaction rules to support the parameter reconstruction procedure. According to the chosen methodology, the processes of handling deterministic and stochastic synthetic series are described in detail, highlighting their key differences and required algorithmic modifications. The result of this chapter is a generalized methodology for working with real datasets to identify parameters of their constructive models.

The third chapter presents experimental studies based on the proposed theoretical framework. The processes of modeling synthetic deterministic, synthetic stochastic, and real-world time series are examined separately. For each type of data,

specific processing features are identified, representative samples are provided, and the obtained results are summarized.

The fourth chapter discusses various approaches to the architectural implementation of the software system designed to automate experimental studies and support further deployment. In accordance with the evolution of research tasks, three architectural paradigms are developed and tested: monolithic single-threaded, multi-agent, and microservice (serverless). Each approach is successively implemented to achieve maximum computational and time efficiency.

Thus, the dissertation presents a complete cycle of scientific research – from theoretical justification of the concept to its practical implementation in the form of a software system. The obtained results define new possibilities for applying constructive–synthesizing modeling to the analysis of both synthetic and real time series. The practical value of the findings and developed software modules is confirmed by their application within the framework of the specified research projects.

**Keywords:** fractal time series, constructive-synthesizing modeling, L-system, constructor, formal grammars, genetic algorithm, software, information technologies, cloud computing, Hurst exponent.