

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ФРАКТАЛЬНОЙ ПРИРОДЫ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.А. Астраханцева, С.В. Горев, Р.Г. Астраханцев

Ирина Александровна Астраханцева* (ORCID 0000-0003-2841-8639), Сергей Владимирович Горев (ORCID 0000-0002-4370-9533), Роман Геннадьевич Астраханцев (ORCID 0000-0001-9880-2826)

Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000, Россия

E-mail: i.astrakhantseva@mail.ru*, gorev@srosovnet.ru, rgastrakhantsev@gmail.com

В статье исследуется роль фракталов в системном анализе в отношении сложных технических систем. Авторы проводят сравнительный анализ основных понятий и концепций, связанных с фракталами, а также анализируют существующие классификации этих математических объектов. Предлагается расширенная классификация фракталов, которая предназначена для обеспечения более полного понимания их разнообразия и уникальности. Основные области, которые затрагиваются, включают интерпретацию результатов фрактального анализа, использование фракталов для прогнозирования, идентификацию и оценку фрактальных структур в многомерных данных и понимание их взаимодействия с другими структурами.

Авторы исследуют эмерджентные свойства сложных технических систем, такие как телекоммуникации и электрические сети, утверждая, что они проявляются в результате взаимодействия компонентов системы.

В данной работе предлагается определение фрактала в контексте сложной технической системы как интегральной структуры, характеризующейся самоподобием и масштабной инвариантностью. Авторы делают акцент на необходимости исследования влияния фрактальности на надежность, адаптивность и эффективность таких систем. Подчеркивается, что связь между фрактальностью и эффективностью зависит от ряда факторов, что обуславливает необходимость дальнейших исследований в этом направлении. В заключение, авторы определяют ключевые направления для будущих исследований в области применения фракталов в системном анализе, обозначая возможности дальнейшего изучения и применения в этой интригующей области.

Ключевые слова: фракталы, системный анализ, сложные технические системы, классификация и моделирование, надежность и адаптивность систем.

SYSTEMS APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS
FRACTAL NATURE

I.A. Astrakhantseva, S.V. Gorev, R.G. Astrakhantsev

Irina A. Astrakhantseva*(ORCID 0000-0003-2841-8639), Sergey V. Gorev (ORCID 0000-0002-4370-9533), Roman G. Astrakhantsev (ORCID 0000-0001-9880-2826)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetev avenue, 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: i.astrakhantseva@mail.ru*, gorev@srosovnet.ru, rgastrakhantsev@gmail.com

The article explores the role of fractals in systems analysis in relation to complex technical systems. Authors conduct a comparative analysis of the primary concepts and theories associated with fractals, and analyze existing classifications of these mathematical objects. An expanded classification of fractals is proposed, aimed at providing a more comprehensive understanding of their diversity and uniqueness. The key areas covered include the interpretation of the results of fractal analysis, the use of fractals for forecasting, the identification and assessment of fractal structures in multidimensional data, and the understanding of their interaction with other structures.

The authors investigate the emergent properties of complex technical systems, such as telecommunications and electrical grids, arguing that they manifest as a result of the interaction of system components.

This paper proposes the definition of a fractal in the context of a complex technical system as an integral structure characterized by self-similarity and scale invariance. The authors stress the necessity of studying the impact of fractality on the reliability, adaptability, and efficiency of such systems. It is emphasized that the relationship between fractality and efficiency depends on several factors, necessitating further research in this area. In conclusion, the authors identify key directions for future research in the field of the application of fractals in systems analysis, outlining the possibilities for further study and application in this intriguing area.

Keywords: fractals, systems analysis, complex technical systems, classification and modeling, reliability and adaptability of systems.

Для цитирования:

Астраханцева И.А., Горев С.В., Астраханцев Р.Г. Системный подход к анализу фрактальной природы сложных технических систем. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2023. № 03(57). С.89-97. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.657

For citation:

Astrakhantseva I.A., Gorev S.V., Astrakhantsev R.G. Systems approach to the analysis of the complex technical systems fractal nature. *Ivecofin*. 2023. N 03(57). С.89-97. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.657 (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Сложные технические системы являются основой для большинства современных индустрий от энергетики и транспорта до производства и информационных технологий. Повышение их эффективности и надежности напрямую влияет на экономическую эффективность и устойчивость систем. Особенно актуально это становится в свете последних исследований в области фрактальной динамики и ее влияния на поведение сложных систем. Фрактальные флуктуации, представляющие собой нерегулярные, но структурно упорядоченные колебания, оказывают значительное влияние на работу технических систем. Механизмы их воздействия и пути управления этими процессами до сих пор недостаточно изучены, что обуславливает необходимость данного исследования.

Нарастающая сложность современных технических систем и высокие требования, предъявляемые к их стабильности и эффективности особенно в условиях быстрого развития цифровых технологий и Интернета вещей, где множество устройств и систем взаимодействуют друг с другом, создавая глобальную сложную систему, актуальность исследования влияния фрактальных флуктуаций на эффективность и надежность функционирования возрастает. Фрактальная природа флуктуаций в сложных технических системах требует новых подходов к анализу и управлению этих систем.

Особенно актуален вопрос надежности для критически важных инфраструктур, таких как энергосистемы, транспортные сети и информационные системы. Использование фракталь-

ной методологии поможет пролить свет на природу возникающих неожиданных сбоев и аварий в сложных системах, что будет способствовать повышению их безопасности.

Глобализация и урбанизация приводят к постоянному увеличению транспортного потока и сложности транспортных сетей. Эффективное управление транспортной системой становится критически важной задачей для обеспечения бесперебойности городского функционирования, экономического развития и благополучия граждан.

Фрактальные флуктуации, проявляющиеся в транспортных системах, влияют на пропускную способность дорог, время в пути, уровень аварийности и другие ключевые параметры. При планировании и управлении транспортными системами моделирование фрактальных флуктуаций повысят эффективность и надежность этих систем, снизят затраты на транспорт и улучшат качество услуг для пассажиров и грузовладельцев. В условиях развития автономных транспортных средств, важность прогнозирования и контроля флуктуаций в транспортных системах увеличивается, поскольку они существенно влияют на безопасность движения и эффективность автономного транспорта.

Таким образом, актуальность влияния фрактальных флуктуаций на эффективность и надежность функционирования транспортных систем обусловлена ростом сложности этих систем, увеличением требований к их эффективности и надежности, а также необходимостью учета этих факторов при планировании и управлении транспортными системами. Значимость исследования определяется не только теоретической значимостью изучения

фрактальных флуктуаций в сложных технических системах, но и практической необходимостью развития методов управления и оптимизации этих систем с учетом данного феномена.

МЕТОДЫ

Исследования в области взаимосвязи фрактальных флуктуаций и производительности транспортных систем опираются на труды российских и зарубежных ученых, практические разработки в области системного анализа, статистики, теории вероятностей и машинного обучения. Изучению теоретических основ фрактальных флуктуаций посвящены труды зарубежных ученых, таких как В.В. Mandelbrot, А.К. Zaslavsky, В. West и других. В то же время, вопросы применения фрактального анализа для прогнозирования поведения сложных технических систем относятся к числу недостаточно разработанных ввиду относительной новизны данных процессов и в силу их практической направленности. Влияние фрактальных флуктуаций на эффективность и надежность функционирования сложных технических систем требует дополнительных исследований и разработки новых методов и подходов, сочетающих теоретические основы системного анализа и практическую реализацию современных технологий искусственного интеллекта.

Современные технологии искусственного интеллекта, такие как глубокое обучение, нейронные сети, и обработка естественного языка, предоставляют возможности для автоматизации и улучшения процессов анализа и моделирования технологических систем. Вместе с тем, их интеграция с системами анализа фрактальных флуктуаций в сложных системах требует дальнейшего развития методологических основ и практической реализации.

АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Одним из основных элементов сложных систем является фрактал. Концепция фрактала была введена Бенуа Мандельбротом в 1975 г. для обозначения геометрических форм, которые проявляют высокую степень самоподобия и широко распространены в природе [1]. Понятие фрактала было введено от латинского слова "fractus", означающего фрагментированный или разбитый. Оно использовалось для описания объектов или явлений, проявляющихся схожие структуры на всех уровнях. Это определение фракталов Мандельброта, основанное на понятии самоподобия, стало основным.

Кеннет Фальконер определил фрактал как набор, для которого измерение Хаусдорфа-Безиковича строго превышает топологическую размерность [2], что математически строго и имеет

тенденцию исключать несколько объектов, обычно считающихся фракталами.

Джон Хатчинсон определяет фрактал как аттрактор итерированной функциональной системы (IFS) [3], подчеркивая генеративный аспект фракталов, концепция которого используется в компьютерной графике и сжатии изображений [18, 19].

Эдгар Петерс утверждал, что фракталы больше связаны с типом поведения, чем с геометрией как таковой. По его мнению, фракталом является любой процесс, который производит "1/f шум", или статистически самоподобные паттерны [4]. Такое определение подчеркивает важность фракталов для понимания естественных явлений, таких как турбулентность в жидкостях или колебания цен на активы.

Основные концепции фрактальной теории обусловлены ее универсальностью и междисциплинарностью, фракталы играют ключевую роль во многих областях науки и техники, включая физику, математику, биологию, экономику [15, 16, 17], информационные технологии и системный анализ [5]. Несмотря на важность и универсальность фракталов, многие аспекты их применения до сих пор остаются недостаточно исследованными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИИ

Свойства и характеристики фракталов отличаются и многообразны, что стало предметом множества научных исследований и дискуссий на протяжении многих лет. Основное и наиболее часто встречающееся свойство фрактала - это самоподобие или инвариантность относительно масштаба, впервые сформулированное Бенуа Мандельбротом [1]. Это свойство фрактала отражает похожие паттерны на всех масштабах, независимо от того, увеличены они или уменьшены. Самоподобие фракталов используется для понимания и прогнозирования поведения сложных технических систем. Поскольку фракталы демонстрируют похожие образцы на всех масштабах, они представляют собой мощный инструмент для моделирования компонентов системы на различных уровнях иерархии [1]. Принцип самоподобия был применен к изучению трафика компьютерных сетей, где пакеты данных проявляют фрактальное поведение со временем.

Еще одно ключевое свойство фракталов - это их фрактальная размерность. В отличие от обычных геометрических форм, фракталы часто имеют нецелые размерности, которые являются количественной мерой их сложности и могут превышать их топологическую размерность [1]. Фрактальную размерность часто вычисляют с помощью таких методов, как подсчет ящиков или размерность Хаусдорфа, введенной Хаусдорфом

и дальше развитой Фальконером [2] (1990). Эта мера используется для оценки сложности или нерегулярности в поведении или структуре системы, в частности при анализе программных систем для измерения их структурной сложности и прогнозирования потенциальных точек сбоя.

Фракталы обладают свойством бесконечной детализации или тонкой структуры [18, 19]. Это означает, что независимо от того, насколько сильно увеличивать фрактал, всегда будет бесконечное количество деталей для наблюдения. Эта характеристика отражает глубину и бесконечную сложность фракталов [6]. Свойство бесконечной детализации или тонкой структуры фракталов используется в техниках сжатия данных в системах информации и связи. Поскольку фракталы могут представлять сложные образцы с помощью простых, рекурсивных правил, то они применяются в алгоритмах сжатия изображений и сигналов для уменьшения размера данных, сохраняя при этом качество [6].

Следующим свойством, которым обладают фракталы - это свойство неправильности (нерегулярности). В отличие от традиционных геометрических форм, которые имеют гладкие и предсказуемые границы, фракталы обладают неправильными и часто фрагментированными границами. Снежинка Коха и граница множества Мандельброта - примеры такого свойства. Его используют при проектировании антенн для беспроводных коммуникационных систем. Использование фрактальной геометрии в дизайне антенн приводит к более маленьким, более эффективным антеннам, которые работают на нескольких частотных диапазонах.

Свойство рекурсии или итерации является фундаментальным для фракталов. Большинство фракталов генерируются простым правилом или процессом, который повторяется снова и снова. Эта итеративная или рекурсивная природа лежит в основе генерации самоподобных фракталов, что используется в итеративном проектировании и оптимизации сложных технических систем. Применяя простые, повторяющиеся правила, методы на основе фракталов могут генерировать и оценивать широкий спектр вариантов дизайна систем, что потенциально может привести к более эффективным и эффективным дизайнам систем.

Хаотическая динамика также является ключевым понятием, связанным с фракталами. Часто фракталы являются графическим представлением хаотических систем, как показано в работах Лоренца [7] и Руэля [8] в области динамических систем. Эти исследования показывают, как нерегулярное, но детерминированное поведение хаотических систем можно охарактеризовать с помощью фрактальной геометрии. Фракталы

тесно связаны с концепцией случайности и случайных процессов, при этом случайные фракталы играют жизненно важную роль в различных областях. Мандельброт [1] использовал фракталы для моделирования данных временных рядов.

Концепция масштабной инвариантности, когда статистические свойства явления остаются постоянными в разных масштабах, является неотъемлемой частью теории фракталов. Это нашло особое значение в области геофизики, где распределение геологических объектов, таких как линии разломов, проявляет масштабно-инвариантные свойства [9, 20].

Все эти свойства подчеркивают уникальную сложность фракталов и их значительное отличие от традиционных геометрических понятий, открывают целый ряд возможностей для моделирования реальных явлений, которые проявляют подобные характеристики, от природных ландшафтов до сложных технических систем.

Классификация фракталов остается предметом научного интереса и обсуждения. Существует несколько общепринятых категорий, на основе которых производится классификация фракталов в научной литературе.

По своей природе фракталы могут быть поделены на детерминированные и случайные [1]. Детерминированные фракталы, как правило, порождаются простыми и точно определенными правилами. Сюда входят классические геометрические фракталы, такие как множество Мандельброта или фрактал Коха. Случайные фракталы, с другой стороны, формируются при помощи стохастических процессов и обычно описываются статистическими распределениями [2, 21].

По своей структуре, фракталы также могут быть разделены на самоподобные и самоаффинные. Самоподобные фракталы сохраняют свою форму независимо от масштаба (то есть они выглядят одинаково при любом увеличении), в то время как самоаффинные фракталы изменяют свою форму в зависимости от масштаба, но сохраняют определенные аспекты своей структуры [6, 22].

Кроме того, можно выделить еще одну категорию - физические фракталы. Эти фракталы представляют собой модели реальных объектов или процессов, которые обладают фрактальной структурой на определенном интервале масштабов. Примером могут служить облака, горные ландшафты или береговые линии, структура которых при определенных масштабах может быть описана как фрактальная [9, 23].

Преимуществом разных классификаций позволяет исследователям выбирать более подходящую классификацию в зависимости от объема

исследования [1, 2, 6, 9]. Однако отсутствие единой классификации может привести к несогласованности при сравнении и анализе результатов различных исследований.

Авторами исследования предлагается более расширенная классификация фракталов. Каждая категория в этой классификации не исключает другие, а дополняет их, позволяя более глубокое и точное понимание фракталов.

1. По природе генерации:

1.1. Детерминированные фракталы, то есть те, которые строятся по определенным правилам или алгоритмам. Этот класс включает самоподобные фракталы, такие как треугольник Серпинского, ковёр Серпинского, множество Мандельброта.

1.2. Случайные фракталы - фракталы, которые генерируются по случайным процессам. Примером может служить броуновское движение.

2. По структуре:

2.1. Самоподобные фракталы - фракталы, которые структуру, повторяющаяся при увеличении. Примером может служить множество Кантора.

2.2. Самоаффинные фракталы - фракталы, которые повторяют структуру при растяжении или сжатии вдоль разных осей. Примером может служить множество Мандельброта.

3. По области применения:

3.1. Теоретические фракталы - фракталы, которые используются в теоретических исследованиях и моделировании.

3.2. Практические (реальные) фракталы - фракталы, которые используются в конкретных областях, таких как геология, биология, физика, компьютерная графика, и многие другие.

4. По уровню самоподобия:

4.1. Строго самоподобные фракталы - фракталы, которые являются идентичными при увеличении.

4.2. Статистически самоподобные фракталы - фракталы, которые выглядят одинаково на всех уровнях масштаба в статистическом смысле.

5. По математическому дифференцированию:

5.1. Алгебраические фракталы - фракталы, полученные из алгебраических уравнений (множества Мандельброта и множества Жюлиа).

5.2. Геометрические фракталы - фракталы, созданные путем применения геометрических правил или преобразований, таких как кривая Коха или треугольник Серпинского.

6. По размерности:

6.1. Одномерные фракталы — фракталы, простирающиеся бесконечно в одном измерении, такие как пыль Кантора.

6.2. Двумерные фракталы — фракталы, бесконечно простирающиеся в двух измерениях,

такие как треугольник Серпинского или множество Мандельброта.

6.3. Трёхмерные фракталы — фракталы, простирающиеся бесконечно в трех измерениях, такие как губка Менгера.

7. По уровню сложности:

7.1. Простые фракталы — фракталы, которые генерируются простыми правилами или уравнениями, такими как кривая Коха.

7.2. Сложные фракталы — фракталы, которые генерируются сложными правилами или уравнениями, такими как множество Мандельброта.

8. По характеру своих границ:

8.1. Фракталы с гладкими границами — фракталы, края или границы которых гладкие при просмотре в любом масштабе.

8.2. Фракталы с фрактальными границами — фракталы, края или границы которых сами по себе являются фрактальными по своей природе.

Существующие классификации фракталов, несмотря на их значительный вклад в исследование и применение фрактальной теории, обычно ограничиваются разделением фракталов на детерминированные и случайные, или на самоподобные и самоаффинные. В то время как для изучения их математических свойств и генерирующих механизмов, они не всегда отражают их разнообразие и сложность в полной мере.

Предлагаемая авторами классификация вводит дополнительные категории и делает акцент на различных аспектах природы фракталов. Она расширяет пространство для научного анализа, обеспечивая четкие категории, что позволяет исследователям идентифицировать, сравнивать и контрастировать различные виды фракталов с более высокой точностью.

В частности, включение категории "По области применения" позволяет учесть практическую значимость фракталов и их роль в различных научных и технических дисциплинах, от геологии и биологии до физики и компьютерной графики. Фракталы являются не только математическим инструментом или абстрактным понятием, но и ключевым элементом многих реальных систем и процессов. Категория "По уровню самоподобия" позволяет более точно охарактеризовать структуру фракталов и их поведение на различных масштабах, что важно при анализе фрактальных флуктуаций в сложных технических системах, где степень и природа самоподобия могут оказывать существенное влияние на общую эффективность и надежность системы. Разделение фракталов по математическому дифференцированию облегчает понимание связей между различными типами фракталов и основывающимися на них математическими принципами, что позволяет

разрабатывать новые методы и подходы в фрактальном анализе. Разделение фракталов по размерности необходимо в компьютерном моделировании. Таким образом, с одной стороны предложенная классификация сохраняет ключевые элементы существующих подходов, с другой - предлагает глубокий и всеобъемлющий взгляд на фракталы, их свойства и природу.

Однако в системном анализе, существуют области, где потенциал фракталов пока не в полной мере реализован. Одной из таких областей является анализ временных рядов, где применение фрактального анализа позволяет выявлять сложные закономерности, скрытые за шумами и неоднородностями данных [10, 24]. Несмотря на наличие различных методов фрактального анализа, по-прежнему нет единого подхода к анализу фрактальных структур в данных временных рядов.

Еще одной недостаточно исследованной областью является применение фракталов для анализа пространственных структур, например, в географии или экологии. В то время как применение фракталов для анализа пространственных структур уже демонстрировало свою полезность [1], существуют сложности, связанные с интерпретацией получаемых результатов, а также с выбором подходящего метода для конкретных задач.

Можно выделить несколько ключевых направлений, в которых существуют открытые вопросы и проблемы, требующие дальнейшего исследования применения фракталов в системном анализе.

1. Необходимость совершенствования существующих и создания новых методов и техник фрактального анализа, которые были бы универсальны и могли бы применяться в самых разных областях. Даже в одной и той же области могут быть необходимы разные методы в зависимости от специфики исследуемой проблемы.

2. Неоднозначность вопроса интерпретации результатов фрактального анализа. Фракталы позволяют выявить скрытые структуры и зависимости в данных. Однако, во многих случаях, понять, что именно эти структуры и зависимости означают в контексте конкретной проблемы, достаточно сложно [11, 25].

3. Сложность вопроса использования фракталов для прогнозирования. Хотя фракталы могут выявлять скрытые закономерности в данных, использование этих закономерностей для создания прогностических моделей – это отдельная и сложная задача, требующая дальнейших исследований [10, 26].

4. Вопрос об идентификации и оценке фрактальных структур в многомерных и сложно структурированных данных. Современные интеллектуальные технологии сбора и анализа данных

позволяют собирать и обрабатывать огромные объемы многомерных данных, однако, использование фракталов для анализа таких данных – это нерешенная проблема [2].

5. Понимание того, как фрактальные структуры взаимодействуют с другими структурами и процессами в системах. Фрактальность является лишь одной из многих характеристик сложных систем, и понимание того, как она взаимодействует с другими характеристиками, может быть ключевым для понимания сложных систем в целом [12].

Для нахождения фрактальных паттернов в сложных технических системах необходимо проанализировать их с точки зрения этимологии и функционала. К сложным техническим системам относятся к сложным конструкциям взаимосвязанных и взаимосвязанных компонентов, которые работают вместе для достижения определенных целей. Такие системы часто характеризуются многочисленными взаимодействующими элементами, нелинейностью, эмерджентными свойствами и адаптивностью [13].

Сложные технические системы включают, но не ограничиваются транспортными сетями, телекоммуникационными системами, электрическими сетями и автоматизированными производственными системами. Такие системы обычно организованы в виде уровней подсистем, каждая из которых имеет свои определенные функции и назначение, и все они работают синергетически для достижения общих целей системы. Сбой или изменение в одной части системы может значительно повлиять на производительность всей системы, часто непредсказуемым образом из-за нелинейных механизмов обратной связи.

Более того, эмерджентные свойства сложных технических систем, то есть свойства, которые не проявляются из характеристик отдельных компонентов, а проявляются в результате их взаимодействия, усложняют их. Их часто трудно предсказать и управлять ими, поскольку они могут быть очень чувствительны к начальным условиям системы и взаимодействиям между ее компонентами.

Сложные технические системы являются адаптируемыми, могут изменять свою структуру и поведение в ответ на внешние стимулы или внутренние изменения, чтобы сохранить свою функциональность или улучшить свою работу. Эта приспособляемость часто является результатом механизмов обратной связи, которые позволяют системе учиться на своем опыте и соответствующим образом корректировать свое поведение.

Сложные технические системы, такие как телекоммуникационные сети, электрические сети или транспортные системы, обычно характеризуются

ются высоким уровнем взаимосвязанности, динамизма и иерархической организации [14]. Многие из этих систем демонстрируют фрактальные или самоподобные характеристики как в своей структуре, так и в динамике, что имеет большое значение для их анализа, проектирования и работы.

Фрактальная природа сложных технических систем также была впервые отмечена Мандельбротом, который предположил, что «геометрия природы» часто более точно описывается фрактальными геометриями, чем традиционными евклидовыми геометриями. С тех пор наблюдалась фрактальная структура множества сложных технических систем, от распределения узлов Интернета до моделей движения городских дорожных сетей.

Фрактальная природа может естественным образом возникать в сложных технических системах из-за таких процессов, как предпочтительное присоединение, когда новые узлы в сети предпочитают подключаться к уже хорошо связанным узлам, что приводит к степенному закону распределения узлов, градусов и фрактальной сетевой структуры [27].

Фрактальные характеристики имеют важное значение для функционирования и управления сложными техническими системами. Они могут приводить к возникающим явлениям, таким как «безмасштабное» поведение, когда определенные свойства системы, такие как ее надежность или уязвимость к сбоям, не зависят от размера системы. Другое явление - это «дальнодействующие» корреляции или зависимости, когда события или сбои в одной части системы могут влиять на события в удаленных частях системы. Понимание фрактальной природы сложных технических систем необходимы в их проектировании и управлении. Например, фрактальные методы использовались для оптимизации схемы транспортных сетей и для разработки более эффективных протоколов связи.

Авторами предлагается определение фрактала в сложной технической системе как представляющего собой интегральную структуру, характеризующуюся свойством самоподобия и масштабной инвариантности, означающего сохранение ее геометрической или математической структуры на всех уровнях масштаба, и служащего ключевым инструментом для моделирования, анализа и оптимизации системных характеристик и поведения, обеспечивая глубокое понимание и управление сложностью системы.

Одной из ключевых задач является разработка более совершенных моделей и алгоритмов, которые могут фиксировать и использовать преимущества фрактальной природы сложных технических систем. Другой проблемой является понимание того, как фрактальные свойства этих систем

меняются со временем, особенно в ответ на изменения в окружающей среде или условиях работы системы. Для решения таких научных пробелов необходимо проанализировать влияние фрактальной природы сложных технических систем на их надежность, адаптивность и эффективность.

1. Прочность - фрактальная структура многих сложных технических систем обеспечивает высокую степень надежности. Это связано с их избыточными путями и распределенной структурой, которая обеспечивает несколько маршрутов для процессов и потока информации и позволяет им продолжать функционировать в условиях частичных сбоев. Однако одни и те же структуры могут также представлять уязвимость. Например, во многих фрактальных сетях небольшое количество тесно связанных узлов часто играет непропорционально большую роль в поддержании связности сети. Целенаправленные атаки или отказы этих узлов могут привести к быстрому выходу из строя всей сети.
2. Адаптивность - фрактальные структуры легко адаптируются. Их можно легко увеличивать или уменьшать, что делает их подходящими для увеличения или уменьшения в зависимости от потребностей системы. Более того, из-за их самоподобия локальные изменения или оптимизации могут быть преобразованы в глобальные изменения или оптимизации, которые могут помочь улучшить общую производительность или эффективность системы.
3. Эффективность многих сложных технических систем связана с их фрактальной структурой. В системах транспортировки и распределения фрактальная сеть может гарантировать, что товары или люди могут быть перемещены из любой точки сети в любую другую с относительно небольшим количеством перемещений или шагов. Это может привести к значительному сокращению времени в пути или транспортных расходов.

Взаимосвязь между фрактальностью и эффективностью не всегда прямолинейна и может зависеть от различных факторов, таких как характер процессов, происходящих в сети, и конкретных ограничений или требований системы. Более того, в некоторых случаях попытки оптимизировать эффективность могут нарушить фрактальную структуру системы и привести к непредвиденным последствиям, таким как повышенная уязвимость к сбоям или сбоям.

Моделирование и анализ сложных технических систем с использованием фракталов предоставляют уникальную возможность раскрыть глубокие, инвариантные по масштабу свойства в данных, генерируемых этими системами. Такой подход часто выявляет свойственные слож-

ным системам самоподобие и нелинейные динамики, которые не обнаруживаются с помощью традиционных аналитических инструментов. Одним из преимуществ фрактального моделирования является возможность моделирования сложных явлений, которые иначе трудно уловить с помощью традиционных линейных моделей. Фракталы по своей природе включают нелинейность и помогают моделировать сложные, нелинейные явления с высокой точностью. Однако заметным недостатком является значительная вычислительная мощность, необходимая для генерации и анализа фрактальных моделей, особенно в больших измерениях. Кроме того, интерпретация результатов может быть непривычной из-за неявной сложности и нелинейного характера фракталов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование фракталов в системном анализе для сложных технических систем представляет собой устойчивый методологический подход, приобретающий актуальность из-за внутренней сложности, присущей множеству физических, технических, биологических и социальных систем. Применение фракталов в системном анализе не лишено ограничений и требует тщательного выбора подходящих методов фрактального анализа, адаптированных к уникальным характеристикам каждой рассматриваемой системы. Ана-

лиз сетевого трафика может потребовать использования иных методов, чем те, которые применяются для анализа транспортной системы, из-за специфической природы этих сигналов. Более того, хотя фрактальный анализ может раскрыть структуру системы, интерпретация этих результатов в контексте функционирования системы может представлять существенную трудность.

Поэтому в качестве дальнейшего направления для научных исследований возможна разработка новых методик, специально предназначенных для фрактального анализа различных типов систем, а также исследование синергии между фрактальным анализом и другими вычислительными и математическими методиками. Это расширит понимание сложных технических систем и приведет к разработке более надежных, адаптивных и эффективных систем.

Настоящее исследование подчеркивает важность более детального изучения роли фракталов в конкретных подобластях системного анализа и использование роли и потенциала фрактального анализа как инструмента для понимания сложных технических систем.

*Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.*

The authors declare no conflict of interest.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mandelbrot B.B.** Les objets fractals: forme, hasard et dimension. Paris: Flammarion. 1975. 190 p.
2. **Falconer K.** Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. Chichester, England: John Wiley & Sons. 1990. 288 p.
3. **Hutchinson J.E.** Fractals and self-similarity. *Indiana University Mathematics Journal*. 1981. N30(5). P. 713-747.
4. **Peters E.** Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics. Wiley. 1994. 336 p.
5. **Bunde A., Havlin S.** Fractals in Science. Berlin: Springer. 1994. 298 p.
6. **Barnsley M.** Fractals Everywhere. San Diego, CA: Academic Press. 1988. 394 p.
7. **Lorenz E.N.** Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. N 20. P.130-141.
8. **Ruelle D.** Elements of Differentiable Dynamics and Bifurcation Theory. Academic Press, Inc. 1989. 196 p.
9. **Turcotte D.L.** Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press. 1997. 398 p.
10. **Kantelhardt J.W., Zschiegner S.A., Koscielny-Bunde E., Havlin S., Bunde A., Stanley H.E.** Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Nonstationary Time Series. DOI: 10.48550/arXiv.physics/0202070.
11. **Plotnick R.E., Gardner R.H., O'Neill R.V.** Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology*. 1996. N 11 (3). P.153-162.
12. **Stanley H.E., Meakin P.** Multifractal phenomena in physics and chemistry. *Nature*. 1988. N 335(6189). P.405-409.
13. **Dougherty E.R., Dunne J.A.** Epistemology of the cell: a systems perspective on biological knowledge. Wiley - IEEE Press. 2011. 216 p.

REFERENCES

1. **Mandelbrot B.B.** Les objets fractals: forme, hasard et dimension. Paris: Flammarion. 1975. 190 p.
2. **Falconer K.** Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. Chichester, England: John Wiley & Sons. 1990. 288 p.
3. **Hutchinson J.E.** Fractals and self-similarity. *Indiana University Mathematics Journal*. 1981. N30(5). P. 713-747.
4. **Peters E.** Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics. Wiley. 1994. 336 p.
5. **Bunde A., Havlin S.** Fractals in Science. Berlin: Springer. 1994. 298 p.
6. **Barnsley M.** Fractals Everywhere. San Diego, CA: Academic Press. 1988. 394 p.
7. **Lorenz E.N.** Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. N 20. P.130-141.
8. **Ruelle D.** Elements of Differentiable Dynamics and Bifurcation Theory. Academic Press, Inc. 1989. 196 p.
9. **Turcotte D.L.** Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press. 1997. 398 p.
10. **Kantelhardt J.W., Zschiegner S.A., Koscielny-Bunde E., Havlin S., Bunde A., Stanley H.E.** Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Nonstationary Time Series. DOI: 10.48550/arXiv.physics/0202070.
11. **Plotnick R.E., Gardner R.H., O'Neill R.V.** Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology*. 1996. N 11 (3). P.153-162.
12. **Stanley H.E., Meakin P.** Multifractal phenomena in physics and chemistry. *Nature*. 1988. N 335(6189). P.405-409.
13. **Dougherty E.R., Dunne J.A.** Epistemology of the cell: a systems perspective on biological knowledge. Wiley - IEEE Press. 2011. 216 p.

14. **Валуев А.А., Горев С.В., Миккульский А.А.** Патент на полезную модель № 119968 U1 Российская Федерация, МПК H04M 11/06. Многофункциональный носимый прибор связи на железной дороге: №011153817/07. Заявитель Открытое акционерное общество "Российские железные дороги". EDN OBTXME.
14. **Valuev A.A., Gorev S.V., Mikulsky A.A.** Utility Model Patent N 119968 U1 Russian Federation, IPC H04M 11/06. Multifunctional wearable communication device for railway use: N 2011153817/07. Applicant Open Joint Stock Company "Russian Railways". EDN OBTXME. (in Russian).
15. **Горев С.В., Кутузова А.С.** Анализ практики налогообложения сделок с предметами искусства. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством»*. 2021. № 2(48). С. 23-28. DOI: 10.6060/ivecofin.2021482.530. EDN IAXQHX.
15. **Gorev S.V., Kutuzova A.S.** Analysis of Taxation Practices for Art Object Transactions. *Ivecofin*. 2021. N2(48). P. 23-28. DOI: 10.6060/ivecofin.2021482.530. EDN IAXQHX. (in Russian).
16. **Горев С.В., Кутузова А.С.** Практический инструментарий для оценки стоимости предметов искусства. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством»*. 2021. № 1(47). С. 6-13. DOI: 10.6060/ivecofin.20214701.511.
16. **Gorev S.V., Kutuzova A.S.** Practical Toolkit for Valuation of Art Objects. *Ivecofin*. 2021. N 1(47). P. 6-13. DOI: 10.6060/ivecofin.20214701.511. (in Russian).
17. **Астраханцева И.А., Кутузова А.С., Астраханцев Р.Г.** Рекуррентная нейронная сеть в прогнозировании региональной инфляции. *Научные труды Вольного экономического общества России*. 2020. №223. С. 420-431.
17. **Astrakhtantseva I.A., Kutuzova A.S., Astrakhtantsev R.G.** Recurrent neural network in regional inflation forecasting. *Scientific Proceedings of the Free Economic Society of Russia*. 2020. N 223. P. 420-431. (in Russian).
18. **Астраханцева И.А., Астраханцев Р.Г.** Экономическая сущность и правовой статус криптовалют. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством»*. 2020. № 4 (46). С. 3-13.
18. **Astrakhtantseva I.A., Astrakhtantsev R.G.** Economic essence and legal status of cryptocurrencies. *Ivecofin*. 2020. N 4 (46). P. 3-13. (in Russian).
19. **Астраханцева И.А., Кутузова А.С., Астраханцев Р.Г.** Интеллектуальные методы обработки данных при прогнозировании оборота наличных денежных средств в банкоматах коммерческих банков. *Научные труды Вольного экономического общества России*. 2019. Т. 218. № 4. С. 481-488.
19. **Astrakhtantseva I.A., Kutuzova A.S., Astrakhtantsev R.G.** Intellectual Methods of Data Processing in Forecasting Cash Turnover in ATMs of Commercial Banks. *Scientific Proceedings of the Free Economic Society of Russia*. 2019. Vol. 218. N 4. P. 481-488. (in Russian).
20. **Akhmatov Kh.A., Astrakhtantseva I.A., Kutuzova A.S., Votchel L.M., Vikulina V.V.** Harmonization of banking business models with the needs of the economy by encouraging the exogenous social responsibility. *Journal Quality-Access to Success*. 2020. Vol. 21. N 174. P.81-87.
20. **Akhmatov Kh.A., Astrakhtantseva I.A., Kutuzova A.S., Votchel L.M., Vikulina V.V.** Harmonization of banking business models with the needs of the economy by encouraging the exogenous social responsibility. *Journal Quality-Access to Success*. 2020. Vol. 21. N 174. P.81-87.
21. **Бобков С.П., Астраханцева И.А., Галиаскаров Э.Г.** Применение системного подхода при разработке математических моделей. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 1(65). С. 66-71. DOI: 10.6060/snt.20216501.0008. EDN KOXZWY.
21. **Bobkov S.P., Astrakhtantseva I.A., Galiaskarov E.G.** Application of a system approach in developing mathematical models. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2021. N 1(65). P. 66-71. DOI: 10.6060/snt.20216501.0008. EDN KOXZWY. (in Russian).
22. **Бобков С.П., Астраханцева И.А., Волков В.С.** Имитационное моделирование системы массового обслуживания с целью анализа ее работы. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 3(67). С.58-62. DOI: 10.6060/snt.20216703.0008. EDN TZQQYN.
22. **Bobkov S.P., Astrakhtantseva I.A., Volkov V.S.** Simulation of the queuing system for the purpose of analysis of its work. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2021. N 3(67). P. 58-62. DOI: 10.6060/snt.20216703.0008. EDN TZQQYN. (in Russian).
23. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Использование вероятностных клеточных автоматов для моделирования течения жидкости. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 2(70). С. 47-54. DOI: 10.6060/snt.20227002.0006. EDN ZMAHGM.
23. **Bobkov S.P., Astrakhtantseva I.A.** Using probabilistic cellular automata for liquid flow simulation. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2022. N 2(70). P. 47-54. DOI: 10.6060/snt.20227002.0006. EDN ZMAHGM. (in Russian).
24. **Бобков С.П., Астраханцева И.А., Павлова Е.А.** Имитационное моделирование для интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 1(69). С. 61-69. DOI: 10.6060/snt.20226901.0008. EDN VIOOGK.
24. **Bobkov S.P., Astrakhtantseva I.A., Pavlova E.A.** Simulation modeling for intellectual support of management decisions acceptance. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2022. N 1(69). P. 61-69. DOI: 10.6060/snt.20226901.0008. EDN VIOOGK. (in Russian).
25. **Бобков С.П., Галиаскаров Е.Г., Астраханцева И.А.** The use of cellular automata systems for simulation of transfer processes in a non-uniform area. CEUR Workshop Proceedings. Moscow, 2021. EDN WZMKHE.
25. **Bobkov S.P., Galiaskarov E.G., Astrakhtantseva I.A.** The use of cellular automata systems for simulation of transfer processes in a non-uniform area. CEUR Workshop Proceedings. Moscow, 2021. EDN WZMKHE.
26. **Астраханцева И.А., Астраханцев Р.Г., Митин А.В.** Randomized C/C++ dynamic memory allocator. *Journal of Physics: Conference Series: 2*. Moscow. 2021. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2001/1/012006. EDN POZQDG.
26. **Astrakhtantseva I.A., Astrakhtantsev R.G., Mitin A.V.** Randomized C/C++ dynamic memory allocator. *Journal of Physics: Conference Series: 2*. Moscow. 2021. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2001/1/012006. EDN POZQDG.
27. **Астраханцева И., Кутузова А., Астраханцев Р.** Artificial Neural Networks in Inflation Forecasting at the Meso-Level. *SHS Web of Conferences: III International on New Industrialization and Digitalization (NID 2020)*. Ekaterinburg: EDP Sciences. 2021. P. 02005. DOI: 10.1051/shsconf/20219302005. EDN HXSSQJ.
27. **Astrakhtantseva I., Kutuzova A., Astrakhtantsev R.** Artificial Neural Networks in Inflation Forecasting at the Meso-Level. *SHS Web of Conferences: III International on New Industrialization and Digitalization (NID 2020)*. Ekaterinburg: EDP Sciences. 2021. P. 02005. DOI: 10.1051/shsconf/20219302005. EDN HXSSQJ.

Поступила в редакцию 22.07.2023
Принята к опубликованию 05.08.2023

Received 22.07.2023
Accepted 05.08.2023