

## ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

Астраханцева Ирина Александровна (ORCID 0000-0003-2841-8639), Горев Сергей Владимирович (ORCID 0000-0002-4370-9533), Астраханцев Роман Геннадьевич (ORCID 0000-0001-9880-2826) Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.  
E-mail: i.astrakhantseva@mail.ru, gorev@srosovet.ru, rgastrakhantsev@gmail.com

*В статье исследуется взаимосвязь между фрактальной структурой и ключевыми характеристиками сложных инженерных систем, такими как надежность, эффективность, прочность и адаптивность. Авторами предлагается классификация основных параметров системы. В отличие от традиционных классификаций авторский подход выделяет шесть основных категорий и акцентирует внимание на таких параметрах как адаптивность, интеграция и эффективность ресурсов. Авторы анализируют взаимосвязь между эффективностью и надежностью в системах, подчеркивая, что при проектировании и управлении инженерными системами необходим анализ рисков и последствий при выборе одного из параметров. В статье анализируются такие фундаментальные понятия как резервирование, избыточность, устойчивость к отказам и адаптивность, которые являются системообразующими при определении надежности и эффективности системы. Авторы анализируют применение этих принципов для транспортных потоков, акцентируя внимание на использование нелинейных динамических систем при организации и управлении такими системами. В статье предлагается использование фрактальных флуктуаций, то есть повторяющихся паттернов или структур данных, который сохраняют свой характер при изменении масштаба. Использование фрактального анализа к управлению инженерными системами позволяют разрабатывать более эффективные методы управления транспортом в отличие от линейных подходов. Классические традиционные подходы пренебрегают человеческим фактором, динамикой системы, ее адаптивностью в отличие от предлагаемых авторами инструментов моделирования многомерных динамических процессов. Предполагается, что системы с высоким уровнем самоподобия способны перераспределять свои ресурсы и функции для обеспечения стабильности в условиях волатильности внешних факторов.*

*Авторы представляют математический подход к оценке этих характеристик на основе фрактальной размерности системы. При изучении фрактальных временных данных учитываются задержки во времени и их влияние на систему. В статье представлены математические модели оценки функций надежности, с учетом фрактальной структуры, и подходы к прогнозированию этой надежности на основе экспоненциального сглаживания. Учет фрактальной структуры является ключевым вопросом при проектировании устойчивых, надежных и адаптивных систем.*

**Ключевые слова:** фракталы, сложные системы, надежность, экспоненциальное сглаживание, фрактальная размерность, прочность системы, адаптивность, масштабная инвариантность

## FRactal-based Analysis of Efficiency and Reliability in Complex Engineering Systems

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

Astrakhantseva Irina Alexandrovna (ORCID 0000-0003-2841-8639), Gorev Sergey Vladimirovich (ORCID 0000-0002-4370-9533), Astrakhantsev Roman Gennadievich (ORCID 0000-0001-9880-2826) Ivanovo State University of Chemical Technology, Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.  
E-mail: i.astrakhantseva@mail.ru, gorev@srosovet.ru, rgastrakhantsev@gmail.com

*The article explores the relationship between fractal structure and key characteristics of complex engineering systems, such as reliability, efficiency, durability, and adaptability. The authors propose a classification of the main system parameters. Unlike traditional classifications, the authors' approach highlights six main categories, emphasizing parameters like adaptability, integration, and resource efficiency. The authors analyze the interplay between efficiency and reliability in systems, emphasizing that engineering system design and management require risk and consequence analysis when choosing among parameters. Fundamental concepts such as redundancy, surplus, fail-safe design, and adaptability, which are pivotal in determining system reliability and efficiency, are discussed in the article. The authors delve into the application of these principles for transport flows, highlighting the use of nonlinear dynamic systems in organizing and managing such systems. The article suggests the utilization of fractal fluctuations, i.e., repetitive patterns or data structures that maintain their nature when scaled. Applying fractal analysis to engineering system management allows for the development of more efficient transport management methods than linear approaches. Classic traditional methods often neglect the human factor, system dynamics, and its adaptability, unlike the multidimensional dynamic process modeling tools proposed by the authors. It is hypothesized that highly self-similar systems can reallocate their resources and functions to maintain stability in the face of volatile external factors.*

*The authors present a mathematical approach to assess these characteristics based on the fractal dimension of the system. When studying fractal time data, time delays and their impact on the system are considered. The article introduces mathematical models for reliability function estimation, taking into account the fractal structure, and approaches to predict this reliability based on exponential smoothing. Recognizing the fractal structure is a pivotal aspect when designing resilient, reliable, and adaptive systems.*

**Keywords:** fractals, complex systems, reliability, exponential smoothing, fractal dimension, system strength, adaptability, scale invariance

## ВВЕДЕНИЕ

В современном и быстро меняющемся мире сложные технические системы занимают центральное место практически во сферах деятельности. Поэтому принципы эффективности и надежности этих систем выходят на передний план. От стабильной работы критически важных инфраструктур и надежности цифровых коммуникаций зависит их производительность, безопасность и качество жизни человека. С ростом сложности таких систем возрастает необходимость в применении новых подходов к их анализу. Нелинейность и динамичность современных сложных технических систем акцентируют необходимость применения концепции фракталов. Фрактальный анализ предоставляет методологию изучения сложных структур, которые присутствуют в сложных технических системах. Это позволяет более глубоко оценить механизмы адаптивности, надежности и эффективности инженерных систем [1, 2].

Целью настоящего исследования является анализ роли фрактальности в сложных технических системах, возможности использования фрактальных флуктуаций на эффективность, надежность и адаптивность структур. Объектом исследова-

ования представляются сложные технические системы и их фрактальные характеристики. При исследовании фрактальных свойств выявляются такие механизмы, которые недоступны при традиционных линейных методах анализа, игнорирующих динамику и изменчивость систем.

Исходными гипотезами исследования являются предположения, что фрактальные характеристики сложных технических систем имеют прямое влияние на их адаптивность, надежность и эффективность. Учет этих фрактальных свойств и использование величины фрактальной размерности дает возможность разработки более оптимальных методов анализа таких систем, что в свою очередь приводят к улучшению производительности и устойчивости сложных технических систем в различных областях применения.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В рамках исследования для изучения взаимосвязи между фрактальной структурой и параметрами сложных инженерных систем, такими как надежность, адаптивность и эффективность энергопотребления был применен комплексный методологический подход. Основное внимание уделяется исследованию, в котором использовались стохастические и детерминирован-

ные методы на основе трудов А.Н. Колмогорова и В.С. Пугачева [3, 4]. Эти методы позволяют моделировать случайные колебания системы и её основные детерминированные процессы.

Для изучения фрактальных структур авторы применили методы многомерного статистического анализа, которые включают в себя корреляционные методики и анализ фрактальной размерности. Такой подход дает возможность представить взаимосвязь между фрактальностью и основными характеристиками системы [5, 6].

Для повышения достоверности результатов и более высокой степени надежности применены такие статистические методы как временной анализ неполадок и экспоненциальное сглаживание. В классические статистические методы авторами был интегрирован фрактальный анализ, который математически связывает структурную сложность и надежность системы.

### АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Традиционно эффективность ассоциируется с оптимизацией в потреблении ресурсов при достижении целевых показателей, например, минимизация материальных, энергетических и временных затрат. Однако если рассматриваются сложные технические системы, которые работают в динамических условиях, то понятие эффективности будет включать в себя адаптивность к изменению внешних условий и быстрое реагирование на внешние шоки. Современные научные исследования рассматривают понятие эффективности сложных технических систем более широко и учитывают социальную ответственность экологическую и долгосрочную устойчивость. Такой интегративный подход рассматривает систему в целом, делает акцент как на оптимизации конкретных параметров, так и на переменных, которые влияют на долгосрочную эффективность системы в целом [7, 8].

Понятие надежности системы связано с вероятностью ее стабильной и безотказной работы в течение заданного периода времени при определенных условиях. Таким образом основной акцент системы делается на выполнение ее функция без сбоев и отказов. Следовательно, надежность определяется устойчивостью к отказам и неисправностям. В авиации надежность можно рассматриваться как стойкость к экстремальным погодным явлениям или техническим неисправностям. В современном мире сложные инженерные системы являются взаимосвязанными и взаимозависимыми. Поэтому в оценку надежности системы необходимо включать такие понятия как резилент-

ность и адаптивность, которые отражают способности технической системы восстанавливаться после сбоев и приспосабливаться к волатильным внешним условиям.

Между понятиями надежности и эффективности имеется обратная взаимосвязь, которая показывает, что максимизация одного из этих параметров приводит к минимизации другого. Высокая эффективность обеспечивается оптимизацией ресурсов, снижением издержек и ростом производительности системы. Это приводит к тому, что система настроена на работу в очень конкретных условиях и является уязвимой к внешним непрогнозируемым воздействиям. Если оценивать систему с точки зрения надежности, то наличие резервных блоков, избыточности и безопасности протоколов увеличивают операционные затраты на систему и снижают показатели эффективности в нормальных условиях работы. Следовательно, при проектировании систем обязателен анализ рисков и последствий выбора в пользу надежности или эффективности для гарантии долгосрочного функционирования сложной технической системы [9, 10]. Поэтому для нахождения оптимального соотношения между эффективностью и надежностью необходимо рассмотреть такие более глубокие параметры системы как резервирование, избыточность, устойчивость к отказам и адаптивность.

Резервирование в системе включает в себя наличие дублирующих элементов. Это позволяет ей функционировать даже при отказе ключевых элементов системы. При этом снижается риск полного выхода системы из строя. Резервирование делается для жизненно важных компонентов системы. Избыточность основывается на наличии дополнительных ресурсов или функций в системе. Она может активироваться при определенных условиях и охватывает систему в целом. Устойчивость к отказам определяется способностью системы сохранять функциональность при возникновении сбоев. Это достигается через сочетание резервирования и избыточности, а также методов диагностики отказов. Под адаптивностью понимается способность системы приспосабливаться к волатильным внешним условиям, сохраняя при этом функционал системы [11, 12]. Для оценки параметров эффективности и надежности в основном используются статистические методы. Они позволяют прогнозировать будущее поведение системы и обеспечивают анализ и интерпретацию данных о сбоях и отказах в прошлом. К таким инструментам относится регрессионный анализ и моделирование, под которым понимается

создание репрезентативных реальных систем. В зависимости от вида систем и явлений используются детерминированные и стохастические модели. Использование методом имитационного моделирования позволяет в виртуальной компьютерной среде проводить анализ изменений системы при различных сценариях. В авиастроении методы имитационного моделирования используются для тестирования аэродинамических характеристик без фактического прототипирования. Выявление зависимостей между компонентами сложной информационной инфраструктуры позволяет предотвратить отказы системы и провести оптимизацию ресурсов [13, 14]. Для продления жизненного цикла сложных технических систем и снижения рисков в промышленности используются методы прогнозирования обслуживания, основанные на анализе данных датчиков, которые позволяют минимизировать простои и предсказывать отказы работы оборудования. Так, в автомобильной промышленности датчики износа компонентов позволяют прогнозировать время замены запасных частей. В телекоммуникации для непрерывности предоставления услуг провайдеры используют резервирование и избыточность своих мощностей. Системы оптической передачи данных используют несколько маршрутов для передачи информации. При этом даже при повреждении одного из каналов связи обеспечивается сохранность информации. В авиации, где безопасность жизни является ключевой целью, используются строгие принципы надежности в системах управления полетами. Для предотвращения столкновений в воздухе в эти системы интегрировано множество датчиков и алгоритмов. Такая же ситуация и в энергетике. Для предотвращения отказов используются системы мониторинга, автоматизированные системы управления и резервирование. Например, атомные станции оборудованы системами аварийного охлаждения, которые автоматически активизируются при авариях [15, 16].

В управлении транспортными потоками применения принципов эффективности и надежности являются основополагающими при реализации инженерных и управленческих решений. Они проявляются на каждом этапе проектирования и управления системой. При проектировании транспортных средств большое внимание уделяется разработке систем безопасности, которые могут предотвратить или минимизировать последствия аварий. К ним относятся такие системы как системы автоматического торможения, контроля «мертвых» зон и стабилизации движения.

Например, внедрение в автомобили системы LiDAR-систем позволяет обеспечить функцию автономного вождения. Транспортная инфраструктура включает в себя дороги, мосты, тоннели, железнодорожные пути. Для повышения надежности этой инфраструктуры используются методы непрерывного мониторинга, такие как, например, датчики натяжения для мостов, которые позволяют определять их физическое состояние в реальном времени. При организации транспортных потоков современные технологии позволяют оптимизировать движение транспорта, оптимизировать трафик, уменьшать время в пути и снижать аварийность. Например, системы «умных» светофоров адаптируются к текущему трафику при помощи данных с датчиков и камер, которые установлены на перекрестках. Железнодорожный транспорт интегрирует системы связи и сигнализации с автоматическими системами контроля скорости для предотвращения столкновений. Системы определения местоположения (например, GPS и Глонасс) в реальном времени обеспечивают точное следование графикам движения [17, 18].

В связи с ростом сложности таких систем возрастает актуальность использования нелинейных динамических систем. Одним из таких методов является изучение фрактальных флуктуаций при управлении транспортными потоками. Их использование помогает прогнозировать аномалий в потоках (например, внезапные "заторы") и оптимизировать инфраструктурные решения.

Использование теории хаоса при изучении динамики транспортного потока помогает в разработке новых алгоритмов управления трафиком. Под фрактальными флуктуациями авторы предлагают понимать повторяющиеся паттерны или структуры в данных, которые сохраняют свой характер при изменении масштаба.

Для управления транспортными потоками примерами факторов, влияющих на движение могут быть отклики водителей на изменяющую дорожную ситуацию, динамика потоков на перекрестках и поведение в плотных потоках на автомагистралях.

Использование фрактальной геометрии при прогнозировании дает возможность выявить «точки перегиба» транспортных систем, в которых наблюдается максимальный риск пробок или других дисфункций. Имея такие данные возможно корректировать ситуацию, определять маршруты или устанавливать определённые скоростные режимы [19, 20].

Учет фрактальной структуры транспортных потоков возможно также использование при планировании инфраструктуры при построении адаптивных дорожных систем, которые будут эффективно реагировать на изменение внешних условий. Это будет способствовать оптимизации и повышению устойчивости транспортных систем [21, 22].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИИ**

В рамках научного исследования первостепенное значение приобретает систематизация и классификация ключевых параметров системы. Проанализированы существующие классификации, авторами предлагается следующая классификацию параметров системы.

Она представляет собой систематизацию ключевых параметров, которые влияют на эффективность и надежность сложных технических систем. Каждая категория выделена на основе общих характеристик или функциональных

аспектов, которые имеют значение при анализе и оптимизации систем (рис. 1.).

Предлагаемая классификация выделяет шесть основных категорий, которая выделяет категории, влияющие на функционирование системы, от структурных и операционных до ресурсных и адаптивных.

Традиционные классификации часто фокусируются на одном или нескольких параметрах, например, только на структурных или только на функциональных. Авторская классификация предлагает системный и комплексный подход. Включение таких параметров, как адаптивность, интеграция и эффективность ресурсов, делает классификацию актуальной для современных сложных технических систем, которые должны быть гибкими, интегрированными и ресурсоэффективными. Подчеркивается важность взаимодействия и обратной связи особенно при проектировании систем, которые часто упускаются из виду в традиционных классификациях.

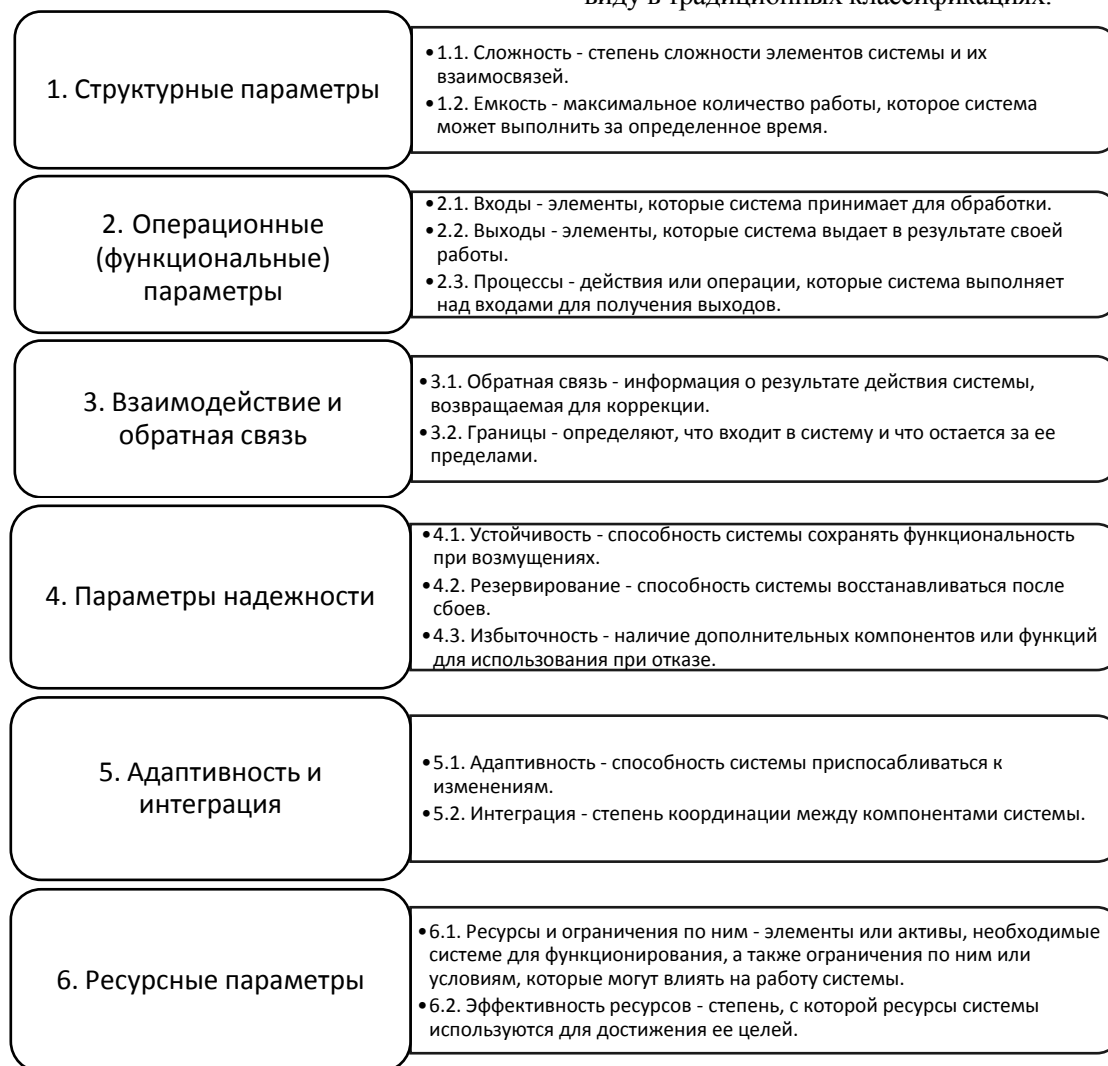


Рис. 1. Классификация параметров системы  
Fig. 1. Classification of system parameters

Оценка параметров, которые оценивают степень эффективности и надежности сложных технических систем зависит от интегрированного подхода, включающего в себя разные теоретические методологии. Тем не менее, многие из этих теорий обладают интринсечными ограничениями и предположениями, и сужают применимость, вводя при этом конфликтующие понятия. Традиционные методы оценки эффективности, как правило, базируются на линейных математических моделях. Это ограничивает их применимость к многокомпонентным системам, например, к современным промышленным установкам или транспортным инфраструктурам. Такие методики часто исключают из рассмотрения переменные, которые связаны с человеческим фактором, динамикой функционирования и адаптивной реакцией системы. Большая часть современных концепций в теории надежности фокусируется вокруг вероятностных методов и статистической обработки данных, тем самым обеспечивается учет стохастической природы отказов системы. Тем не менее, даже используя стохастические методы проявляются сложности из-за динамических изменений системы. Чаще всего эти изменения вызваны различными факторами, которые игнорируются в традиционных вероятностных моделях. Поэтому применение однородных моделей к разнообразным контекстам искажают исходные данные. Поэтому такие модели часто оставляют в стороне моделирование воздействия внешних рисков или человеческого фактора. Также не прогнозируется адаптивность системы при изменении условий окружающей среды.

Эффективность и надежность сложных технических систем связаны с вероятностными и статистическими методами. Однако последние исследования показывают новые подходы, которые учитывают сложности таких систем. Примером служит обнаружение фрактальных флуктуаций, которые показывают свойство самоподобия на разных уровнях в технических и социально-экономических системах. Анализ влияния фрактальных флуктуаций на ложные технические системы дает возможность ответить на такие вопросы как фрактальные свойства системы коррелируют с ее адаптивностью или каковы методы регулирования фрактальных изменений для повышения эффективности системы.

Для учета фрактальных особенностей сложных технических систем требуются методы, учитывающие измерение фрактальной размерности, корреляционный анализ и использование статистических методов, который включает времен-

ной анализ отказов и прогнозирование с использованием экспоненциального сглаживания. Интеграция фрактального анализа в традиционные методы оценки надежности и эффективности расширяет взаимодействие различных элементов сложности системы с их функциональными показателями. Это станет основой для проектирования и управления такими системами.

Фракталы представляют собой структуры, которые сохраняют самоподобие независимо от масштаба исследования. Такое свойство обнаруживается как в естественных объектах, например, в рельефе или облачности, так и в сложных инженерных системах, в которых интеракция между компонентами порождает фрактальные формы. Фрактальные параметры этих систем определяют их способность к адаптации к экстернальным условиям. Системы, которые обладают выраженным фрактальным свойством, могут реаллоцировать свои функциональные единицы и ресурсы, при этом поддерживать стабильность системы при воздействии внешних факторов. Система может перенаправлять ресурсы с одних задач на другие или менять роли отдельных компонентов в своей структуре, чтобы справиться с новыми внешними условиями.

Такой подход повышает надежность системы за счет ее адаптивности и резистентности к различным видам дестабилизации. Фрактальная конфигурация обеспечивает быстрый отклик на локальные функциональные сбои, тем самым сокращая их эффект на глобальную операционность системы. С точки зрения эффективности учет фрактальных характеристик системы дает инструмент оптимизации ресурсного распределения в соответствии с изменяющимися операционными потребностями. Это ведет к ресурсной экономии и повышению качества элементов, которые система выдает в результате своей работы.

Для количественной оценки этих свойств и лучшего понимания взаимосвязи между фрактальностью и адаптивностью систем, применяются математические подходы и моделирование фрактальных характеристик систем. Одной из основных характеристик фракталов является фрактальная размерность, которая дает количественное представление о степени "сложности" или "неровности" структуры. Фрактальную размерность ( $D$ ) можно определить с помощью следующей формулы:

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln(r)} \quad (1)$$

где  $N$  – количество самоподобных частей, на которые разбивается фрактал,  
 $r$  – масштабный коэффициент.

Проанализируем систему управления транспортными потоками в предположении, что плотность движения транспортных средств на автомагистрали имеет фрактальную структуру.

Оценим влияние фрактальных характеристик на адаптивность системы через анализ временных рядов плотности движения и их фрактальной размерности. Учет фрактальных характеристик в системе повысит ее надежность. Предположим, что отказ одного из компонентов системы приводит к перераспределению нагрузки на другие компоненты. Если этот процесс имеет фрактальную природу, можно использовать формулу (1) для определения оптимального распределения ресурсов, минимизируя риск глобального отказа.

$$D_b = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N(\epsilon))}{\ln(\frac{1}{\epsilon})} \quad (2)$$

где  $N(\epsilon)$  - это количество самоподобных частей размером  $\epsilon$ , которые необходимы для покрытия фрактальной структуры.

Корреляционная функция для фрактального временного ряда  $X(t)$  может быть определена как:

$$C(\tau) = \quad (3)$$

где  $\tau$  - временная задержка или лаг,

$\langle \rangle$  - математическое ожидание.

Для оценки надежности систем системы с учетом фрактальной структуры для начала определим функцию надежности  $R(t)$  в контексте времени анализа неполадок:

$$R(t) = P(T > t) \quad (4)$$

где  $T$  — это случайная величина, представляющая время до отказа.

Используя экспоненциальное сглаживание, прогнозируемое значение функции надежности в момент времени  $t+1$  определяется как

$$R(t+1) = \alpha \cdot R(t) + (1-\alpha) \cdot F(t) \quad (5)$$

где  $F(t)$  - текущая оценка функции надежности на основе наблюдаемых данных,

$\alpha$  - параметр сглаживания в диапазоне от 0 до 1.

Интегрируя фрактальный анализ, можно ввести поправочный коэффициент на основе фрактальной размерности  $D_b$ , чтобы учитывать структурную сложность системы:

$$R_{adjusted}(t+1) = [1 + f(D_b)] \cdot R(t+1) \quad (6)$$

где функция  $f(D_b)$  оценивает, насколько фрактальная структура системы влияет на ее надежность.

Прочность системы также зависит от ее фрактальной структуры.

Эти формулы предоставляют основу для количественной оценки фрактальной природы систем и ее влияния на функционирование и надежность системы. Предполагается, что прочность системы уменьшается из-за возрастания "разрывов" или "пустот" в структуре. Формула для этой

зависимости представляется следующим образом

$$P(S) = P_0 e^{-kD_b} \quad (7)$$

где  $P(S)$  – прочность системы,

$P_0$  — начальная прочность системы (без учета фрактальной структуры),

$D_b$  — фрактальная размерность системы,

$k$  — коэффициент, который определяет чувствительность прочности к изменению фрактальной размерности.

Эффективность функционирования системы также может зависеть от ее фрактальной структуры. Рассмотрим функционирование системы в зависимости от ее энергетического потребления.

$$E(F) = E_0(1 + mD_b) \quad (8)$$

где  $E(F)$  — энергетическое потребление системы при функционировании,

$E_0$  - базовое энергетическое потребление (без учета фрактальной структуры),

$m$  - коэффициент, определяющий влияние фрактальной структуры на энергетическое потребление.

Фрактальные системы обычно обладают высокой адаптивностью. Для количественной оценки этой адаптивности можно ввести коэффициент адаптивности  $A$ , который зависит от фрактальной размерности.

$$A = A_0(1 + nD_b^2) \quad (9)$$

где  $A_0$  - базовый коэффициент адаптивности (без учета фрактальной структуры),

$n$  - коэффициент, определяющий влияние фрактальной структуры на адаптивность.

Системы с фрактальной структурой обладают уникальными характеристиками, которые влияют на их функционирование, надежность и эффективность. Для количественной характеристики этого влияния необходимо учитывать фрактальную размерность  $D_b$ . Функция надежности  $R(t)$  подвергается коррекции с учетом фрактальной размерности, что позволяет получить дополнительную информацию о стабильности системы. Аналогично, параметры, такие как прочность системы  $P(S)$  и эффективность  $E(F)$ , определяются с учетом фрактальной структуры. Адаптивные свойства системы, которые учитываются коэффициентом ( $A$ ), также коррелируют с фрактальной структурой. Это в очередной раз доказывает сложность и многообразие взаимодействий внутри системы. Таким образом, учет фрактальных свойств системы позволяет точнее прогнозировать ее поведение и характеристики, что ведет к оптимизации ее функционирования. Проектирование и управление системами с учетом их фрактальной структуры делает их более устойчивыми и эффективными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Авторами выявлена и доказана важность использования фрактального подхода в инженерных системах при проектировании и эксплуатации таких систем. Особое внимание уделяется повышению надежности, эффективности и адаптивности. Фрактальные флуктуации, представляющие собой повторяющиеся паттерны данных, предлагаются как инструмент для создания более эффективных методов управления.

2. Предложена новая классификация параметров системы, которая акцентирует внимание на адаптивности, надежности и эффективности ресурсов, в отличие от традиционных классификаций, которые не учитывают динамику и адаптивность системы. Фрактальный анализ и учет фрактальной размерности предлагается как альтернатива линейным методам.

3. Разработанные математические модели оценивают надежность и эффективности сложных технических систем с учетом их фрактальной структуры. Авторами предложены математически модели прогнозирования на основе экспоненциального сглаживания.

Таким образом, учет фрактальной структуры сложных систем при их проектировании и эксплуатации инженерных систем является одним из ключевых аспектов при обеспечении устойчивости, надежности и адаптивности.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mandelbrot B.B.** (1975). Les objets fractals: forme, hasard et dimension. Paris: Flammarion
2. **Falconer K.** (1990). Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. Chichester, England: John Wiley & Sons.
3. **Колмогоров А.Н.** Избранные труды. Математика и механика. М.: Наука, 1985. 560 с.
4. **Пугачев В.С.** Теория вероятностей и её инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 420 с.
5. **Lorenz E.N.** (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20. P. 130-141.
6. **Ruelle D.** (1989). Elements of Differentiable Dynamics and Bifurcation Theory. Academic Press.
7. **Batty M., Longley P.** Fractal Cities: A Geometry of Form and Function, 1994.
8. **Jiang B.A.** topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007.
9. **Lammer S., Gehlsen B., Helbing D.** Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2006.
10. **Xie F., Levinson D.** Measuring the structure of road networks. *Geographical Analysis*. 2007.
11. **Бобков С.П., Галиаскаров Э.Г.** Моделирование процесса теплопроводности с использованием систем клеточных автоматов. *Программные продукты и системы*. 2020. № 4. С. 641-650. DOI 10.15827/0236-235X.132.641-650. – EDN RFIURL.
12. **Астраханцева И.А., Герасимов А.С., Астраханцев Р.Г.** Прогнозирование региональной инфляции с помощью алгоритмов машинного обучения. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством*. 2022. № 4(54). С. 6-13. DOI 10.6060/ivecofin.2022544.620.
13. **Astrakhantseva I.A., Astrakhantsev R.G., Mitin A.V.** Randomized C/C++ dynamic memory allocator. *Journal of Physics: Conference Series*: 2, Moscow, 01 июля 2021 года. Moscow, 2021. P. 012006. DOI 10.1088/1742-6596/2001/1/012006. – EDN POZQDG.
14. **Астраханцева И.А., Горев С.В., Астраханцев Р.Г.** Системный подход к анализу фрактальной природы сложных технических систем. *Известия*

REFERENECES

1. **Mandelbrot B.B.** (1975). Les objets fractals: forme, hasard et dimension. Paris: Flammarion
2. **Falconer K.** (1990). Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. Chichester, England: John Wiley & Sons.
3. **Kolmogorov A.N.** Selected Works. Mathematics and Mechanics. Moscow: Nauka, 1985. 560 p.
4. **Pugachev V.S.** Probability Theory and Its Engineering Applications. Moscow: Nauka, 1991. 420 p.
5. **Lorenz E.N.** (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20. P. 130-141.
6. **Ruelle D.** (1989). Elements of Differentiable Dynamics and Bifurcation Theory. Academic Press.
7. **Batty M., Longley P.** Fractal Cities: A Geometry of Form and Function, 1994.
8. **Jiang B.A.** Topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007.
9. **Lammer S., Gehlsen B., Helbing D.** Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2006.
10. **Xie F., Levinson D.** Measuring the structure of road networks. *Geographical Analysis*. 2007.
11. **Bobkov S.P., Galiaskarov E.G.** Modeling the heat conduction process using systems of cellular automata. *Software products and systems*. 2020. N 4. P. 641-650. DOI 10.15827/0236-235X.132.641-650.
12. **Astrakhantseva I.A., Gerasimov A.S., Astrakhantsev R.G.** Forecasting regional inflation using machine learning algorithms. *Ivecofin*. 2022. N 4(54). P. 6-13. DOI 10.6060/ivecofin.2022544.620
13. **Astrakhantseva I.A., Astrakhantsev R.G., Mitin A.V.** Randomized C/C++ dynamic memory allocator. *Journal of Physics: Conference Series*: 2, Moscow, July 01, 2021. – Moscow, 2021. P. 012006. DOI 10.1088/1742-6596/2001/1/012006.
14. **Astrakhantseva I.A., Gorev S.V., Astrakhantsev R.G.** Systematic approach to the analysis of the fractal nature of complex technical systems. *Ivecofin*. 2023. N 3(57). P. 89-97. DOI 10.6060/ivecofin.2023573.657



- высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством [Ивэкофин]. 2023. № 3(57). С. 89-97. DOI 10.6060/ivecofin.2023573.657. – EDN PSPGBG.
15. **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.
  16. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Применение агентного подхода для моделирования процессов теплопроводности. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2022. № 2. С. 58-66. DOI 10.17588/2072-2672.2022.2.058-066
  17. **Горев С.В.** Исследование методов и алгоритмов искусственного интеллекта при определении стоимости произведений искусства. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством [Ивэкофин].* 2022. № 4(54). С. 21-28. DOI 10.6060/ivecofin.2022544.622.
  18. **Зимнуров М.Ф., Астраханцева И.А., Грименицкий П.Н.** Системный анализ и оптимизация количественных показателей эффективности в технологических проектах на основе гибких методологий. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение.* 2023. № 3(75). С. 61-68. DOI 10.6060/snt.20237503.0008. – EDN OYNXHV.
  19. **Горев С.В., Кутузова А.С.** Анализ практики налогообложения сделок с предметами искусства. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством [Ивэкофин].* 2021. № 2(48). С. 23-28. DOI 10.6060/ivecofin.2021482.530.
  20. **Суворов И.А.** Разработка автоматизированной системы для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя с использованием систем обработки изображений. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин].* 2022. № 03(53). С.106-111. DOI: 10.6060/ivecofin.2022533.607.
  21. **Зимнуров М.Ф., Макшанова А.О.** Интроспекция биохимических процессов с использованием биокбернетических методов. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин].* 2021. № 02(48). С.128-134. DOI: 10.6060/ivecofin.2021482.543.
  22. **Бобков С.П.** Подходы к моделированию систем масового обслуживания. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин].* 2021. № 03(49). С.130-134. DOI: 10.6060/ivecofin.2021493.559
  15. **Bobkov S.P., Astrakhanitseva I.A., Galiaskarov E.G.** Application of a systems approach in the development of mathematical models. *Modern science-intensive technologies. Regional application.* 2021. N 1(65). P. 66-71. DOI 10.6060/snt.20216501.0008.
  16. **Bobkov S.P., Astrakhanitseva I.A.** Application of an agent-based approach to modeling heat conduction processes. *Bulletin of Ivanovo State Energy University.* 2022. N 2. P. 58-66. DOI 10.17588/2072-2672.2022.2.058-066.
  17. **Gorev S.V.** Study of methods and algorithms of artificial intelligence in determining the value of works of art. *Ivecofin.* 2022. N 4(54). P. 21-28. DOI 10.6060/ivecofin.2022544.622 (in Russian).
  18. **Zimnurov M.F., Astrakhanitseva I.A., Grimenitsky P.N.** System analysis and optimization of quantitative performance indicators in technological projects based on flexible methodologies. *Modern high-tech technologies. Regional application.* 2023. N 3(75). P. 61-68. DOI 10.6060/snt.20237503.0008 (in Russian).
  19. **Gorev S.V., Kutuzova A.S.** Analysis of the practice of taxation of transactions with objects of art. *Ivecofin.* 2021. N 2(48). P. 23-28. DOI 10.6060/ivecofin.2021482.530
  20. **Suvorov I.A.** Development of an automated system for textile surface quality analysis of a fiber com-posite layer using image processing systems. *Ivecofin.* 2022. N 03(53). P. 106-111. DOI: 10.6060/ivecofin.2022533.607 (in Russian).
  21. **Zimnurov M.F., Makshanova A.O.** Introspection of biochemical processes using biocybernetic methods. *Ivecofin.* 2021. № 02(48). P. 128-134. DOI: 10.6060/ivecofin.2021482.543 (in Russian)
  22. **Bobkov S.P.** Approaches to simulation of queuing systems. *Ivecofin.* 2021. № 03(49). P. 130-134. DOI: 10.6060/ivecofin.2021493.559 (in Russian).

Поступила в редакцию 02.09.2023  
Принята к опубликованию 05.10.2023

Received 02.09.2023  
Accepted 05.10.2023