

УДК 519.87

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ДИАКОПТИКИ, ТЕОРИИ ГРАФОВ И ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

© 2025 П.А. Лонцих, Е.Ю. Головина, Н.П. Лонцих, И.В. Зырянов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Статья поступила в редакцию 10.09.2025

В статье предложен **новый подход** к моделированию состояния систем менеджмента, в том числе, систем менеджмента качества, на основе интеграции методов диакоптики, фрактального анализа и теория графов. **Актуальность** выполненных исследований определяется тем, что предложенные методы являются независимыми, самодостаточными направлениями анализа динамики сложных, механических систем, описываемых как непрерывными линейными, так дискретно-нелинейными, или линеаризованными дифференциальными уравнениями, но которые вполне могут входить в единые, интегральные связи, позволяющие исследовать структуры, динамику и анализировать риски, как отдельных составляющих, так и общих, или целых элементов, входящих в системы менеджмента качества. **Целью** обращения к предложенным в статье методам является обоснование интегрирования этих трех математических направлений при моделировании или анализе состояния сложных систем, структур, технологического оборудования, входящих как в системы менеджмента, вообще говоря, так и системы менеджмента качества, в том числе. Результаты статьи основаны на **теоретических исследованиях и подтверждены практикой применения** риск-ориентированного подхода внедрения и эксплуатации любого стандарта из семейства ISO 9000:2015, и, прежде всего, как того требует базовый стандарт ISO 9001:2015. В **результате** выполненной работы стало возможным представить базовые цели и задачи, характеризующие предложенные методы, исходящие из того, что теория графов изучает взаимосвязи между объектами, представляемыми в виде вершин и ребер, фрактальные методы позволяют описывать структуры, обладающие самоподобностью в разных масштабах, а методы диакоптики наиболее приемлемы при анализе физико-механических свойств технологического оборудования, определяющего системы менеджмента качества высокотехнологичных производств по характеристистикам его составляющих.

Ключевые слова: менеджмент качества, метод диакоптики, фрактальный анализ, треугольник Серпинского, теория графов, динамика механических систем, риск-менеджмент, процессно-ориентированный подход, уравнения Лагранжа.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-78-86

EDN: MLOOYA

1. ВВЕДЕНИЕ. ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Современное моделирование систем менеджмента качества (СМК) требует комплексного подхода, объединяющего принципы стандартов ISO, процессное управление и цифровые технологии. Ключевое требование - обеспечение адекватного отражения реальных производственных процессов с сохранением их взаимосвязей и динамических характеристик. Модель должна поддерживать все этапы цикла PDCA, позволяя не только диагностировать текущее состояние, но и прогнозировать результаты улучшений. Особое значение приобретает способность модели адаптироваться к изменениям внешних условий и внутренней структуры предприятия.

Важно отметить, что на уровне реализации модель СМК должна сочетать строгую математическую формализацию с практической реализуемостью. Это предполагает выбор адекватного математического аппарата, обеспечивающего необходимую точность при приемлемой вычислительной сложности. Технологически модель должна интегрироваться с существующей ИТ-инфраструктурой предприятия, включая ERP-системы, IoT-платформы и средства бизнес-аналитики. Критически важным становится обеспечение работы с данными в реальном времени и поддержка распределенных вычислений.

Лонцих Павел Абрамович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления.

E-mail: palon@list.ru

Головина Елена Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и цифровых бизнес-технологий. E-mail: elenauspeh75@gmail.com

Лонцих Наталья Павловна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизации и управления.

E-mail: natalysib@list.ru

Зырянов Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры горных машин и электромеханических систем. E-mail: zyryanoviv@inbox.ru

Вместе с тем, для успешного применения модели СМК должны учитывать отраслевую специфику и производственные реалии. Это включает адаптацию к конкретным технологическим процессам, учет ресурсных ограничений и обеспечение понятного интерфейса для пользователей. Модель должна предусматривать различные уровни детализации.

Таким образом, разработанные и внедренные на предприятиях системы менеджмента качества (СМК) могут и должны обладать различными требованиями, определяемыми как характером деятельности самого предприятия, так и теми целями и задачами, которыми эти системы наделены.

Прежде СМК должны быть риск-ориентированными, как того требует базовый стандарт ISO 9001:2015 либо, если СМК внедрена на основании стандарта ГОСТ Р В 0015-002-2020, при условии, что речь идет о высокотехнологичном предприятии при удовлетворении требования стандарта ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines». [1,2,3].

Эффективная система менеджмента качества должна соответствовать требованиям статистических методов, включая использование семи основных инструментов менеджмента качества. Необходимо внедрять статистическое управление процессами для получения достоверной информации о ходе производственных операций, обеспечения их стабильности и воспроизводимости. Особое значение может иметь применение метода APQP (Advanced Productivity Quality Planning) – перспективного планирования качества продукции, которое позволяет заранее определить и реализовать все необходимые этапы, направленные на удовлетворение потребностей и ожиданий заказчика.

На основе проведённого анализа в статье предложены новые подходы, алгоритмы и инструменты моделирования систем менеджмента качества. Они основаны на методах, ранее применявшимися в других областях, но обладающих потенциалом новизны в сфере управления качеством. В частности, рассматриваются методы диакоптики, теории графов и фрактального анализа как перспективные средства для совершенствования СМК. Диакоптический подход обеспечивает системную декомпозицию СМК на подсистемы с четкими границами взаимодействия. Теория графов позволяет визуализировать и анализировать сложные причинно-следственные связи между элементами системы. Фрактальный анализ выявляет скрытые структурные закономерности в динамике показателей качества.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. АНАЛИЗ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

С точки зрения управления качеством, ключевые понятия фрактального анализа могут быть интерпретированы следующим образом: изучение предложенных моделей опирается на принципы теории фракталов и хаоса [4]. Под термином «фрактал» понимается устойчивая геометрическая структура, например, визуализация текущего состояния организационной инфраструктуры, технологического оборудования или инструментария при реализации метода 5S в рамках концепции «бережливого производства». В данном контексте можно выделить такие этапы 5S, как: Сортировка (Seiri), Организация порядка (Seiton), Поддержание чистоты (Seiso), Стандартизация (Seiketsu) и Дисциплина (Shitsuke).

Основы фрактального анализа, включая понятия фрактала и хаоса, а также методологические подходы к их применению, были заложены в работах Б. Мандельброта и Р.Л. Хадсона [5,6]. Значительный вклад в развитие этой теории внесли Э. Петерс и Р.М. Кроновер [7–9].

Под хаосом понимается особая форма организации, которая отличается от привычного восприятия порядка. Как отмечается в ряде источников, хаос представляет собой более сложную форму упорядоченности, в которой случайные и, на первый взгляд, неупорядоченные явления становятся основой самоорганизации, заменяя традиционные причинно-следственные связи. При использовании фрактального подхода в исследовании менеджмента рассматриваются его возникновение, развитие и эволюция как результат взаимодействия таких противоположностей, как стабильность и застой, с одной стороны, и динамика, обусловленная хаосом, беспорядком и процессными изменениями – с другой.

Современные представления о фрактальном анализе и его связь с методами ТРИЗ подробно рассмотрены в исследованиях [10–17].

Концепция хаоса основывается на представлении о непрерывных, потенциальных и необратимых изменениях. Хаос выступает как форма динамики, превосходящей стабильность, застой и предсказуемость системы. В этом аспекте термин «хаос» перекликается с подходами к управлению изменениями, сформулированными И. Адизесом. Его методология базируется на ключевом постулате: любая организация, подобно живому организму, находится в постоянном движении и сталкивается с внутренними и внешними проблемами. При этом на каждом этапе жизненного цикла организации ей присущи специфические вызовы и необходимость соответствующих изменений [18].

При рассмотрении менеджмента и маркетинга с общей системной точки зрения целесообразно определить ряд фундаментальных принципов. Основой для анализа фрактальной структуры рынка, а также систем управления могут служить следующие положения:

1. Рынок представляет собой многоуровневую сеть структурно-функциональных элементов, где информационные процессы, связанные с отдельным участником, оказывают влияние на значительное количество других компонентов системы, включая прочих участников.

2. Для рыночных систем характерна открытость, которая предопределяет их способность к самоорганизации и саморегулированию.

3. Базовой структурной единицей организации рынка являются фракталы. Это указывает на наличие свойства самоподобия на различных уровнях иерархии системы.

4. Все элементы и институты рынка обладают системностью, фрактальной упорядоченностью и ориентацией на риск, что проявляется во всех его формах и механизмах [10–17].

Термин «хаос» используется как характеристика динамических процессов и применяется для описания разнообразных явлений — например, турбулентного поведения сплошной среды в пневмо- и гидроприводах оборудования, либо сложных процессов в рамках процессно-ориентированного подхода к управлению. Именно такая интерпретация хаоса позволяет применять методы фрактального анализа при моделировании и исследовании поведения компонентов высокотехнологичных производственных систем, включающих, в частности, виброактивные механические устройства — как генерирующие, так и предназначенные для подавления вибраций.

С учётом определений фрактала и хаоса, принятых в рамках фрактального анализа, описание динамики технологического оборудования может быть выполнено как с использованием нелинейных, так и линеаризованных дифференциальных уравнений. Для системы менеджмента качества высокотехнологичного предприятия, на котором риски, в определяющей степени, определяются как технологические, обусловленные эксплуатационными параметрами виброактивного оборудования, обращение к уравнениям Лагранжа второго рода, описывающие движение такого технологического оборудования, позволило получить для виброактивной механической системы, содержащей инерционные, жесткостные и демпфирующие элементы, систему дифференциальных уравнений движения. Предложенный математический аппарат необходим для описания и моделирования таких высокотехнологичных производств, как: металлорежущие станки, обрабатывающие центры, технологии для производства длинномерных панелей, например, установка УДФ-4, применяемая на ИАЗ, [19], установка RU 157025U, необходимая для изготовления длинномерных, ребристых панелей, обязательные в современном авиа-машиностроительном производстве, пресс для производства массивных CLT-панелей, используемый на лесоперерабатывающем высокотехнологичном предприятии, виброгрохоты и шаровые мельницы горнообогатительного производства, линии для производства 3D-панелей и т.д. [28, 29].

Дифференциальные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + (c_2 + c_3)x + (c_3h_3 - c_2h_2)\varphi &= P \sin \alpha; \\ M\ddot{z} + (c_1 + c_4 + c_5)z + (c_4a_4 - c_5a_5)\varphi &= P \cos \alpha; \\ J_n\ddot{\varphi} + (c_2h_2^2 + c_3h_3^2 + c_4a_4^2 + c_5a_5^2)\varphi + (c_3h_3 - c_2h_2)x + (c_4a_4 - c_5a_5)z &= -Ph_p \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

где M , c – инерционные и жесткостные характеристики виброактивной системы;

P_i – силы на выбранные оси координат;

h_i – сила при определении моментов сил;

x, y, z – координаты осей;

c_i – жесткостные переменные;

$J_n = \iiint_{(m)} (\zeta^2 + \xi^2) dm$ – массовый момент инерции тела по отношению к осям инерции.

Дифференциальные уравнения (1) образуют математическую модель механических движений виброактивного оборудования.

В условиях фрактального подхода к изучению динамики механических объектов необходимо рассматривать исследуемые системы как нелинейные, а также их линеаризованные представления, находящиеся в состоянии неравновесия. В этом случае наблюдается сложная эволюция фазового пространства, характеризующаяся проявлением временного хаоса, на фоне которого устойчиво выделяется тенденция к самоорганизации — она проявляется через фрактальные особенности сигналов, поступающих от технологических установок и оборудования.

Для корректной оценки фрактальных свойств таких систем требуется решить задачу определения временного запаздывания и фазовой задержки сигналов, что является критически важным этапом при расчете фрактальной размерности и других показателей. После этого полученные параметры могут быть применены для построения моделей прогнозирования, в том числе с использованием искусственных нейронных сетей, способных предсказывать поведение систем в будущем на основе

анализа исторических данных. Такие нейросетевые модели позволяют не только осуществлять прогнозирование, но и вычислять такие динамические характеристики, как спектр показателей Ляпунова, что открывает возможность количественной оценки степени хаотичности системы. Дополнительно используется энтропия Колмогорова [4], которая служит индикатором скорости информации о состоянии системы и позволяет определить допустимый временной горизонт прогнозирования.

Таким образом, фрактальная структура поведения механических систем может быть выявлена и использована в целях управления рисками и обеспечения надежности промышленного оборудования. Для этого применяются специализированные методы анализа, включая оценку фрактальной размерности, которая представляет собой один из наиболее информативных и перспективных инструментов диагностики сложных динамических процессов.

Очевидно, что для систем менеджмента, которые определяются такими инструментами бережливого производства, как 5S, фрактальный анализ может быть реализован следующими подходами и инструментами: треугольник Серпинского, снежинки Коха, множество Кантора, кривая Пеано, папоротник Барнсли и многие другие инструменты [5-10].

На рис. 1 приведены исходные фрактальные модели, или треугольники Серпинского, которые могут быть применимы в задаче моделирования 5S «бережливого производства» СМК. Применив генератор фон Коха к равностороннему треугольнику, получим сплошную звезду Давида. При многократном повторении данного алгоритма построения формируется фрактальный объект, известный как кривая Коха. Каждая новая итерация процесса увеличивает длину периметра фигуры в $4/3$ раза по сравнению с предыдущим шагом. Математически это выражается формулой $P = P \times (4/3)^n$, где P – периметр исходного равностороннего треугольника. В пределе, при неограниченном возрастании числа итераций ($n \rightarrow \infty$), периметр фрактальной кривой стремится к бесконечно большой величине, демонстрируя характерное свойство фрактальных объектов – бесконечную длину на ограниченной площади.

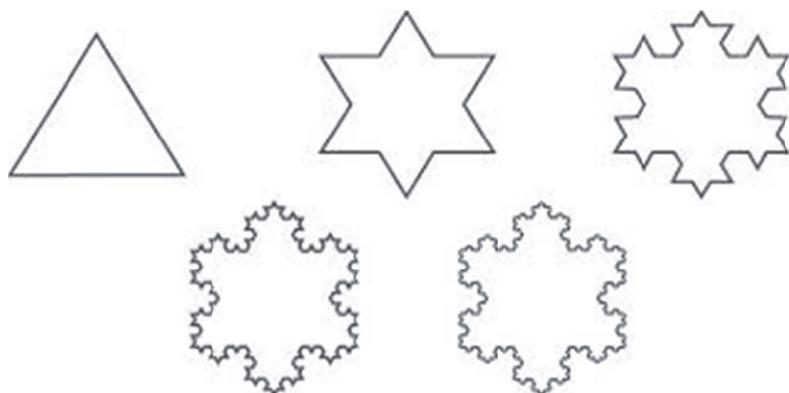


Рис. 1. Треугольник Серпинского. Снежинка Коха при $D= 0;1;2; \dots n$

Анализ динамики технологических объектов, входящих в систему менеджмента высокотехнологичных производств, очевидно, может быть рассмотрен на основе составления, описания и решения математического аппарата, соответствующего физической природе динамических объектов. Это могут быть дискретно-нелинейные системы, непрерывные нелинейные системы, линеаризованные, а также линейные уравнения движения механических систем.

Прогностические модели, основанные на выявленных фрактальных свойствах, могут быть использованы не только для восстановления траектории развития системы, но и для анализа ее устойчивости. В частности, такие сети позволяют оценить спектр показателей Ляпунова, отражающих степень чувствительности системы к малым возмущениям, а также определить горизонт предсказуемости через величину энтропии Колмогорова, которая служит мерой скорости потери информации о начальном состоянии системы. Таким образом, применение фрактальных методов в сочетании с современными алгоритмами машинного обучения обеспечивает углубленный анализ сложных производственных систем и позволяет эффективно управлять рисками в условиях неопределенности [4].

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СМК НА ОСНОВЕ ДИАКОПТИКИ

Диакоптический подход к моделированию систем менеджмента качества предлагает принципиально новую парадигму анализа сложных производственных систем через их декомпозицию на взаимосвязанные подсистемы. Методология, изначально разработанная Г. Кроном для электротех-

нических систем, демонстрирует особую эффективность применительно к СМК благодаря способности выявлять скрытые корреляции между технологическими процессами. Ключевое преимущество заключается в трехэтапном алгоритме: разделение системы на диакопы с минимальными связями, независимая оптимизация каждой подсистемы и последующее агрегирование результатов через матрицы взаимодействий, что позволяет сохранить целостность анализа при значительном снижении вычислительной сложности.

Остановимся подробнее на процессе моделирования системы менеджмента качества высокотехнологичного производства, включающего виброактивное оборудование, при условии декомпозиции на отдельные компоненты. Как было отмечено выше, одним из наиболее продуктивных подходов к исследованию динамики виброактивного оборудования, например, реализованного в виде металлообрабатывающего станка, является переход от сложной исходной системы к анализу более простых подсистем. Это позволяет с определённой степенью точности или приближения восстановить общие свойства всей системы.

Анализ сложных механических систем реализуется через их декомпозицию на отдельные автономные компоненты, что соответствует методологии диакоптики. Исходная модель виброактивного оборудования представлена как совокупность взаимосвязанных элементов, организованных по иерархическим принципам и функционирующих согласно заданным технологическим целям. Эта система включает большое количество звеньев, обменивающихся данными и находящихся во взаимодействии между собой.

Для упрощения анализа отдельные группы элементов выделяются в самостоятельные блоки и рассматриваются как относительно независимые подсистемы. Среди них можно выделить основные: станок, инструмент, приспособление и обрабатываемая заготовка. Несмотря на то, что поведение каждой из этих частей изучено достаточно подробно, объединение их в единую модель представляет собой нетривиальную задачу. Это обусловлено тем, что при интеграции отдельных модулей проявляются новые свойства, не сводящиеся к характеристикам составляющих.

Интегративное поведение системы определяется разнообразием типов связей и информационных потоков между её компонентами. Одной из характерных черт является замкнутость и внутренняя самодостаточность функциональных подсистем, обеспечивающая их устойчивое функционирование в условиях внешних воздействий и факторов риска [20].

Корректное построение динамических моделей станков, как правило, приводит к дискретно-непрерывным расчётным схемам большой размерности и сложной структуры. Именно такие системы рассмотрены выше в настоящей статье с использованием методов фрактального анализа. Таким образом, выполнение процедур фрактального анализа позволяет прогнозирующими системам вычислять спектр ляпуновских показателей и, на основании этого, определять параметры прогнозирования динамики систем менеджмента через использование энтропии Колмогорова [4]. Следует подчеркнуть, что именно в этом заключается базовая идея, алгоритм и мотивация моделирования систем менеджмента – интеграция методов диакоптики и фрактального анализа. Интеграция диакоптики и фрактального анализа создает новую методологическую основу для совершенствования СМК, позволяя одновременно решать задачи структурной оптимизации и выявления глубинных закономерностей.

Так, при разработке динамических моделей для описания дискретно-непрерывных систем, вне зависимости от того, задействован ли метод диакоптики или используется фрактальная методология, реализуется декомпозиция общей системы на составляющие. При этом выделяются автономные части – дискретные и континуальные подсистемы, которые рассматриваются отдельно для упрощения анализа и повышения точности моделирования.

В консервативном приближении дифференциальные уравнения движения подсистем представлены как:

$$\Theta_i \dot{q} + G_i q_i = \overline{l, m}, \quad (2)$$

где Θ_i , G_i , q_i , H_i – инерционная и упругая компоненты, обобщенные координаты;

Π_i , n_i – матрицы i -й подсистемы и n_i -мерные векторы обобщенных координат и возмущающих воздействий подсистемы;

$$q_i = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})^T;$$

$$H_i = (h_1^{(i)}, h_2^{(i)}, \dots, h_n^{(i)})^T.$$

Рассматриваемая метасистема формально получена из подсистем, описываемых уравнениями (2), в результате наложения на движение этих подсистем r линейных позиционных связей $f_j(x_k^{(i)}) = 0$, аналитически выраждающих условия соединения отдельных элементов подсистем.

Уравнения связей, отражающих условия жесткого или кинематического соединения отдельных

элементов представлены в виде $\frac{Df}{Dq} q = 0$,
где q – прямая сумма векторов q_i , $i = \overline{1, m}$; Df/Dq – матрица Якоби системы функций $f_j(x_k^{(i)})$, $j = \overline{1, r}$. При этом принято, что встречающиеся кинематические связи являются интегрируемыми.

Агрегированная модель рассмотренной метасистемы получена в виде дифференциальных уравнений Лагранжа с неопределенными множителями определяется аналитически в виде [21- 27],

$$\left. \begin{aligned} \Theta_i \ddot{q}_i + G_i q_i &= H_i + \left(\frac{Df}{Dq_i} \right)^T \Lambda, \quad i = \overline{1, m} \\ \frac{Df}{Dq} q &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где Λ – r -мерный вектор множителей Лагранжа.

Для анализа механической системы, разбитой на отдельные компоненты, применяется метод диакоптики, который представляется в виде матриц и графов, характеризующих динамические модели. При изучении сложных составных подсистем важно использовать такие модели, которые точно отображают поведение каждой составляющей исходной системы станка, учитывая сделанные допущения и ограничения. В этом контексте предпочтительны дискретные симметричные динамические модели, выраженные в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами и симметричными матрицами коэффициентов.

Такие модели, называемые дискретными симметричными системами n -го порядка (или n -мерными моделями), могут быть записаны в матрично-векторной форме уравнений второго порядка, что позволяет эффективно анализировать и управлять динамикой системы, а также выявлять ключевые параметры и поведение на различных этапах функционирования. [21-27]:

$$\Theta \ddot{q} + B \dot{q} + G q = F(q, t), \quad (4)$$

где Q, B, G – инерционная, диссипативная и упругая симметричные матрицы порядка n ; q ; $F(q, t)$ – n -мерные вектор обобщенных координат и вектор-функция возмущающих воздействий.

На основе разработанных моделей проведена схематизация подсистем технологического оборудования, для которых корректным является использование дискретной динамической аппроксимации. Это означает, что не требуется учитывать пространственное распределение массовых и жесткостных характеристик – достаточно ограничиться их точечным представлением. Для анализа топологической организации консервативной динамической модели станка выявлено, что каждый элемент графа символизирует определенную физическую характеристику системы: узлы – инерционные свойства компонентов, а ребра – упругие взаимодействия между звенями. В результате графовая структура выступает в роли структурного аналога исходной механической системы, наглядно иллюстрируя взаимосвязи и взаимодействия её элементов.

В случае простых, слабосвязанных динамических систем граф модели точно воспроизводит структуру реального объекта.

Однако при переходе к более сложным, связанным системам, включающим множество кинематических связей и ограниченных перемещений, граф модели начинает отличаться от исходной конструктивной схемы. Это обусловлено тем, что в таких системах проявляются сложные формы взаимодействия элементов, которые невозможно адекватно передать простыми дискретными связями. В этом случае граф модели отражает не только геометрию устройства, но и интегральное влияние наложенных ограничений, включая кинематические зависимости и условия совместности деформаций.

Таким образом, графовая интерпретация динамических моделей становится мощным инструментом для визуализации и анализа структурной целостности, особенно при переходе к рискоориентированному подходу в управлении состоянием оборудования. Важными структурными характеристиками графа данного порядка n стало общее число s ребер и степени d_j ($j = \overline{1, n}$) его узлов, причем d_j – число ребер, инцидентных j -му узлу графа. Параметры s и d_j – связаны соотношением Эйлера $\sigma = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n d_j$ и характеризуют общую сложность и локальные особенности структуры

графа. Эти параметры находятся в прямой связи с характеристиками разреженности матрицы G порождающей динамической модели [21-27].

Далее приводится методика декомпозиции симметричных систем с сосредоточенными параметрами, основанная на последовательном выделении модульных компонентов, построении упрощ

щенных линейных динамических моделей для каждого агрегата и анализе различных способов их соединения, что позволяет сохранить симметричные свойства исходной системы при значительном снижении вычислительной сложности за счет перехода к модульному представлению с возможностью параллельной обработки компонентов и последующей сборки полной модели системы с верификацией граничных условий и взаимодействий между подсистемами. Дискретные симметричные динамические модели изолированных подсистем могут быть записаны в матрично-векторном виде аналогично формуле (4) и явились основанием для анализа динамики составляющих подсистем станка или механической системы с виброактивными составляющими.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты приведенных выше исследований очевидно демонстрируют, что методы диакоптики, фрактальный анализ и теория графов - это независимые, самодостаточные направления анализа динамики сложных, механических систем, описываемых как непрерывными линейными, так дискретно-нелинейными, или линеаризованными дифференциальными уравнениями, но которые, как впервые показано, вполне могут входить в единые, интегральные связи, позволяющие исследовать структуры, динамику и анализировать риски, как отдельных составляющих, так и общих, или целых элементов, входящих в системы менеджмента качества [28, 29]. Предложенные в данной статье методы - это три математических направления, которые могут быть интегрированы, или связаны между собой при моделировании или анализе состояния сложных систем, структур, технологического оборудования, входящих как в системы менеджмента, вообще говоря, так и системы менеджмента качества, в том числе.

При этом, необходимо представлять базовые цели и задачи, характеризующие предложенные методы. Так, теория графов изучает взаимосвязи между объектами, представляемыми в виде вершин и ребер, фрактальные методы позволяют описывать структуры, обладающие самоподобностью в разных масштабах, а методы диакоптики наиболее приемлемы при анализе физико-механических свойств, например, технологического оборудования систем менеджмента качества, высокотехнологичных производств по характеристикам его составляющих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 9001:2015. Системы менеджмента качества. Требования [Текст]. – Женева: Международная организация по стандартизации, 2015. – 29 с.
2. ISO 31000:2018. Менеджмент риска. Руководящие указания [Текст]. – Женева: Международная организация по стандартизации, 2018. – 16 с.
3. ГОСТ РВ 0015-002-2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2020. – IV, 18 с.
4. Антипов, О.И. Фрактальные методы анализа и прогнозирования для самоорганизованных технических, биологических и экономических систем : автореф. дисс.... докт. физ.-мат.наук : 01.04.03 / Антипов Олег Игоревич. – Самара, 2011. 302 с
5. Мандельброт, Б. (Не)поступные рынки. Фрактальная революция в финансах / Б. Мандельброт., Р.Л. Хадсон. – М.: Вильямс, 2006. – 408 с. – ISBN 5-8459-0922-8.
6. Мандельброт, Бенуа. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт; Пер. с англ. Логунова А.Р., науч. ред. Морозова А.Д. – М. : Институт компьютер. исслед., 2002. – 655 с. (Компьютинг в математике, физике, биологии). - Пер. изд. : The fractal geometry of nature / B B Mandelbrot. - 1 экз. - ISBN 5-93972-108-7
7. Петерс, Э. Фрактальный анализ финансовых рынков. Применение теории хаоса в инвестициях и экономике / Э. Петерс. – М.: Интернет-трейдинг, 2004. – 304 с. – ISBN 5-902360-03-X.
8. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала / Э. Петерс.. – М.: Мир, 2000. – 333 с. – ISBN 5-03-003356-4.
9. Кроновер, Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах: Учебное пособие / Ричард М. Кроновер; Пер.с англ. Т.Э.Кренкеля, А.Л.Соловейчика под ред. Т.Э.Кренкеля; Дополнение А.А.Потапова. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2006. - 488с. – ISBN 5-94836-068-7
10. Белаши, А.Н. Фрактальные графы, как приоритетное направление в решении задач вычислительной техники / А.Н. Белаши // Современные научноемкие технологии. – 2010. – № 9. – С. 97-99.
11. Алмазов, А.А. Фрактальная теория рынка Forex / А.А. Алмазов. – М.: Admiral Markets, 2009. – 296 с. – ISBN 978-5-91258-095-6
12. Латыпова, Н.В., авт.-сост. Фрактальный анализ: учеб. пособие / Н.В. Латыпова. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2020. – 120 с. – ISBN 978-5-4312-0810-2
13. Горобченко, С.Л. Фрактальный анализ в маркетинге. Ч. 1. / С.Л. Горобченко. – URL: <http://www.valverus.info/market/3293-publikacii-fraktalnyy-analiz-v-marketinge-chast-1.html> (дата обращения 24.07.2025).
14. Горобченко, С. Л. Фрактальный подход к маркетингу и рекламе арматурных компаний / С.Л. Горобченко. – URL: <https://armavest.ru/publication/avtorski-stati/promkonsalt-kts-gorobchenko-s-l-fraktalnpoiskhod-k-marketingu-i-reklame-armaturnykh-kompanii/> (дата обращения 24.07.2025).
15. Горобченко, С. Л. ТРИЗ в маркетинге и бизнесе / С.Л. Горобченко. – URL: <https://www.litres.ru/book/stanislav-lvovich-gorobchenko/triz-v-marketinge-i-biznese-48675602/chitat-onlayn/>
16. Горобченко, С.Л. Современный ТРИЗ. Модуль Диалектический подход в ТРИЗ / С. Л. Горобченко. – URL: https://www.ozon.ru/product/kurs-sovremennoyy-triz-modul-dialekticheskiy-podhod-v-triz-gorobchenko-stanislav-lvovich-922226807/?_bctx=CAUQ-YXBSA&at=57twNVr4oc4O2zMkh7R42E3S201M5kSlwwxJEFvzppOl (дата обращения 24.07.2025).
17. Горобченко, С.Л. ТРИЗ в маркетинге и бизнесе. Модуль Вопросы и анкетирование в маркетинге и бизне-

- се | С.Л. Горобченко – URL: <https://www.litres.ru/book/stanislav-lvovich-go/kurs-triz-v-marketinge-i-biznese-modul-voprosy-i-anke-57395116/chitat-onlayn/> (дата обращения 24.07.2025).
18. Адизес, И.К. Управляя изменениями: как эффективно управлять изменениями в обществе, бизнесе и личной жизни / И. К. Адизес; перевод с английского В. Кузин; редактор Д. Чичикалюк. – 3-е изд.– М. : Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 355 с. – Перевод издания: Mastering change: the power of mutual trust and respect in personal life, family life, business and society. – ISBN 978-5-00057-794-3.
 19. Лонцих, П.А. Обеспечение динамического качества станков на основе методов диакоптики и результатов диагностики : автореф. дисс. ... д.-ра. техн. наук : 05.03.01 / Лонцих Павел Абрамович. – Иркутск, 2004. – 327 с.
 20. Вейц, В.Л. Динамические процессы, оценка и обеспечение качества технологических систем механической обработки / В.Л. Вейц, В.В. Максаров, П.А. Лонцих. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 299 с.
 21. Вейц, В.Л. Структурированные модели и методы расчета сложных управляемых систем в технике и экономике / В.Л. Вейц, А. Е. Кочура, П.А. Лонцих. – Ростов-на-Дону, 2002. – 200 с.
 22. Лонцих, П.А. Обеспечение качества и управление динамическими процессами технологических систем / П.А. Лонцих. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. унив-та, 2003. – С. 236.
 23. Лонцих, П.А. Динамическое качество машин и оборудования как инструмент обеспечения надежности производства и конкурентоспособности процессов / П.А. Лонцих, С.В. Елисеев. – Иркутск. 2014. – 322 с.
 24. Pawel A. Lontsikh; Elena Y. Golovina; Malika V. Evloeva; Ilya I. Livshitz; Andrey V. Koksharov Implementation of ESG sustainable development concept criteria using the robust design methods 2022 International Conference on Quality Management, (IT&QM&IS), Year: 2022 | Conference Paper | Publisher: IEEE.
 25. Lontsikh, P.A., Golovina, E.Y., Evloeva, M.V., Livshitz, I.I., Koksharov, A.V. Implementation of ESG Sustainable Development Concept Criteria Using the Robust Design Methods. Proceedings of the 2022 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2022, стр. 173–176. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976803.
 26. Лонцих, П.А. Совершенствование деятельности машиностроительных предприятий на основе применения современных цифровых технологий / П.А. Лонцих, И.И. Лившиц, Е.П. Кунаков, Н.П. Лонцих // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 5 (156). С. 39-4. EDN: PJJCBN.
 27. Лонцих, П.А. Управление рисками на основе методов диакоптики при синтезе виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия / П.А. Лонцих, Е.Ю. Головина, Н.П. Лонцих // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 3 (59). – С. 38-45.
 28. Лонцих, П.А. Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащенным виброактивным оборудованием / П.А. Лонцих, Е.Ю. Головина, Н.П. Лонцих, И.И. Лившиц // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2024. – Т.22. – № 2. – С.170- 181
 29. Междисциплинарный университет Бекмана. Геометрия фракталов. Лекция 1. – URL: https://beckuniver.uscoz.ru/Fractaly_lekcija_1.pdf (дата обращения 24.07.2025).

MODELING QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS BY INTEGRATING DIACOPTICS, GRAPH THEORY AND FRACTAL ANALYSIS

© 2025 P.A Lontsikh, E.Yu. Golovina N.P. Lontsikh, I.V. Zyryanov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

The article describes a new approach to modeling the state of management systems, particularly Quality Management Systems, through the integration of diakoptics, fractal analysis, and graph theory. This relevance of the study lies in integrating three independent methods for analyzing complex mechanical systems. These systems can be described by both continuous linear and discrete-nonlinear or linearized differential equations. The systems can be integrated into single, integral connections, which allow for investigating structures, dynamics and analyzing risks of both individual components and general or entire elements included in the quality management systems. **The purpose** of the study is to justify the integration of these three mathematical directions in modeling or analyzing the state of complex systems, structures, and technological equipment included in both management systems in general and in quality management systems in particular. The findings of the article are based on theoretical research and validated by the practical application of a risk-based approach to implementing and maintaining any standard from the ISO 9000:2015 family, primarily as required by the foundational ISO 9001:2015 standard. **Results.** The study established the core goals and objectives of the proposed methodology integrating three methods. The graph theory studies the relationships between objects represented as vertices and edges; the fractal methods describe structures that are self-similar at different scales; and the diacoptics methods are used in analyzing the physical and mechanical properties of technological equipment, which defines the quality management systems of high-tech industries based on its components' characteristics. **Keywords:** quality management, diakoptics method, fractal analysis, Sierpinski triangle, graph theory, dynamics of mechanical systems, risk management, process-oriented approach, Lagrange equations.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-78-86

EDN: MLOOYA

REFERENCES

1. ISO 9001:2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Tekst]. – Zheneva: Mezhdunarodnaya organizaciya po standartizacii, 2015. – 29 s.
2. ISO 31000:2018. Menedzhment riska. Rukovodlyashchie ukazaniya [Tekst]. – Zheneva: Mezhdunarodnaya organizaciya po standartizacii, 2018. – 16 s.
3. GOST RV 0015-002-2020. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo voennoj tekhniki. Sistemy menedzhmenta kachestva. Obshchie trebovaniya [Tekst]. – M.: Standartinform, 2020. – IV, 18 s.
4. Antipov, O.I. Fraktal'nye metody analiza i prognozirovaniya dlya samoorganizovannyh tekhnicheskikh, biologicheskikh i ekonomicheskikh sistem : avtoref. diss.... dokt. fiz.-mat.nauk : 01.04.03 / Antipov Oleg Igorevich. – Samara, 2011. 302 s

5. *Mandel'brot, B.* (Ne)poslushnye rynki. Fraktal'naya revolyuciya v finansah / B. Mandel'brot., R.L. Hadson. – M.: Vil'yams, 2006. – 408 s. – ISBN 5-8459-0922-8.
6. *Mandel'brot, Benua.* Fraktal'naya geometriya prirody / B. Mandel'brot; Per. s angl. Logunova A.R., nauch. red. Morozova A.D. – M. : Institut komp'yuter. issled., 2002. – 655 s. (Komp'yuting v matematike, fizike, biologii). - Per. izd. : The fractal geometry of nature / B B Mandelbrot. - 1 ekz. - ISBN 5-93972-108-7
7. *Peters E.* Fraktal'nyj analiz finansovyh rynkov. Primenenie teorii haosa v investiciyah i ekonomike / E. Peters. – M.: Internet-trejding, 2004. – 304 s. – ISBN 5-902360-03-X.
8. *Peters E.* Haos i poryadok na rynkah kapitala / E. Peters.. – M.: Mir, 2000. – 333 s. – ISBN 5-03-003356-4.
9. *Kronover, R.M.* Fraktaly i haos v dinamicheskikh sistemah: Uchebnoe posobie / Richard M. Kronover; Per.s angl. T.E.Krenkelya, A.L.Solovejchika pod red. T.E.Krenkelya; Dopolnenie A.A.Potapova. – 2-e izd.,dop. – M.: Tekhnosfera, 2006. - 488s. – ISBN 5- 94836-068-7
10. *Belash, A.N.* fraktal'nye grafy, kak prioritetnoe napravlenie v reshenii zadach vychislitel'noj tekhniki / A.N. Belash // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2010. – № 9. – S. 97-99.
11. *Almazov, A.A.* Fraktal'naya teoriya rynka Forex / A.A. Almazov. – M.: Admiral Markets, 2009. – 296 s. – ISBN 978-5-91258-095-6
12. *Latypova, N.V.*, avt.-sost. Fraktal'nyj analiz: ucheb. posobie / N.V. Latypova. – Izhevsk: Izdatel'skij centr «Udmurtskij universitet», 2020. – 120 s. – ISBN 978-5-4312-0810-2
13. *Gorobchenko, S.L.* Fraktal'nyj analiz v marketinge. Ch. 1. / S.L. Gorobchenko. – URL: <http://www.valverus.info/market/3293-publikacii-fraktalnyy-analiz-v-marketinge-chast-1.html> (data obrashcheniya 24.07.2025).
14. *Gorobchenko, S. L.* Fraktal'nyj podhod k marketingu i reklame armaturnyh kompanij / S.L. Gorobchenko. – URL: <https://armavest.ru/publication/avtorski-stati/promkonsalt-kts-gorobchenko-s-l-fraktalnpozdkhod-k-marketingu-i-reklame-armaturnykh-kompan/> (data obrashcheniya 24.07.2025).
15. *Gorobchenko, S. L.* TRIZ v marketinge i biznese / S.L. Gorobchenko. – URL: <https://www.litres.ru/book/stanislav-lvovich-gorobchenko/triz-v-marketinge-i-biznese-48675602/chitat-onlayn/>
16. *Gorobchenko, S.L.* Sovremennyj TRIZ. Modul' Dialekticheskij podhod v TRIZ / S. L. Gorobchenko. – URL: https://www.ozon.ru/product/kurs-sovremennyy-triz-modul-dialekticheskiy-podhod-v-triz-gorobchenko-stanislav-lvovich-922226807/?_bctx=CAUQ-YXBSA&at=57twNVr4oc4O2zMkh7R42E3S201M5kSlwwxJEFvzppOl (data obrashcheniya 24.07.2025).
17. *Gorobchenko, S.L.* TRIZ v marketinge i biznese. Modul' Voprosy i anketirovanie v marketinge i biznese | S.L. Gorobchenko – URL: <https://www.litres.ru/book/stanislav-lvovich-go/kurs-triz-v-marketinge-i-biznese-modul-voprosy-i-anke-57395116/chitat-onlayn/> (data obrashcheniya 24.07.2025).
18. *Adizes, I.K.* Upravlyayaya izmeneniyami: kak effektivno upravlyat' izmeneniyami v obshchestve, biznese i lichnoj zhizni / I. K. Adizes; perevod s anglijskogo V. Kuzin; redaktor D. Chichikalyuk. – 3-e izd.. – M. : Mann, Ivanov i Ferber, 2016. – 355 s. – Perevod izdaniya: Mastering change: the power of mutual trust and respect in personal life, family life, business and society. – ISBN 978-5-00057-794-3.
19. *Loncih, P.A.* Obespechenie dinamicheskogo kachestva stankov na osnove metodov diakoptiki i rezul'tatov diagnostiki : avtoref. diss. ... d-ra. tekhn. nauk : 05.03.01 / Loncih Pavel Abramovich. – Irkutsk, 2004. – 327 s.
20. *Vejc, V.L.* Dinamicheskie processy, ocenka i obespechenie kachestva tekhnologicheskikh sistem mekhanicheskoy obrabotki / V.L. Vejc, V.V. Maksarov, P.A. Loncih. – Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2001. – 299 s.
21. *Vejc, V.L.* Strukturirovannye modeli i metody rascheta slozhnyh upravlyayemyh sistem v tekhnike i ekonomike / V.L. Vejc, A. E. Kochura, P.A. Loncih. – Rostov-na-Donu, 2002. – 200 s.
22. *Loncih, P.A.* Obespechenie kachestva i upravlenie dinamicheskimi processami tekhnologicheskikh sistem / P.A. Loncih. – Rostov-na-Donu: Izd-vo Rost. univ-ta, 2003. – S. 236.
23. *Loncih, P.A.* Dinamicheskoe kachestvo mashin i oborudovaniya kak instrument obespecheniya nadezhnosti proizvodstva i konkurentospособности processov / P.A. Loncih, S.V. Eliseev. – Irkutsk. 2014. – 322 s.
24. *Pawel A. Lontsikh; Elena Y. Golovina; Malika V. Evloeva; Ilya I. Livshitz; Andrey V. Koksharov* Implementation of ESG sustainable development concept criteria using the robust design methods 2022 International Conference on Quality Management, (IT&QM&IS), Year: 2022 | Conference Paper | Publisher: IEEE.
25. *Lontsikh, P.A., Golovina, E.Y., Evloeva, M.V., Livshitz, I.I., Koksharov, A.V.* Implementation of ESG Sustainable Development Concept Criteria Using the Robust Design Methods. Proceedings of the 2022 International Conference \”Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies\”, IT and QM and IS 2022, str. 173–176. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976803
26. *Loncih, P.A.* Sovershenstvovanie deyatel'nosti mashinostroitel'nyh predpriyatiy na osnove primeneniya sovremennyh cifrovyyh tekhnologij / P.A. Loncih, I.I. Livshic, E.P. Kunakov, N.P. Loncih // Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie. 2018. № 5 (156). C. 39-4. EDN: PJJCBN.
27. *Loncih, P.A.* Upravlenie riskami na osnove metodov diakoptiki pri sinteze vibroaktivnogo oborudovaniya vysokotekhnologichnogo predpriyatiya / P.A. Loncih, E.Yu. Golovina, N.P. Loncih // Sistemy. Metody. Tekhnologii. – 2023. – № 3 (59). – S. 38-45.
28. *Loncih, P.A.* Metody i instrumenty upravleniya riskami na vysokotekhnologichnom mashinostroitel'nom predpriyatiy, osnashchennym vibroaktivnym oborudovaniem / P.A. Loncih, E.Yu. Golovina, N.P. Loncih, I.I. Livshic // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. – 2024. – T.22. – № 2. – S.170- 181
29. Mezhdisciplinarnyj universitet Bekmana. Geometriya fraktalov. Lekciya 1. – URL: https://beckuniver.ucoz.ru/Fractaly_lekcija_1.pdf (data obrashcheniya 24.07.2025).

Pavel Lontsikh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Control. E-mail: palon@list.edu
Elena Golovina, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Digital Business Technologies. E-mail: elenauspeh75@gmail.com

Natalia Lontsikh, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University. E-mail: natalonsib@list.ru

Igor Zyryanov, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Mining Machinery and Electromechanical Systems. E-mail: zyryanov@inbox.ru