

На правах рукописи

Климова Диана Викторовна

**ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ,
управление и обработка информации (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН в отделе нелинейного
анализа и проблем безопасности.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук профессор О.В. Дружинина
Официальные оппоненты:	доктор технических наук профессор Ф.И. Ерешко, кандидат технических наук доцент Е.Г. Андрианова
Ведущая организация:	Учреждение Российской академии наук Институт системного анализа РАН

Защита состоится «07» апреля 2011 г. в 15.00 на заседании совета
по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.017.03 при
Учреждении Российской академии наук Вычислительный центр
им. А.А. Дородницына РАН по адресу: 141160, Московская область,
Звездный городок, ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр
подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина», Дом космонавтов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Вычислительного центра
им. А.А. Дородницына РАН.

Автореферат разослан «06» марта 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 002.017.03
кандидат физико-математических наук



А.В. Мухин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Выбор темы и актуальность диссертационного исследования обусловлены необходимостью разработки методов управления безопасностью эксплуатации сложных технических систем с учетом сейсмических воздействий.

Значительная территория Российской Федерации относится к зонам повышенной сейсмичности. На сегодняшний день в России функционирует свыше 2,5 тысяч химически опасных объектов, более 1,5 тысяч радиационно-опасных объектов, около 8 тысяч пожаро- и взрывоопасных объектов, более 30 тысяч гидротехнических сооружений. Опасность разрушения промышленных объектов многократно усиливается в случае возникновения землетрясений. Снижение опасности возникновения аварийных ситуаций на промышленных объектах является важной задачей управления безопасностью. В связи с этим возникает необходимость контроля безопасности промышленных объектов на основе принятия управленческих решений с учетом мониторинга и обработки информации об опасности сейсмического воздействия.

Сложность и точность управленческих решений, получаемых на основе моделирования промышленных процессов, необходимость оптимизации управляемых параметров обуславливают необходимость применения системного подхода к управлению безопасностью промышленных объектов. Кризисные и экстремальные ситуации, возникающие при землетрясениях в технических системах, характеризуются неопределенностью состояния технической системы и дальнейшего развития ситуации. Неопределенность связана с нестабильностью характеристик сложных объектов и процессов, а также с недостаточностью или отсутствием информации о возмущающих воздействиях, что обуславливает отсутствие точной модели объекта на всем интервале управления. Существующие методы управления безопасностью имеют качественный характер либо нуждаются в большом количестве

точных исходных данных. Не все цели и условия выбора управляющих решений могут быть сведены к количественным соотношениям, описание объекта управления является сложным при формализации или вообще отсутствует.

Интенсивное развитие техники и новые компьютерные технологии приводят к значительному усложнению структуры промышленных систем. Для технических систем сложность точных математических моделей приводит к росту трудоемкости расчетов, несоответствию модели реальному процессу и, как следствие, снижению эффективности управленческих решений. Востребованность в промышленности технологий управления безопасностью при неполном объеме информации приводит к необходимости создания новых методов для эффективного управления.

При управлении безопасностью промышленного объекта принятие решений может быть обеспечено при помощи диагностических моделей, в которых используются лингвистические оценки, базирующиеся на нечеткой логике. Основы теории нечеткого управления изложены в работах А.Н. Аверкина, И.З. Батыршина, Д. Дюбуа, Л.А. Заде, А.О. Недосекина, Е. Мамдани, С.А. Орловского, Д.А. Поспелова, А.П. Ротштейна, М. Суджено, Т. Такахи, Х. Танаки, Т. Тэрано, С.Д. Штовбы, Р.Р. Ягера, Н.Г. Ярушкиной и других авторов. Применение теории нечетких систем управления в условиях неопределенности представляет собой один из самых современных методов управления. Результат применения этих методов приводит к получению оптимальных решений задачи управления безопасностью за приемлемое время, так как скорость обучения нечетких систем управления превышает скорость изменения параметров объекта управления.

Промышленные и транспортные системы состоят из большого количества элементов, причем влияние каждого из этих элементов и внешних возмущений на общее поведение системы имеет очень сложный характер. В многоэлементных системах взаимодействие элементов

и взаимозависимости повреждений элементов играют критическую роль в общей массе повреждений структуры от землетрясения. Исследование динамики взаимодействия подвижного состава и пути проведено в работах Х. Вакуи, У.С. Ву, А. Викенса, В.К. Гарга, Р.В. Дуккипати, Е.П. Королькова, В.А. Лазаряна, М. Тэнеба, М. Соджейба, Ю.М. Черкашина, Я.Б. Янга и других авторов. Среди наиболее сложных проблем можно выделить задачи исследования взаимодействия подвижного состава с рельсами при сейсмическом воздействии. Решение задач управления транспортной системой и оценки возникновения неблагоприятных последствий в результате сейсмических возмущений целесообразно также основывать на использовании теории нечетких множеств.

Для управления сложными техническими объектами, имеющими индивидуальные динамические характеристики, необходимо проводить исследования сейсмических воздействий. При этом одна из наиболее сложных задач заключается в количественном анализе акселерограмм, их модификации и численном моделировании для оперативного прогнозирования характеристик грядущего землетрясения и возможности уменьшения чрезвычайных последствий. Методы и особенности обработки результатов анализа акселерограмм, теории сейсмобезопасности и методики генерирования синтезированных сейсмограмм изложены в работах К. Аки, Ф.Ф. Аптикаева, Я.М. Айзенберга, Ф. Бочети, Е.Г. Бугаева, Х.Л. Вонга, Д. Зуолина, Ф. Копенса, М. Макормака, Н.Н. Михайлова, Н. Ньюмарка, Э. Розенблюта, П. Ричардса, В. Штивельмана и других авторов.

Развитие методов фрактального анализа и моделирования позволяет совершенствовать методику оперативного анализа сейсмических возмущений. Методы подхода к анализу временных рядов с позиций нелинейной динамики представлены в работах В.С. Захарова, Р.М. Кроновера, Ю.Н. Кликушина, Б. Мандельброта, Е. Федера, М. Шредера и других авторов. Отметим, что важной и сложной задачей является применение методов фрактального анализа к управлению безопасностью с учетом сейсмических воздействий.

Все изложенное выше определяет актуальность выбранной темы диссертационной работы.

Целью работы является разработка новой методики управления безопасностью технических систем с учетом сейсмических воздействий и совершенствование методов оценки данных сейсмического мониторинга.

Методы исследования. В диссертации использованы методы системного анализа, теории управления, теории нечетких множеств, теории принятия решений, фрактального анализа, теории устойчивости движения, теории динамических систем.

Научная новизна. В диссертационной работе предложен подход к управлению безопасностью промышленного объекта при сейсмическом воздействии на основе применения многокритериального управления. Предложена новая методика оценки повреждений промышленных объектов после сейсмических воздействий. Разработана новая методика анализа сейсмических воздействий, действующих на техническую систему, основанная на применении фрактального анализа, которая позволяет прогнозировать поведение системы и диагностировать нестабильные состояния. Полученные результаты служат основой нового подхода к управлению безопасностью промышленных объектов, количественному измерению опасности в промышленной системе при сейсмическом воздействии и построению автоматизированной информационной системы управления безопасностью.

Достоверность и обоснованность. Достоверность результатов, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректностью принятых допущений и строгостью аналитических и качественных методов, сравнением с результатами, полученными с помощью других методов. Результаты работы обсуждались на научных семинарах, на научно-технических, в том числе международных, конференциях. Все утверждения диссертации обоснованы, приведены полные обоснования выводов.

Практическая ценность. Областью применения разработанных в диссертации методов оценки и управления безопасностью технических систем при сейсмических воздействиях являются задачи системного анализа,

теории управления и задачи создания автоматизированной системы управления. Применение методики нечеткого управления позволит разработать элементы автоматизированной информационной многопараметрической многокритериальной системы управления безопасностью с учетом данных о негативных событиях, оценки факторов риска и мониторинга состояния объектов технической системы. Предлагаемая оценка повреждений технической системы позволит определять необходимость ремонта, укрепления или модернизации сооружений, устанавливать зависимости индикаторов повреждения для оценки допустимой нагрузки, длительность и производительность обслуживания сооружений. Методы фрактального анализа могут применяться для оперативной оценки сейсмического воздействия на изменение уровня безопасности промышленной системы, изучения тенденций развития негативных ситуаций при функционировании промышленного объекта, в задачах совершенствования строительных технологий, используемых в промышленности, в задачах совершенствования технологий обеспечения сейсмобезопасности промышленных и транспортных конструкций.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Учреждения Российской академии наук Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, а также в рамках работ по проекту Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 10-08-00826-а).

Основные результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения.

Личный вклад автора в проведенное исследование. В диссертацию включены только те результаты, которые получены лично автором. В совместно опубликованных работах научному руководителю принадлежат постановки задач, другим соавторам – рассмотрение технических деталей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались: на XVI, XVII, XXI межвузовских конференциях «Актуальные проблемы естествознания» (Н. Новгород, РГОТУПС, 2002, 2004, 2009 гг.); на научно-практической конференции «Безопасность как фактор устойчивого развития региона» (Ижевск, РГОТУПС, 2006 г.); на Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, РУДН, 2006 г.); на XVII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН, 2009 г.); на научно-практической конференции «Неделя науки – 2009. Наука МИИТа – транспорту» (Москва, МИИТ, 2009); на Международной научной конференции «Фундаментальные проблемы системной безопасности» (РАН, 2009 г.); на научной конференции МГТУ «Станкин» – ИММ РАН по математическому моделированию и информатике (МГТУ «Станкин», 2009, 2010 гг.); на семинаре кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения (Москва, РОАТ, 2010 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 работа общим объемом 6,2 п.л., в том числе четыре [1–4] – в журналах из перечня изданий, рекомендуемых ВАК, объемом 2,3 п.л. В совместных работах автору принадлежат результаты в равных долях с соавторами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 165 страниц, список литературы включает в себя 185 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана характеристика области исследований. Представлен обзор научных результатов исследований по теме диссертации, сформулированы основная цель исследования и задачи исследования, охарактеризованы методы исследования, отмечены научная новизна и практическая ценность работы. Приводятся сведения об апробации результатов диссертации и публикациях.

В первой главе рассмотрена структурная схема системы управления безопасностью промышленного объекта. Предложена методика принятия решений при нечетком многокритериальном управлении промышленным объектом с учетом сейсмических воздействий, базирующаяся на методах оптимизации и теории нечетких множеств.

Предприятие представляет собой открытую систему, функционирующую в нестабильной окружающей среде. Объектом анализа опасностей является система «человек–машина–окружающая среда», в которой в единый комплекс объединены технические объекты, люди и окружающая среда, взаимодействующие друг с другом.

Функционирование промышленного объекта можно рассматривать как последовательность смены состояний на некотором интервале времени (t_0, t_k) . Состояние промышленного объекта в каждый момент времени $t \in (t_0, t_k)$ характеризуется набором параметров:

$$Y = \{Y_i^1, Y_j^2, Y_k^3, Y_m^4, Y_l^5\},$$

где $\{Y_i^1, i=1, \dots, I\}$ – параметры состояния технологии данного процесса; $\{Y_j^2, j=1, \dots, J\}$ – параметры состояния зданий и сооружений; $\{Y_k^3, k=1, \dots, K\}$ – параметры состояния оборудования; $\{Y_m^4, m=1, \dots, M\}$ – параметры состояния персонала, $\{Y_l^5, l=1, \dots, L\}$ – параметры состояния систем управления.

Для предотвращения аварийных ситуаций негативные последствия сейсмического воздействия должны быть сведены к минимуму путем непрерывного мониторинга параметров промышленного объекта. Управление безопасностью предполагает анализ и оценку потенциальных опасностей, опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах и в технологическом процессе, а также анализ последствий и разработку мероприятий, обеспечивающих требуемый уровень безопасности промышленного объекта.

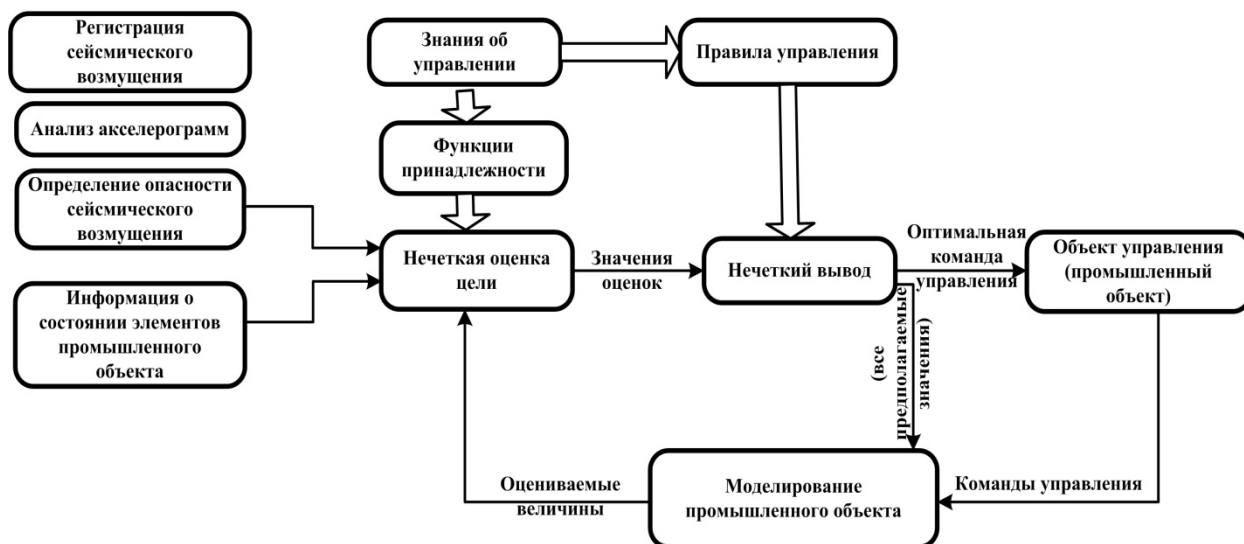


Рис. 1

Множество параметров, описывающих состояние промышленного объекта, может использоваться для формирования правил управления. Количество правил управления определяется количеством состояний объекта, которое, в свою очередь, зависит от набора параметров, характеризующих данный промышленный объект. На основе нечеткой оценки проводится выбор оптимальных команд и мероприятий по обеспечению безопасности промышленного объекта (рис. 1). Информация о состояниях промышленного объекта, на основе которой принимается решение о выборе мероприятий, обеспечивающих безопасность промышленного объекта, представляется в виде нечеткого отношения предпочтения во множестве альтернатив выбора.

Проведено сравнение групп мероприятий, обеспечивающих безопасность промышленного объекта при сейсмических воздействиях. Управление промышленным объектом осуществлено по схеме Беллмана–Заде. Считаем известными: $P = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ – множество вариантов, которые подлежат многокритериальному анализу; $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ – множество критериев, по которым оцениваются варианты. Учитываем сравнение четырех групп мероприятий ($P_1 - P_4$) для увеличения безопасности промышленного объекта: P_1 – мероприятия по увеличению сейсмоустойчивости зданий и сооружений; P_2 – мероприятия в области

повышения уровня противопожарной защиты и обеспечения пожарной безопасности; P_3 – мероприятия в области обучения персонала; P_4 – мероприятия в области модернизации оборудования. Для оценки мероприятий воспользуемся следующими критериями: G_1 – ожидаемый эффект от реализации группы мероприятий для снижения рисков при сейсмическом воздействии; G_2 – стоимость реализации группы мероприятий; G_3 – время, необходимое на осуществление группы мероприятий; G_4 – сложность осуществления группы мероприятий.

Задача многокритериального анализа состоит в упорядочивании элементов множества P по критериям множества G . Критерий G_i можно описать с помощью нечеткого множества

$$\tilde{G}_i = \left\{ \frac{\mu_{G_i}(P_1)}{P_1}, \frac{\mu_{G_i}(P_2)}{P_2}, \frac{\mu_{G_i}(P_3)}{P_3}, \frac{\mu_{G_i}(P_4)}{P_4} \right\},$$

где $\mu_{G_i}(P_j)$ – степень принадлежности элемента P_j ($j=1, 2, 3, 4$) нечеткому множеству.

Степени принадлежности нечеткого множества $\tilde{G}_i$ установлены методом построения функций принадлежности на основе парных сравнений. При использовании этого метода необходимо сформировать матрицы парных сравнений по каждому критерию. Общее количество таких матриц равно количеству критериев, т.е. четырем.

Оптимальная по выбранным критериям группа мероприятий определяется с помощью пересечения частных критериев:

$$\begin{aligned} \tilde{D} = \tilde{G}_1 \cap \tilde{G}_2 \cap \tilde{G}_3 \cap \tilde{G}_4 = & \left\{ \frac{\min(\mu_{G_1}(P_1), \mu_{G_2}(P_1), \mu_{G_3}(P_1), \mu_{G_4}(P_1))}{P_1}, \right. \\ & \frac{\min(\mu_{G_1}(P_2), \mu_{G_2}(P_2), \mu_{G_3}(P_2), \mu_{G_4}(P_2))}{P_2}, \frac{\min(\mu_{G_1}(P_3), \mu_{G_2}(P_3), \mu_{G_3}(P_3), \mu_{G_4}(P_3))}{P_3}, \\ & \left. \frac{\min(\mu_{G_1}(P_4), \mu_{G_2}(P_4), \mu_{G_3}(P_4), \mu_{G_4}(P_4))}{P_4} \right\}. \end{aligned}$$

Наилучшая группа мероприятий определяется следующим образом:

$$\tilde{D} = \arg \max(\mu_D(P_1), \mu_D(P_2), \mu_D(P_3), \mu_D(P_4)), \quad (1)$$

где с помощью $\arg \max(\mu_D(P_i))$ определяется значение аргумента, при котором достигается максимум.

Разработана методика многокритериального управления безопасностью промышленного объекта, базирующаяся на использовании теории нечетких множеств. С помощью формулы (1) проведены расчеты по многокритериальному выбору мероприятий, обеспечивающих безопасность промышленного объекта при сейсмическом воздействии. Выделены группы мероприятий, которые являются предпочтительными для поддержания уровня безопасности и предотвращения чрезвычайных ситуаций.

Важно отметить, что существующие методы анализа безопасности промышленных объектов носят преимущественно вероятностный характер. Их использование не дает ответа на вопросы о том, какие мероприятия необходимо внедрять в первую очередь, и на что выделять средства. Использование предлагаемых методов позволит проводить ранжирование мероприятий и осуществлять обоснованный выбор управляющих решений на основе теории нечетких множеств.

В главе 2 рассмотрена схема анализа повреждений системы после сейсмического воздействия с использованием теории нечетких множеств. Предложен алгоритм нечеткого анализа повреждений, возникших при сейсмическом воздействии, на промышленном объекте. Рассмотрены примеры анализа состояния промышленного сооружения и железобетонного моста.

Оценка степени повреждения проводится в несколько этапов путем построения системы нечетких классификаторов. Состояние промышленного объекта после сейсмического воздействия классифицируется по степени повреждения элементов сооружения с терм-множеством значений {повреждений нет, небольшое повреждение, умеренное повреждение, серьезное повреждение, разрушение} $D = \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$

и характеризуется функциями принадлежности $\mu_1(d), \dots, \mu_5(d)$ трапецеидального вида.

Для оценки повреждений необходимо провести классификацию промышленного объекта по типу структур и разбить эти структуры на подклассы. Повреждение промышленного объекта можно оценить с помощью соотношений:

$$B = \bigcup_{i=1}^M B_i, \quad \mu_B = \bigvee_i (\mu_{B_i}),$$

где B – характеристика повреждения всего объекта, B_i – характеристика повреждения объекта, полученная по i -й группе данных, M – количество групп данных.

Для определения интегрального показателя безопасности вводится двухуровневая шкала, содержащая набор базовых факторов B_i . При анализе повреждений промышленного сооружения в качестве базовых факторов выбраны b_1 – повреждения здания (ПЗ), b_2 – повреждения оборудования (ПО), b_3 – повреждения коммуникаций (ПК). В случае анализа повреждений железобетонного моста рассмотрены b_1 – повреждения пролетных сооружений (ПС), b_2 – повреждения мостовых опор (МО), b_3 – повреждения мостового полотна (МП). Базовые факторы характеризуются наборами своих составляющих факторов – U -факторов.

Пусть для i -й группы данных, связанных с j -м фактором оценки ($j \leq N$) сооружения, U_{ij} обозначает состояние повреждения j -го фактора. Обозначим состояния U -фактора $U_{ij} = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iN}\}$, где u_{ij} представляет j -й фактор, $i = 1, \dots, N$.

Вводится нечеткое множество весов U -факторов $P = (p_1, p_2, \dots, p_N)$, где p_j показывает соответствующий вес j -го фактора u_{ij} . Нечеткое множество P удовлетворяет условию $\sum_{j=1}^N p_j = 1$.

Нечеткое множество оценки i -го базового фактора на множестве степени повреждения D удовлетворяет соотношению $U_i = (u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^l)$, где u_{il} обозначает значение оценки i -го U -фактора для l -уровня повреждения.

После введения уровней оценки для каждого U -фактора базовые факторы оцениваются согласно следующей формуле:

$$U_i = \begin{pmatrix} u_{i1}^1 & u_{i1}^2 & \dots & u_{i1}^l \\ u_{i2}^1 & u_{i2}^2 & \dots & u_{i2}^l \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{iN}^1 & u_{iN}^2 & \dots & u_{iN}^l \end{pmatrix}.$$

Производится оценка базовых факторов, расчет интегрального показателя степени повреждения промышленного объекта и оценка уровней повреждений различных групп элементов исследуемой системы.

В главе дано применение разработанной методики к конкретным примерам оценки повреждений промышленного сооружения и железобетонного моста, в частности, составлены матрицы оценки и сделаны расчеты агрегированных показателей.

Кроме того, в главе изучена математическая модель динамического взаимодействия высокоскоростного поезда и железнодорожного полотна при сейсмических воздействиях. Матричные дифференциальные уравнения модели исследованы с помощью качественных методов теории устойчивости движения, а также с помощью численных методов. Исследован подход к оценке безопасности движения поезда с учетом сейсмических возмущений.

Комбинированная динамика поезда и железнодорожного полотна во время сейсмического воздействия определяется решением нелинейных уравнений движения поезда и структуры железнодорожного пути с учетом контактного взаимодействия в направлении нормали к контактной поверхности между колесом и рельсом, и с учетом сейсмической волны. Сформулированы условия устойчивости движения транспортных динамических систем, моделируемых векторно-матричными уравнениями вида $A\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Cx(t) = F(t)$, где $x(t)$ и $F(t)$ – n -мерные векторы соответственно обобщенных координат и внешних сил; A , B , C –

вещественные квадратные матрицы размеров $n \times n$ соответственно масс, демпфирования и жесткости. Получены необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости по Ляпунову состояния равновесия. Полученные условия позволяют дать рекомендации и проанализировать движение транспортного средства с учетом возможностей наскока реборды колеса на рельс и схода колеса с рельса. Рассмотрено движение вагона по свободно опирающемуся мосту при горизонтальном ускорении в поперечном направлении, вызванном землетрясением. Полученные зависимости вертикальных нагрузок и направляющих усилий при взаимодействии первого и второго колес первой колесной пары с рельсами, иллюстрируют неустойчивый характер поведения колесной пары.

В главе 3 проанализированы методы анализа акселерограмм, разработана методика фрактального анализа сейсмических возмущений, действующих на промышленный объект.

Управление безопасностью при сейсмических воздействиях подразумевает наличие системы мониторинга сейсмических возмущений. Работа системы обнаружения землетрясения предполагает анализ данных ряда сейсмографов s - и p -волн, расположенных в районе расположения промышленного объекта, а также удаленных сейсмографов. Задача анализа акселерограммы заключается в предсказании по параметрам сейсмического шума и первым пикам p -волн опасности предстоящего сейсмического воздействия на промышленный объект.

Сейсмическое воздействие соответствует нестационарному случайному процессу и имеет сложные частотно-временные характеристики. Как правило, такие сигналы состоят из близких по времени, короткоживущих высокочастотных компонент и долговременных, близких по частоте низкочастотных компонент. Для обработки геофизических временных рядов применяют спектральный анализ, позволяющий изучать частотные образы сигналов, т.е. получать амплитудно-частотный спектр и определять присутствие некоторых частот в исследуемом сигнале. В главе охарактеризованы методы анализа сейсмических возмущений. Большинство методов дает значительное расхождение в оценке и эффективно только

при хорошем уровне сигнала. Применение разработанной в диссертации методики фрактального анализа позволяет уменьшить время оценки сейсмических возмущений. Алгоритм фрактального анализа позволяет обнаружить сейсмическое возмущение в период, когда оно только перестает фиксироваться как шум и позволяет предсказать с достаточной точностью дальнейшее поведение сейсмического процесса.

Методы фрактального анализа основаны на статистической обработке исследуемой физической величины. Для оценки фрактальных свойств акселерограмм используется безразмерный показатель

$$R/S = (a \cdot N)^H,$$

где a – некоторая постоянная, N – объем выборки, H – показатель Хёрста, принимающий значения от нуля до единицы.

Зависимость отношения R/S от времени наблюдения, построенная в логарифмическом масштабе, представляет исследуемый процесс в виде фрактальной функции. При аппроксимации отношения R/S прямой линией определяется показатель Херста H .

Для нахождения корреляционной энтропии K_2 вычисляется корреляционный интеграл $C(r, n)$ и рассматривается его зависимость от расстояния r и от размерности n фазового пространства:

$$K_2(r, n) = \ln \frac{C(r, n)}{C(r, n+1)}.$$

На рис. 3 представлены результаты вычисления показателя Херста акселерограммы землетрясения в Газли (рис. 2), соответствующей периодическому устойчивому процессу. В результате построения вычислен показатель Херста акселерограммы, который равен 0,53. Фрактальная размерность равна 1,47, а корреляционная размерность составляет 1,17. Вычисленные фрактальные показатели близки к показателям броуновского фрактального процесса.

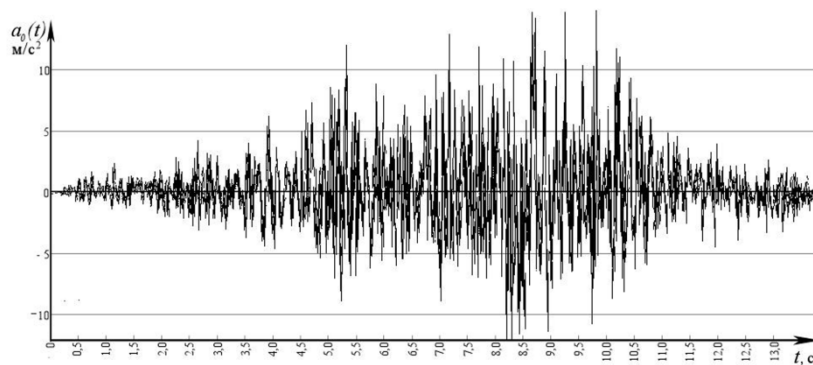


Рис. 2

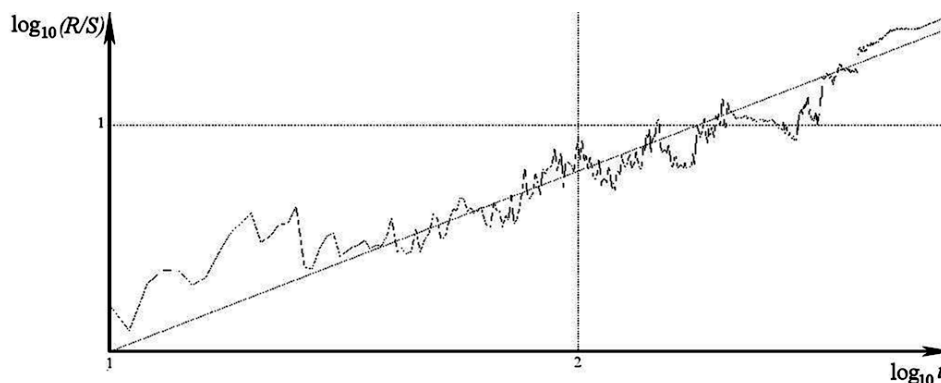


Рис. 3

Таким образом, в главе проведен фрактальный анализ набора акселерограмм землетрясений. Построены графики основных фрактальных зависимостей и вычислены фрактальные характеристики, такие как корреляционная размерность, корреляционная энтропия, показатель Херста. Показано, что акселерограммы носят характер, близкий фрактальным моделям, поведение которых хорошо изучено.

Кроме того, в главе проведен анализ фрактальных показателей динамического поведения элемента конструкции сооружения (консольного стержня) при сейсмическом воздействии. Сейсмическая нагрузка на консоль представляет собой суммарную инерционную силу, которая включает в себя заданную возмущающую инерционную силу, связанную с заданным ускорением $\ddot{a}_0(t)$, и инерционную силу, связанную с ускорениями $\ddot{u}(t)$ упругих колебаний консоли: $S(t) = m\ddot{a}_0 + m\ddot{u}(t) = m\ddot{u}_c(t)$.

На рис. 4 изображено перемещение точечной массы m в результате напряженно-деформированного состояния консоли. На рис. 5 дана иллюстрация фрактального анализа перемещений точечной массы на конце консольного стержня. Получено, что корреляционная размерность процесса составляет 2,7, показатель Херста – 0,34, фрактальная размерность – соответственно 1,66, т.е. перемещение носит нестабильный и непредсказуемый характер.

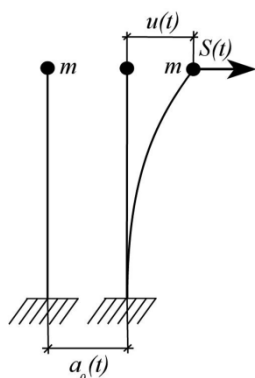


Рис. 4

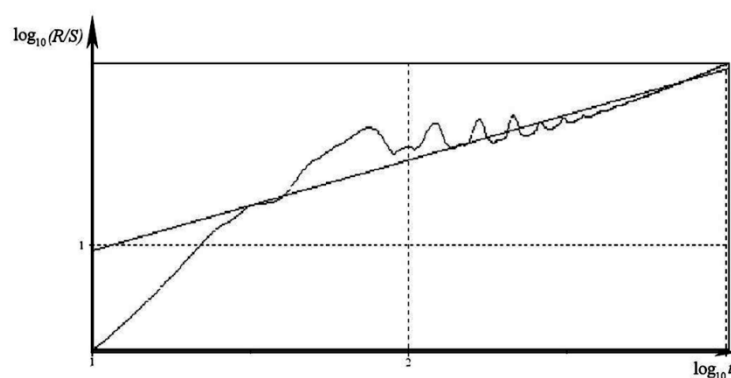


Рис. 5

Методика фрактального анализа, предлагаемая в главе, позволяет на основе исследования зависимости чередования участков с различной фрактальной размерностью и на основе оценки внешних и внутренних факторов прогнозировать поведение системы, а также диагностировать и предсказывать нестабильные состояния. В качестве критерия устойчивости исследуемого процесса принимается полученная величина фрактальной размерности. По степени хаотичности процесса можно исследовать многофакторность и зависимость от большого количества предпосылок, вызвавших нарушение безопасности системы. Использование предлагаемого метода в системах мониторинга позволит уменьшить время обработки результатов анализа сейсмических воздействий и с накоплением данных позволит предсказывать появление сейсмических возмущений на конкретных площадках промышленных объектов.

В заключении диссертации сформулированы результаты, выносимые на защиту:

1. Предложена методика принятия решений при нечетком многокритериальном управлении промышленным объектом с учетом сейсмических воздействий. Методика основана на использовании нечеткой оценки состояния элементов промышленного объекта и данных сейсмического мониторинга. В рамках рассмотренного подхода проведено сравнение групп мероприятий, обеспечивающих безопасность промышленного объекта при сейсмических воздействиях. Методика применима к разработке автоматизированных систем многопараметрического многокритериального управления безопасностью технических систем с учетом данных о негативных событиях, оценки факторов риска и мониторинга состояния объектов системы.

2. Предложена методика многоуровневой оценки повреждений промышленного объекта, подвергшегося сейсмическому воздействию. Методика базируется на построении нечетких классификаторов и логике экспертных рассуждений. Рассмотрены примеры расчетов для оценки повреждений промышленного сооружения и железобетонного моста. Методика применима для принятия решений о необходимости ремонта, укрепления или модернизации сооружений промышленных и транспортных систем.

3. Дано описание модели динамического взаимодействия высокоскоростного поезда и железнодорожного полотна при сейсмических воздействиях. Рассмотрен вопрос об устойчивости решений матричных дифференциальных уравнений модели и об оценке безопасности движения поезда при сейсмических воздействиях.

4. Проанализированы методы анализа сейсмических воздействий. Разработана методика фрактального анализа сейсмических возмущений, действующих на техническую систему. Алгоритм фрактального анализа позволяет оценивать величину сейсмического возмущения по первым пикам

сейсмического возмущения, выделенного из сейсмического шума. Показано, что использование фрактального анализа позволяет повысить вычислительную эффективность и оперативность анализа опасности сейсмических возмущений. Методика применима для мониторинга и обработки сейсмологической информации в системе автоматизации управления безопасностью технических систем.

5. Проведен фрактальный анализ представительского набора акселерограмм, и охарактеризовано динамическое поведение элемента конструкции промышленного объекта (консольного стержня) при сейсмическом воздействии. В результате анализа установлены фрактальные показатели (корреляционная размерность, корреляционная энтропия, показатель Херста) исследуемых процессов.

Публикации по теме диссертации

а) в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Климова Д.В., Дружинина О.В. Использование фрактального анализа акселерограмм при исследовании сейсмобезопасности транспортных систем // Научные технологии. 2010. Т. 11. № 2. С. 3–13.

2. Климова Д.В., Дружинина О.В. Моделирование динамического взаимодействия поезда и железнодорожного пути с учетом оценки безопасности движения при сейсмических воздействиях // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. № 6. С. 23–28.

3. Климова Д.В., Дружинина О.В. Анализ устойчивости транспортных сооружений на основе теории нечетких множеств // Научные технологии. 2010. Т. 11. № 10. С. 46–54.

4. Голечков Ю.И., Климова Д.В. Исследование асимптотических свойств траекторий некоторых классов нелинейных динамических систем // Нелинейный мир. 2009. Т. 7. № 2. С. 131–140.

б) в других научных изданиях и сборниках научных трудов:

5. Климова Д.В. Оценка надежности зданий и сооружений при сейсмических воздействиях // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. Межвузовский сборник научных трудов. М.: РГОТУПС, 2003. С. 45–52.

6. *Климова Д.В.* Оценка надежности системы сооружение-основание при сейсмическом воздействии // Качественное и численное исследование математических моделей динамических систем. Межвузовский сборник научных трудов. М.: РГОТУПС, 2006. С. 58–63.

7. *Климова Д.В.* Применение фрактального анализа сейсмических сигналов при расчете сейсмобезопасности конструкций на транспорте // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. Сборник научных трудов. М.: МИИТ, 2009. С. 135–137.

8. *Климова Д.В., Дружинина О.В.* Изучение сейсмобезопасности на основе фрактального анализа сейсмических сигналов // Фундаментальные проблемы системной безопасности. Сборник статей. Вып. 2. М.: Вузовская книга, 2009. С. 202–206.

9. *Дружинина О.В., Климова Д.В.* Изучение безопасности движения транспортной системы с учетом сейсмических возмущений // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. Вып. 12. М.: ВЦ РАН, 2010. С. 73–84.

10. *Дружинина О.В., Климова Д.В.* Оценка устойчивости и безопасности железнодорожной транспортной системы при сейсмических воздействиях // Вестник МИИТа. 2010. Вып. 22. С. 55–61.

в) публикации в сборниках трудов научных конференций:

11. *Климова Д.В.* Фрактальная параметризация в физике и технике // Тезисы докладов XVI научно-практической студенческой конференции «Актуальные проблемы естествознания». М. – Н. Новгород: РГОТУПС, 2002. С. 27.

12. *Климова Д.В.* Оценка надежности сооружений при сейсмических воздействиях // Тезисы докладов XVI научно-практической студенческой конференции «Актуальные проблемы естествознания». М. – Н. Новгород: РГОТУПС, 2002. С. 26.

13. *Климова Д.В.* Надежность строительных конструкций при сейсмических воздействиях // Актуальные проблемы естествознания: Сборник тезисов докладов XVII межвузовской конференции. М. – Н. Новгород: РГОТУПС, 2004. С. 42.

14. *Климова Д.В.* Вероятностная оценка надежности системы сооружение – основание при сейсмическом воздействии // Безопасность как фактор устойчивого развития региона. Сборник научных трудов научно-практической конференции. М.: РГОТУПС, 2006. С. 8.

15. *Климова Д.В.* Оценка надежности математических моделей динамических систем при случайном сейсмическом воздействии // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии. М.: РУДН, 2006. С. 57.

16. *Климова Д.В.* Исследование моделей сейсмобезопасности конструкций с помощью фрактального анализа // Международная студенческая конференция: Актуальные проблемы естествознания. Фундаментальная наука и транспорт. Сборник тезисов докладов. М.: МИИТ, 2009. С. 40–41.
17. *Климова Д. В.* Фрактальный анализ сейсмических сигналов при изучении моделей сейсмобезопасности конструкций // Материалы XII научной конференции МГТУ «Станкин» и «Учебно-научного центра математического моделирования МГТУ «Станкин» – ИММ РАН» по математическому моделированию и информатике. М.: МГТУ «Станкин», 2009. С. 55–57
18. *Дружинина О.В., Климова Д.В.* О безопасности движения поезда при сейсмических воздействиях // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Труды XVII Международной конференции. М.: ИПУ РАН, 2009. С. 305–308.
19. *Климова Д.В.* О применении теории нечетких множеств для оценки безопасности транспортных сооружений при сейсмических воздействиях // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Труды XVII Международной конференции. М.: ИПУ РАН, 2009. С.430–433.
20. *Климова Д.В.* Изучение сейсмобезопасности объектов на основе фрактального анализа // Наука МИИТа – транспорту. Труды научно-практической конференции. Ч. 2. М.: МИИТ, 2009. С. X-2.
21. *Климова Д.В., Мулкиджан А.С.* Исследование устойчивости технических систем транспорта // Материалы XIII научной конференции МГТУ «Станкин» – ИММ РАН» по математическому моделированию и информатике. М.: МГТУ «Станкин», 2010. С. 200–202.