

На правах рукописи



Маер Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ
НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курган – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Курганский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шапцев Валерий Алексеевич

Официальные оппоненты: **Ивашко Александр Григорьевич** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет», и.о. директора Института математики и компьютерных наук - проректор по информационным технологиям

Кошкин Геннадий Михайлович доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», профессор кафедры теоретической кибернетики

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «20» декабря 2013 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.14 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, аудитория 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет».

Автореферат разослан «18» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Оленников Евгений
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Научно-технический прогресс и постоянно увеличивающиеся потребности человечества способствуют росту сложности машин и систем. Это особенно характерно для современных летательных аппаратов, нефтехимических и металлургических комплексов, телекоммуникационных сетей, различного рода энергетических установок и т.д. В связи с этим возросла актуальность проблемы обеспечения их надежности. Современные сложные системы характеризуются большим числом элементов, многообразием форм их связи, множественностью целей функционирования, отсутствием комплекса математических моделей, в полной мере описывающих их поведение, стохастичностью и многообразием природы элементов, изменчивостью и состава, и структуры.

Оценка надежности таких систем, как на этапе проектирования, так и при их эксплуатации, несмотря на постоянное улучшение характеристик надежности и повышение долговечности изделий и оборудования, остается важнейшей задачей. Актуальность данной задачи постоянно возрастает по ряду причин. Основными из них являются уникальность создаваемых сложных систем, конструктивная сложность, чрезвычайная её потенциальная опасность для обслуживаемого персонала и окружающей среды, стохастичность в функционировании системы в целом и её элементов в отдельности, огромные экономические потери вследствие отказов. Исследованию надежности сложных систем посвящены работы Бусленко Н.П., Гнеденко Б.В., Беляева Ю.К., Соловьева А.Д., Ушакова И.А., Барлоу Р., Прошана Ф.

Как известно, оценка аналитическим способом показателей надежности сложных систем и их доверительных интервалов даже для типовых распределений с простейшим последовательным соединением элементов не поддается аналитическому решению для многих практических задач. В связи с этим для решения таких задач в основном используется статистическое моделирование, например, система RELEX. В подобных системах исследователь, исходя из физических априорных соображений или критериев согласия, подбирает стохастическую параметрическую модель (в виде соответствующих датчиков случайных величин и структуры), имитирующую работу отдельных элементов и системы в целом. Параметры такой системы оцениваются на основе вычислительных имитаций испытаний (посредством выборки). От качества модели датчика, в частности, существенно зависит процесс верификации имитируемой модели и оценки надёжности реального изделия. Адекватная формализация здесь трудно достижима. Действительно, выбранный тип параметрического распределения «из физических соображений» учитывает лишь некоторую априорную информацию, которой обладает исследователь, с одной стороны. С другой – объем проводимых государственных или приёмо-сдаточных испытаний компонентов системы, как правило, ограничен. Это затрудняет проведение анализа гипотез об априорных распределениях по классическим критериям согласия. Именно эти соображения привели к созданию непараметрической и робастной статистик. Например, в работе Сызранцева В.Н. [Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики //Новосибирск, изд-во Наука, 2008, 218 стр.] по исследованию прочностных характеристик газопровода "Уренгой-Сургут-Челябинск"

на основе обширного экспериментального материала показано, что прогнозируемые показатели надежности, вычисленные с помощью методов параметрической статистики, оказались завышенными на 25-40% по сравнению с реальными данными.

Хорошо известно, что функционирование реальных устройств (систем) содержит в себе элементы случайности. Это связано с локальными неоднородностями вещества, которые приводят к неравномерности изнашивания, старения, а вместе с этим и к разбросу сроков службы изделий, изготовленных, казалось бы, в тождественных условиях. В процессе изготовления допускаются, пусть и небольшие, но отклонения от заданных размеров, небольшие нарушения в температурной или иной обработке. В результате качество изделий оказывается неоднородным, разбросанным по случаю. Для описания модели отказов таких изделий (систем) в теории надежности чаще всего используются следующие параметрические распределения: экспоненциальное, нормальное, Вейбулла-Гнеденко, гамма-распределение, распределения с возрастающей и убывающей функциями интенсивности. В этом случае модель отказов известна с точностью до некоторых неизвестных параметров. **В большинстве же задач вид функции распределения, определяющий модель отказов, неизвестен.** В этом случае мы имеем дело с непараметрической постановкой задачи.

Таким образом, для проведения адекватного моделирования, в частности, адекватного описания моделей отказов элементов, и для корректной оценки на этой основе показателей надежности сложных систем необходимо применять методы непараметрической статистики.

Цель диссертационной работы – разработать математические модели и компьютерный инструмент для оценки надежности сложных систем, функционирующих в условиях непараметрической статистической неопределенности.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

- анализ существующих моделей и методов оценки надежности сложных систем;
- поиск подходов и методов, которые позволяют решать задачу оценивания надежности сложных систем в условиях непараметрической статистической неопределенности; исследование возможности применения методов непараметрической статистики для решения этой задачи;
- разработка метода отображения структурной модели произвольной сложной системы в параллельно-последовательную структуру;
- разработка математических моделей датчиков псевдослучайных чисел на основе непараметрической статистики;
- проведение экспериментальных исследований разработанных моделей, алгоритмов и методов;
- разработка комплекса программ поддержки исследования надёжности моделей сложных систем в условиях непараметрической статистической неопределенности их компонентов.

Объектом исследования диссертационной работы является сложная система, функционирующая в условиях непараметрической статистической неопределенности.

Предмет исследования – методы и средства (математические модели и компьютерные программы) оценки надежности сложной системы.

Методы исследования. В исследовании использованы методы математического моделирования, теории графов, теории вероятностей и математической статистики, методы непараметрической статистики. Для разработки программного комплекса применено объектно-ориентированное программирование, системный анализ и теория реляционных баз данных.

На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие четырем пунктам паспорта специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам.

Пункт 1: *Разработка новых математических моделей для моделирования объектов и явлений.*

1. Созданные три новые математические модели и алгоритмы генерации псевдослучайных чисел на основе непараметрической статистики позволяют имитировать поведение показателей (параметров) сложной системы и ее компонентов в условиях отсутствия сведений о виде распределения и его параметрах. А именно, созданы:

- одномерный непараметрический датчик с учетом априорной информации;
- многомерный непараметрический датчик;
- непараметрический датчик псевдослучайного процесса.

Пункт 3: *Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных технологий.*

2. Экспериментально проверенное совместное использование графового отображения структуры сложной системы с неопределенной статистикой компонентов и оригинального метода дискретной математики обеспечивают преобразование произвольной структурной модели сложной системы в параллельно-последовательную структуру.

Пункт 2: *Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей.*

3. Непараметрический метод выявления малонадежных компонентов системы посредством анализа их последовательных цепочек позволяет модифицировать структурную модель системы, обеспечивая тем самым большую её надёжность.

Пункт 4: *Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.*

4. Результаты теоретических исследований реализованы в виде эффективных численных методов и алгоритмов в оригинальном комплексе программ моделирования по исследованию надежности сложных систем. Оригинальность комплекса заключается в наличии полного набора (от одномерных до векторных с зависимыми компонентами) непараметрических датчиков, процедуры преобразования произвольной сетевой структуры в параллельно-последовательную, численных процедур непараметрических оценок показателей надежности. Введён блок анализа и выявления малонадежных и высоконадежных элементов для решения задач управления надежностью. Он имеет следующие возможности:

- создание масштабируемой графовой модели сложной системы, обеспечивающей вычислительные эксперименты;
- сохранение модели сложной системы средствами СУБД;
- настройка компонентов модели системы на функционирование в соответствии с тем или иным алгоритмом генерации псевдослучайных чисел по ограниченным экспериментальным данным;
- отображение априорной информации (вид распределения, его параметры, симметричность, ограниченность на интервале и т.д.) в процессе моделирования поведения компонента сложной системы;
- использование непараметрических оценок (как точечных, так и интервальных) надежности сложной системы;
- создание отчетов об экспериментальном исследовании модели сложной системы в текстовом редакторе.

По классу решаемых задач в условиях непараметрической статистической неопределенности комплекс не имеет аналогов. Вместе с интерфейсом комплекс представляет собой макет системы стохастического моделирования для проведения вычислительного эксперимента по исследованию надёжности сложных систем.

Таким образом, в соответствии с формулой специальности 05.13.18 в диссертации представлены оригинальные результаты одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Научная новизна и теоретическая значимость исследования отражены в следующих результатах.

1. Разработаны вероятностные математические модели и соответствующие им численные алгоритмы непараметрических датчиков:

- алгоритм одномерного непараметрического датчика с учетом априорной информации;
- алгоритм многомерного непараметрического датчика;
- алгоритм процессного непараметрического датчика.

2. Разработан алгоритм преобразования произвольной структуры сложной системы в параллельно-последовательные цепочки.

3. Предложен непараметрический метод выявления малонадежных компонентов сложной системы посредством анализа последовательных цепочек.

Практическая значимость работы состоит в применимости программного комплекса для расчета надежности сложных систем в условиях непараметрической статистической неопределенности.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные модели и методы апробированы при исследовании надежности следующих объектов. **Первый** - корпоративная сеть Главного управления Банка России по Курганской области. Оценена надежность такой сети в целях передачи данных и голосового трафика. В качестве инструмента использовался разработанный программный комплекс. Вычислены точечные и интервальные оценки надежности, предложенные в работе. Получен акт о внедрении результатов диссертационного исследования.

Второй – магистральный газопровод «Уренгой-Сургут-Челябинск». Исследована надежность участка трубы на входе/выходе в каждую компрессорную станцию магистрального газопровода. Моделирование поведения параметров модели проводилось с помощью разработанного многомерного непараметрического датчика. Оценены вероятность безотказной работы, число циклов деформации, коэффициент запаса. Получена справка о внедрении в учебный процесс.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: VI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования» (Тамбов, 2008); II Международная научно-практическая конференция «Молодежь и наука: реальность и будущее» (Невинномысск, 2009); VI межотраслевая научно-техническая конференция «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли» (Новоуральск, 2009); XVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2009); Первый Всероссийский конкурс молодых ученых (Миасс, 2009); International Symposium on STOCHASTIC MODELS in RELIABILITY ENGINEERING, LIFE SCIENCE and OPERATIONS MANAGEMENT (Israel, 2010); Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 150-летию образования Банка России (Курган, 2010); XII Международный симпозиум по непараметрическим методам в кибернетике и системному анализу (Красноярск, 2010)

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 12 печатных работ, в том числе 5 в изданиях [7, 8, 10, 11, 12], рекомендованных ВАК, и 1 свидетельство о регистрации электронного ресурса [9].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 2 приложений, изложенных на 147 страницах машинописного текста, содержащих 42 рисунка, 26 таблиц, список литературы из 109 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, перечислены основные результаты работы.

В первой главе представлен аналитический обзор источников по проблеме оценки надежности сложных систем. Сформированы задачи диссертационного исследования.

Оценка надежности систем производится аналитическими методами, с одной стороны, и статистическим моделированием систем, с другой. Аналитические методы предполагают известную математическую модель функционирования системы. Статистическое моделирование применяется, когда математическая модель функционирования системы задана не полностью или неизвестна вообще.

В рамках аналитического подхода рассматриваются общий случай функционирования системы, состоящей из n независимых элементов, системы, состоящие только из последовательных соединений элементов или только из параллельных соединений, метод путей и сечений, а также рекуррентный метод.

Соответствующие методы позволяют рассчитать надежность систем только в том случае, если количество элементов ограничено, если соединения элементов простые (параллельные или последовательные соединения), если число путей (метод путей) невелико и известен вид функции распределения отказов элементов системы (в частности, это может быть показательное или стареющее распределение). При этом все элементы должны быть однородны для того, чтобы возможно было вычислить функцию распределения всей системы. В случае сложных, реальных систем эти методы не позволяют получить адекватную оценку надежности.

Существует ряд методов компьютерного моделирования и программных комплексов (ПК), созданных на их базе. В п. 1.3 главы были проанализированы функциональные возможности как отечественных разработок (АСРН, АСОНИКА-К, BUNKER), так и зарубежных (RELEX, Risk Spectrum, ISOGRAPH, Sapphire-7). Ряд рассмотренных ПК является узко специализированными, т.е. предназначен для расчета надежности определенного вида изделий и устройств (АСРН - радиоэлектронная аппаратура и электрорадиоизделия) или предоставляет фиксированный набор подходов, методов, моделей. Они не всегда позволяют исследовать надежность конкретной, заданной системы (Risk Spectrum, RAY, BUNKER, GRAF). Этого недостатка лишены программные комплексы (RELEX, АРБИТР, ПК «УНИВЕРСАЛ»), в основе которых лежит обобщенный подход к проведению моделирования сложных систем.

Полезными свойствами рассмотренных программных комплексов являются:

- развитый интерактивный пользовательский интерфейс;
- расчет надежности на разных стадиях жизненного цикла объекта;
- использование справочников по отдельным видам изделий;
- применение международных стандартов для расчета надежности систем;
- моделирование систем марковскими процессами;
- расчет значимости положительного и отрицательного вклада элемента в надежность всей системы;
- расчет оптимального периода проведения работ по техническому обслуживанию.

Но для них всех характерны следующие недостатки:

- необходимость задания вида функции распределения случайных величин;
- использование параметрических датчиков псевдослучайных чисел (ДПСЧ) сужает условия применимости метода моделирования;
- не все ПК позволяют вычислить параметры ДПСЧ;
- отсутствие непараметрических ДПСЧ;
- невозможность использования априорной информации в ДПСЧ (например, симметричность ф.р., ограниченность, статистические моменты и т.д.), которая позволила бы снизить дисперсию полученных данных;
- отдается предпочтение лишь логнормальному распределению, распределению Вейбулла или экспоненциальному.

По итогам анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе излагается непараметрический подход проведения моделирования и расчета надежности сложных систем, разработаны математические

модели и численные алгоритмы непараметрических ДПСЧ, приводятся непараметрические оценки показателей надежности системы, даны рекомендации по увеличению надежности системы.

В диссертационной работе использован непараметрический подход к расчету надежности сложных систем. Суть его заключается в следующем. При моделировании работы элемента системы считается, что вид функции распределения случайной величины (например, время наработки до отказа) неизвестен. Вся необходимая информация об элементе содержится в экспериментальных данных, полученных по исследуемой случайной величине. При этом принимается, что структура системы - произвольная. Рассматриваемый подход не накладывает ограничений на соединения элементов в системе (допускается одновременное наличие как последовательных, так и параллельных соединений). Предполагается упорядочивание структуры системы в параллельно-последовательную схему по авторскому алгоритму DNF, представленному в третьей главе. Моделирование системы проводится после упорядочения структуры с использованием ДПСЧ, настроенных на свойства каждого компонента системы. По результатам моделирования формируется выборка времени наработки до отказа исследуемой системы. На завершающем этапе рассчитываются показатели надежности с использованием непараметрических методов, а именно: точечные и интервальные оценки средней наработки до отказа, гамма-процентной наработки до отказа, вероятности безотказной работы.

Для проведения статистического моделирования необходимо обладать такими математическими моделями и численными алгоритмами ДПСЧ, которые бы наиболее полно и точно воспроизводили поведение любого элемента системы.

Пусть $\vec{z}_k = (z_1, \dots, z_k) = T\vec{x}_k = T(x_1, \dots, x_k)$, где T - некоторое преобразование. Возьмем в качестве T :

$$\begin{aligned} z_1 &= F_1(x_1); \\ z_2 &= F_2(x_2 | x_1); \\ &\dots \\ z_k &= F_k(x_k | \vec{x}_{k-1}). \end{aligned} \quad (1)$$

На преобразовании (1) основан стандартный метод генерирования многомерных случайных величин через обратное преобразование $X = T^{-1}Z$.

Для маргинальной функции распределения $F_1(x_1)$ и условных функций распределения $F_j(x_j | \vec{x}_{j-1})$, ($j = \overline{2, k}$) получен следующий класс непрерывных непараметрических оценок функций распределений:

$$F_{1N}(x_1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G\left(\frac{x_1 - x_1^{(i)}}{h_N}\right), \quad (2)$$

$$F_{jN}(x_j | \vec{x}_{j-1}) = \frac{A_{jN}}{B_{(j-1)N}}, \quad (3)$$

где

$$A_{jN} = \frac{1}{Nh_N^{j-1}} \sum_{i=1}^N G\left(\frac{x_j - x_j^{(i)}}{h_N}\right) \prod_{\lambda=1}^{j-1} K_\lambda\left(\frac{x_\lambda - x_\lambda^{(i)}}{h_N}\right), \quad (4)$$

$$B_{(j-1)N} = \frac{1}{Nh_N^{j-1}} \sum_{i=1}^N \prod_{\lambda=1}^{j-1} K_{\lambda} \left(\frac{x_{\lambda} - x_{\lambda}^{(i)}}{h_N} \right), \quad j = \overline{2, k} \quad (5)$$

В диссертации показано, что полученные непараметрические оценки F_{1N} , $F_{iN}(x_i | \bar{x}_{i-1})$ и $F_{jN}(x_j | \bar{x}_{j-1})$, ($i \neq j; i, j = \overline{2, k}$) являются асимптотически несмещенными, состоятельными оценками и имеют асимптотически k -мерное нормальное распределение с диагональной корреляционной матрицей (теорема 2.3). Эти теоретические результаты позволяют строить алгоритмы непараметрических датчиков как одномерных, так и многомерных на основе стандартного метода.

При построении многомерного непараметрического датчика воспользуемся стандартным методом генерации случайных векторов, основанном на преобразовании (1). Для этого вместо неизвестных функций распределения $F_1(x_1)$, $F_j(x_j | \bar{x}_{j-1})$, ($j = \overline{2, k}$) в (1) подставим соответствующие оценки (2) – (5), полученные на основе выборки. В результате получаем математическую модель датчика, представленную следующей системой уравнений, где случайные величины U_1, \dots, U_k будут независимы и одинаково равномерно распределены в интервале $[0,1]$:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= F_{1N}(x_1) \\ U_2 &= F_{2N}(x_2 | x_1) \\ &\dots \\ U_k &= F_{kN}(x_k | \bar{x}_{k-1}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для получения численного алгоритма многомерного непараметрического ДПСЧ перепишем систему (6) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} U_{1i} &= F_{1N}(x_{1i}) \\ U_{2i} &= F_{2N}(x_{2i} | x_{1i}) \\ &\dots \\ U_{ki} &= F_{kN}(x_{ki} | \bar{x}_{k-1,i}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Затем генерируются вектора k независимых равномерных в $[0,1]$ чисел (U_{1i}, \dots, U_{ki}) , $i = 1, 2, \dots$. Для каждого i решаем систему (7) с помощью алгоритма стохастической аппроксимации:

$$\left. \begin{aligned} x_{1i}[m] &= x_{1i}[m-1] - \gamma_m (F_{1N}(x_{1i}[m-1]) - U_{1i}) \\ x_{2i}[m] &= x_{2i}[m-1] - \gamma_m (F_{2N}(x_{2i}[m-1] | x_{1i}[m]) - U_{2i}) \\ &\dots \\ x_{ki}[m] &= x_{ki}[m-1] - \gamma_m (F_{kN}(x_{ki}[m-1] | \bar{x}_{k-1,i}[m]) - U_{ki}) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $x_{ij} = \lim_{m \rightarrow \infty} x_{ij}[m]$, $i = 1, 2, \dots$.

Последовательно решая систему (8), получим $\bar{x}_i = (x_{1i}, \dots, x_{ki})$, ($i = 1, 2, \dots$), который при $m \rightarrow \infty$, $N \rightarrow \infty$, $\sum_{m=0}^{\infty} \gamma_{jm} < \infty$, $\sum_{m=0}^{\infty} \gamma_{jm}^2 < \infty$, $j = \overline{1, k}$, будет корнем системы (7).

Для получения одномерного непараметрического датчика будем использовать первое уравнение систем (7) и (8). Программная реализация численного алгоритма датчика исследовалась при $N=100$ для обучающей $\bar{x} = (x_1, \dots, x_{100})^T$ и ге-выборки

$\bar{x}^* = (x_1^*, \dots, x_{100}^*)^T$. Для одномерного нормального распределения на рисунке 1 приведено графическое представление обучающей выборки (синим) и re-выборки (красным).

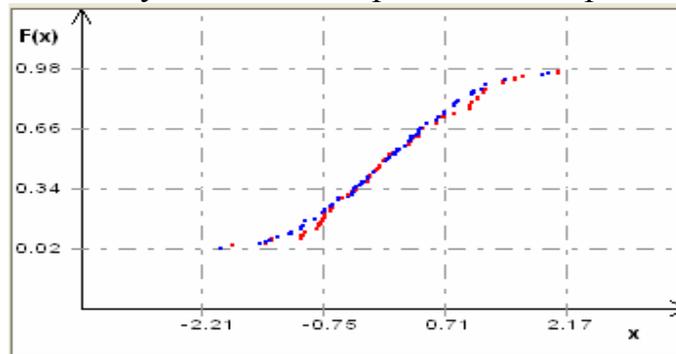


Рисунок 1 – Графическое представление обучающей выборки (синим) и re-выборки (красным)

Для проверки полученных результатов было проведено исследование на однородность двух выборок по непараметрическим критериям Манна-Уитни-Уилкоксона и Смирнова. Для уровня значимости $\alpha = 0.05$ критерии однородности не отвергают нулевую гипотезу.

Если мы располагаем некоторой дополнительной информацией (априорной) о виде функции распределения $F(x)$, то можно построить оценки функции распределения, свойства которых лучше, чем у оценок типа (2).

Априорную информацию можно задать следующим образом:

$$S_j = \int \psi_i(x) dF(x) = 0, \quad i = 1, \dots, r, \quad (9)$$

где функции ψ_1, \dots, ψ_r - известны.

С помощью метода коррелированных процессов строится такая непараметрическая оценка $F(x)$, которая учитывает дополнительную априорную информацию вида (9) и приводит к асимптотически нормальным и оптимальным, в смысле минимума дисперсии, оценкам. Суть метода сводится к модификации эмпирической функции распределения (ЭФР) с учетом информации (9). В результате получаем математическую модель одномерного непараметрического датчика с учетом априорной информации, которую удобно записать в матричном виде

$$\bar{F}_N(x) = F_N(x) - \left\| \int \psi_i(y) dF_N(y) \right\| \Lambda_N^{-1} \left\| \int C(x-y) \psi_j(y) dF_N(y) \right\|, \quad (10)$$

где $\| \dots \|$ - вектор-столбец, штрих означает транспонирование, а Λ_N матрица с элементами $S_{ij}(F_N)$, и $F_N(x)$ - ЭФР.

Учитывая априорную информацию вида (9) и используя математическую модель (10), можно построить численный алгоритм непараметрического датчика, который бы обладал лучшими свойствами по сравнению с одномерным непараметрическим датчиком. Численный алгоритм такого ДПСЧ сводится к алгоритму одномерного непараметрического ДПСЧ, в котором необходимо заменить непараметрическую оценку $F_{1N}(x_1)$ на оценку $\bar{F}_N(x)$, полученную в (10).

Особая роль при исследовании надежности сложных систем отводится ДПСЧ, которые должны адекватно отражать суть физических явлений, характерных для случайных процессов, участвующих в исследовании. В работе рассмотрены основные принципы построения непараметрических датчиков псевдослучайных процессов на основе непараметрических оценок условных функций распределения (2) - (5). Предложен метод нахождения интервала зависимости на основе непараметрических оценок прогноза. Он может быть использован в качестве блока адаптивной настройки в классических бутстреп- процедурах (блочный бутстреп, локальный бутстреп).

Для анализа надежности системы рассчитываются следующие показатели надежности: точечная и интервальная оценка средней наработки до отказа, дисперсия, медиана, мода, точечная и интервальная оценка гамма-процентной наработки до отказа, точечная и интервальная оценка вероятности безотказной работы.

Точечные и интервальные оценки средней наработки до отказа, гамма-процентной наработки до отказа и вероятности безотказной работы приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Формулы для вычисления точечных оценок показателей безотказности непараметрическим методом

Показатель надежности	Точечная оценка	Примечание
Средняя наработка T_{cp} до отказа	$\sum_{i=1}^r t_i [\Delta F(t_i)] + [1 - \hat{F}(t_r)] z_n, t_0 = 0$	$z_n = \max(t_r, \tau_n)$ $\Delta F(t_i) = \hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})$
Гамма-процентная наработка T_γ до отказа	$d_1 t_i + (1 - d_1) t_{i-1}$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$	$\hat{F}(t_{i-1}) \leq 1 - \gamma \leq \hat{F}(t_i)$ $d_1 = \frac{1 - \gamma - \hat{F}(t_{i-1})}{\hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})}$
Вероятность $P(t)$ безотказной работы	$d_2 \hat{P}(t_i) + (1 - d_2) \hat{P}(t_{i-1})$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$	$t_{i-1} \leq t \leq t_i, t \leq t_r$ $d_2 = \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$

Таблица 2 – Формулы для вычисления интервальных оценок показателей безотказности непараметрическим методом

Показатель надежности	НДГ уровня q	ВДГ уровня q
Средняя наработка T_{cp} до отказа	$\hat{T}_{cp} - u_q \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \Delta F(t_i) \sqrt{(t_i - \hat{T}_{cp})^2}}$	$\hat{T}_{cp} + u_q \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \Delta F(t_i) \sqrt{(t_i - \hat{T}_{cp})^2}}$
Гамма-процентная наработка T_γ до отказа	$d'_1 t_i + (1 - d'_1) t_{i-1}$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$ $\overline{F}(t_{i-1}) \leq 1 - \gamma \leq \overline{F}(t_i)$	$d''_1 t_i + (1 - d''_1) t_{i-1}$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$ $\underline{F}(t_{i-1}) \leq 1 - \gamma \leq \underline{F}(t_i)$
Вероятность $P(t)$ безотказной работы	$d_2 \underline{P}(t_i) + (1 - d_2) \underline{P}(t_{i-1})$ $t_{i-1} \leq t \leq t_i$	$d_2 \overline{P}(t_i) + (1 - d_2) \overline{P}(t_{i-1})$ $t_{i-1} \leq t \leq t_i, t \leq t_r$

Кроме рассмотренных показателей надежности, строятся непараметрические оценки функции распределения на основе (2) и плотности распределения, предложенной Розенблаттом-Парзенем в виде:

$$f_n(x) = \frac{1}{n * h_n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h_n}\right), \quad (11)$$

где K - ядро функции Розенблатта-Парзена.

Параметр h_n вычисляется либо на основе информационного функционала

$$\arg \max_{h_N, K(t)} J_N(h_N, K(t)) = \arg \max_{h_N, K(t)} \left\{ \frac{1}{(N-1)h_N} \sum_{j \neq i}^{N-1} K\left(\frac{x_i - x_j}{h_N}\right) \right\} \quad (12)$$

с точностью до вида ядерной функции $K(t)$ и оптимальной величины параметра «размытости» h_N , соответствующего функции $K(t)$, либо задается.

В третьей главе проведено проектирование программного комплекса. Приведены алгоритмы параметрических датчиков и алгоритмы оценивания параметров для них. Предложен численный алгоритм преобразования структурной модели сложной системы в параллельно-последовательную. Для хранения структуры исследуемой модели, ее настроек, результатов моделирования и расчета показателей надежности разработана база данных.

Программный комплекс позволяет осуществлять статистическое моделирование систем в условиях ограниченных выборочных данных с помощью параметрических и непараметрических ДПСЧ, учитывающих априорную информацию и основывающихся на экспериментальных данных (рисунок 2).

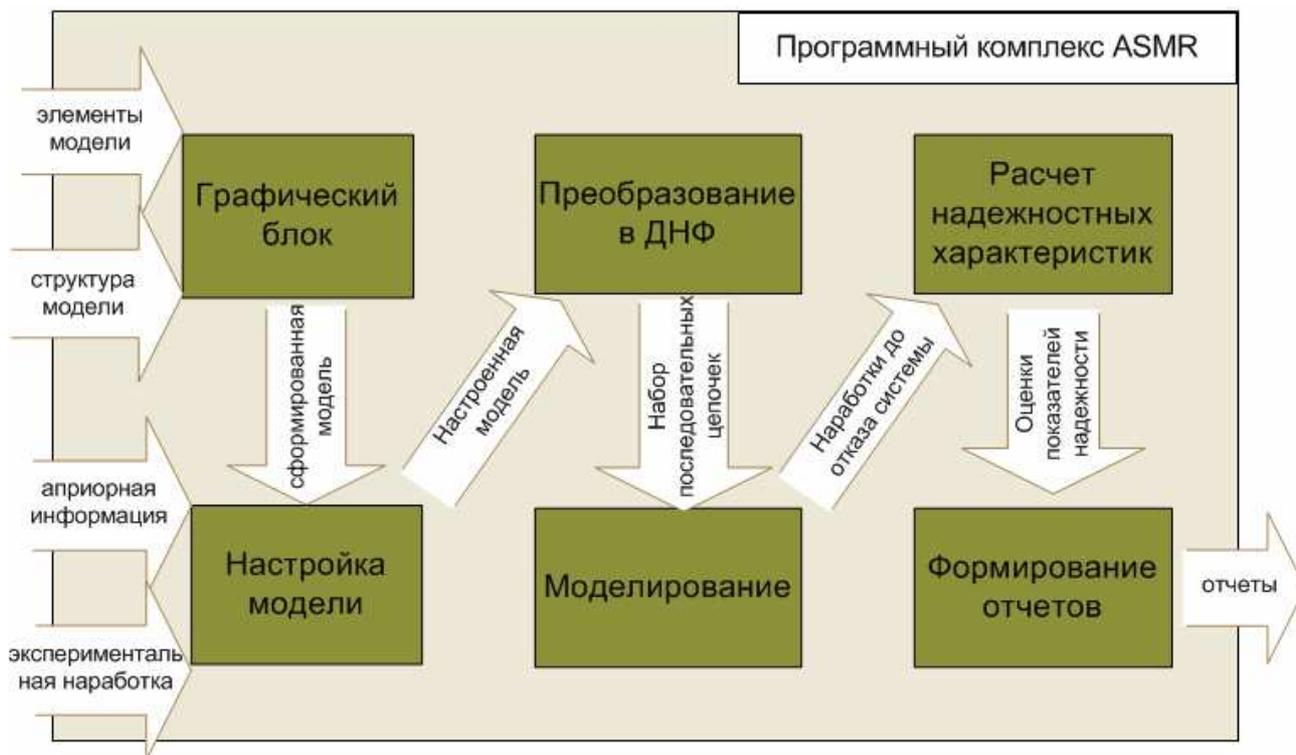


Рисунок 2 – Структура программного комплекса

В спроектированной системе выделены следующие функциональные подсистемы: графический блок, блок настройки моделируемой системы, блок-преобразователь в дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ), блок моделирования испытаний, блок анализа и блок генерации отчетов.

В **графическом блоке** каждый элемент системы отображается в виде специального графического обозначения. Наличие связи между элементами отображается в виде направленной стрелки. Существует возможность интерактивного изменения структуры системы.

Блок настройки задает один из трех способов отображения элемента случайным показателем: параметрический режим с учетом априорной информации (АИ), параметрический режим с учетом АИ и экспериментальных данных и непараметрический режим. Второй режим предполагает нахождение оценок параметров распределений случайного показателя элемента. Если элемент системы находится в режиме редактирования, то появляется возможность задать для него один из трех существующих режимов. Для каждого показателя элемента можно задать его вид распределения, параметры распределения, ввести экспериментальные данные, дополнительную информацию: симметричность, ограниченность распределения и т.д.

Блок-преобразователь в DNF. Суть его работы заключается в том, чтобы представить произвольную структуру модели системы параллельным соединением последовательных структур минимальных путей. Для нахождения всех минимальных путей предлагается следующий численный алгоритм. Пусть задан граф $G = (V, E)$, где V - множество вершин и E - множество ребер, и фиксированы **начальная вершина (source vertex) s** и **конечная вершина (destination vertex) d** . Алгоритм поиска

перечисляет все достижимые пути из s в d . Алгоритм применим и к ориентированным, и к неориентированным графам. Для наглядности мы будем считать, что в процессе работы алгоритма вершины и ребра графа могут быть белыми и черными. В алгоритме используется две стратегии. Первая стратегия – поиск в глубину: идти «вглубь», пока это возможно (есть не пройденные исходящие ребра) и пока не достигнута вершина d (путь найден). Вторая стратегия заключается в модификации (последовательное удаление справа из пути вершины и поиск нового ребра) найденного пути таким образом, чтобы достичь вершины d (новый путь). На рисунке 3 приведен алгоритм DNF.

```

DNF( $G, s, d$ )
1.  $u \leftarrow s$ 
2.  $path \leftarrow NIL$ 
3. for (для) каждой вершины  $v$ , смежной с  $u$  &  $v \notin path$ 
4.   do  $path \leftarrow u$ 
5.     while  $d \notin path$ 
6.        $path \leftarrow path + v$ 
7.       добавление  $Edge(u, v)$  к  $BlackEdges$ 
8.        $u \leftarrow v$ 
9.        $v \leftarrow GetNextWhiteVertex(u)$ 
10.    сохранение  $path$  в  $ListPaths$ 
11.     $v \leftarrow FindNewCandidate(G, path, BlackEdges)$ 
12.    if  $path \neq s$  &  $v \neq NIL$  goto 5

```

Рисунок 3 – Численный алгоритм DNF

Блок моделирования. Данный блок осуществляет статистическое моделирование испытаний на отказоустойчивость сложной системы. При моделировании отказ последовательной цепочки элементов наступает при отказе первого элемента. При моделировании параллельных цепочек отказ системы наступает при отказе всех цепочек элементов. После N серий моделирования (задается пользователем, по умолчанию $N=1000$), получаем файл данных для анализа работы системы.

Блок анализа – центральный модуль программного комплекса. С использованием непараметрических методов рассчитываются оценки показателей надежности: средняя наработка до отказа, дисперсия, медиана, мода, гамма-процентный ресурс, вероятность безотказной работы. Строятся непараметрические оценки функции распределения, плотности Розенблатта-Парзена и интервальные оценки показателей надежности.

Блок поддержки отчетов позволяет сохранить в MS Word все необходимые результаты как промежуточные, так и конечные (результатирующие) в удобном для восприятия виде.

Спроектированы инфологическая и даталогическая модели базы данных. Приведено описание таблиц.

В **четвертой** главе разработанные модели и методы апробированы при исследовании надежности следующих объектов. **Первый** - корпоративная сеть Главного управления Банка России по Курганской области. Оценена надежность такой сети в целях передачи данных и голосового трафика. В качестве инструмента использовался разработанный программный комплекс. Вычислены точечные и интервальные оценки надежности, предложенные в работе.

Анализ выполненных расчетов позволяет сделать следующие выводы:

1. Выявлены малонадежные элементы в системе (элемент №1);
2. Выявлены высоконадежные элементы (№4, №5, №6);
3. Найдены точечные и интервальные оценки средней наработки до отказа системы, гамма-процентной наработки до отказа системы, вероятности безотказной работы системы;
4. Анализ результатов моделирования работы системы показал, что при увеличении средней наработки до отказа элемента №1 до 11.5 лет средняя наработка до отказа всей системы увеличивается с 6.9 до 9.3 лет.

Второй – магистральный газопровод (МГ) «Уренгой-Сургут-Челябинск». Исследована надежность (вероятности безотказной работы R) различных участков МГ [11]. Необходимо отметить, что подбор параметрической математической модели данных распределений представляет значительные трудности (асимметричность, полимодальность, наличие выбросов). Непараметрические оценки плотности экспериментальных данных показывают, что распределения давления и температуры значительно меняются для разных компрессорных станций (КС) (рис. 4 – 6).

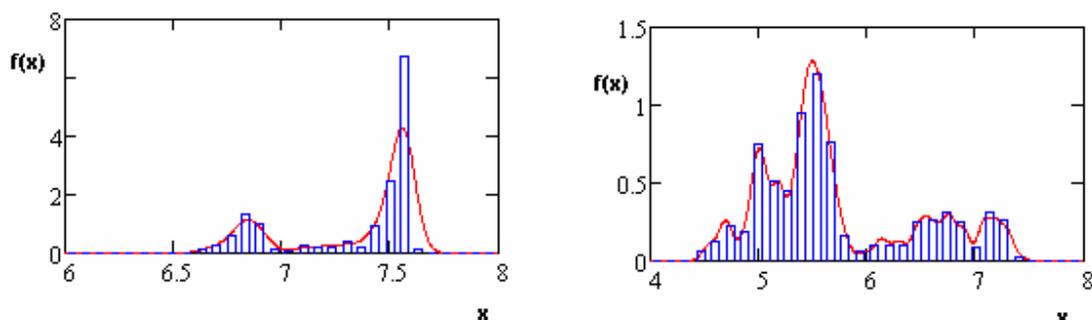


Рисунок 4 – Восстановленные одномерные плотности давления некоторых КС

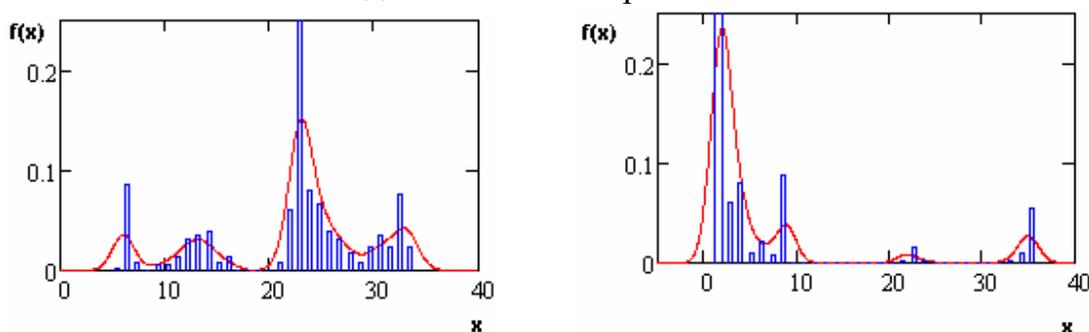


Рисунок 5 – Восстановленные одномерные плотности температуры некоторых КС

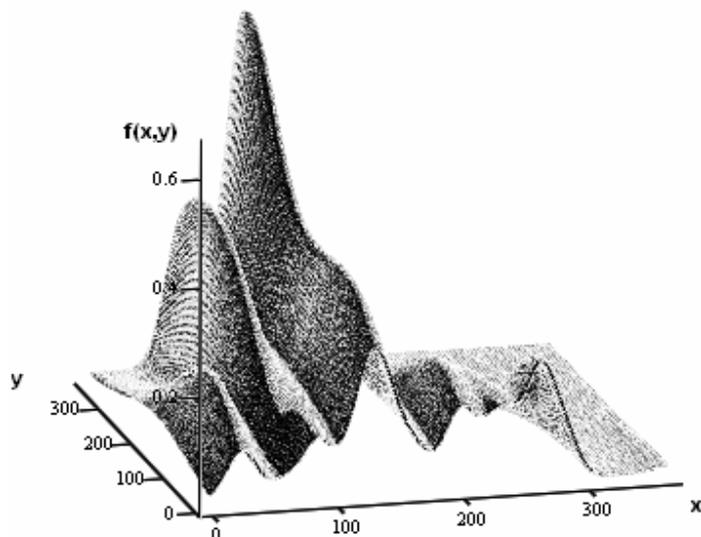


Рисунок 6 – Восстановленная двумерная плотность давления и температуры одной из КС

Моделирование поведения параметров модели проводилось с помощью разработанного многомерного непараметрического датчика. Оценены вероятность безотказной работы, число циклов деформации, коэффициент запаса.

По результатам моделирования МГ «Уренгой-Сургут-Челябинск» сделаны следующие выводы:

1. Анализ экспериментальных данных каждой КС показал, что имеется линейная статистическая зависимость между давлением и температурой газа, которая изменяется в широких пределах (от -0.458 до 0.821) для разных КС;
2. Учет статистической зависимости при моделировании (двумерный непараметрический датчик) приводит к тому, что показатели надежности изменяются от 2% до 12.6% по сравнению с моделированием без учета зависимости;
3. Выявлена важная роль коррозионного дефекта трубопровода. Моделирование вероятности безотказной работы трубопровода при одинаковом коррозионном дефекте имеет большой разброс ($0,427 \leq R \leq 1.0$) по разным КС;
4. По результатам моделирования выделяются КС с высокой вероятностью отказа (п. 4.2), что позволяет решать задачу об аварийном запасе труб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований и разработок получены следующие основные результаты:

1. Системный анализ проблемы оценки надежности сложных систем привёл к классификации подходов и методов решения этой задачи и показал, что традиционные методы имеют существенные ограничения, основным из которых является неучёт априорной информации, **связанный с неизвестностью** законов распределения факторов и показателей функционирования сложных систем.

2. Разработан непараметрический подход в статистическом моделировании сложных систем, который работает в условиях априорной неопределенности о законах распределения случайных показателей.
3. Разработаны математические модели одномерных и многомерных непараметрических ДПСЧ, являющиеся основным компонентом инструмента моделирования сложных систем для оценки их надёжности в условиях указанной неопределенности. Экспериментальное исследование созданных ДПСЧ показало их адекватность реальным данным по соответствующим критериям согласия.
4. Разработан алгоритм преобразования произвольной структуры сложной системы в параллельно-последовательные цепочки, повышающий адекватность модели системы задаче оценки надёжности.
5. Предложены математические методы (модели) оценивания по вычислительным экспериментам показателей надёжности сложных систем с использованием непараметрических методов.
6. Предложен метод анализа надёжности цепочек, отображающих структуру сложной системы, позволяющий оптимизировать эту структуру системы по критерию максимума надёжности.
7. Разработана модель базы данных (БД) для хранения исходных параметров исследуемой системы, её структуры, результатов модельных экспериментов. БД реализована в среде системы управления базами данных (СУБД) Firebird 1.5.
8. Создан программный комплекс, реализующий разработанные математические модели, методы и алгоритмы, обеспечивающий статистическое исследование непараметрической модели сложной системы. Он имеет следующие возможности:
 - создание масштабируемой графовой модели сложной системы, обеспечивающей вычислительные эксперименты;
 - сохранение модели сложной системы средствами СУБД;
 - настройка компонентов модели системы на функционирование в соответствии с тем или иным алгоритмом генерации псевдослучайных чисел по ограниченному экспериментальным данным;
 - отображение априорной информации (вид распределения, его параметры, симметричность, ограниченность на интервале и т.д.) в процессе моделирования поведения компонента сложной системы;
 - использование непараметрических оценок (как точечных, так и интервальных) надёжности сложной системы;
 - создание отчётов об экспериментальном исследовании модели сложной системы в текстовом редакторе.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК

1. Маер А.В. Автоматизированный программный комплекс для моделирования надёжности сложных систем. // Вестник Тюменского государственного университета. №6. – Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2009. – С. 234-240

2. Маер А.В., Симахин В.А. Непараметрические датчики для случайных стационарных процессов. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск: Изд-во СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2010. – С. 46-48.
3. Батраков П.А., Маер А.В., Симахин В.А. Одномерный непараметрический датчик с учетом априорной информации. // Омский научный вестник. – Омск: ОмГТУ, 2012. – С. 42-47.
4. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Маер А.В. Расчет надежности участков газопровода на основе обработки технологической информации методами непараметрической статистики. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – С. 87-92.
5. Батраков П.А., Маер А.В., Шапцев В.А. Алгоритм преобразования структурной модели сложной системы в параллельно-последовательную. // Омский научный вестник. – Омск: ОмГТУ, 2013.

Публикации в других изданиях

6. Маер А.В. Программный комплекс для моделирования надежности систем. Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования. // Сборник научных трудов по материалам VI-й международной научно-практической конференции. Том 3. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2009. – С. 90-91.
7. Маер А.В. Параметрические и непараметрические датчики для моделирования надежности сложных технических систем. // II Международная научно-практическая конференция «Молодежь и наука: реальность и будущее». В 9 томах. Том 8. – Невинномысск: НИЭУП, 2009. – С. 478-481.
8. Маер А.В., Симахин В.А. Непараметрические робастные алгоритмы в автоматизированных системах управления технологическими процессами. // VI межотраслевая научно-техническая конференция «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли», Том 1. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2009. – С. 34-38.
9. Маер А.В., Симахин В.А. Непараметрические датчики случайных векторов. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Материалы 16 международного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН 2009. – С. 403-407.
10. Маер А.В. Automated program complex for modeling of the reliability of complex systems. // Proceedings of the International Symposium on STOCHASTIC MODELS in RELIABILITY ENGINEERING, LIFE SCIENCE and OPERATIONS MANAGEMENT. – Israel: Publisher SCE – Shamon College of Engineering, 2010. – pp. 675-683.
11. Маер А.В. Стратегия информационной безопасности корпоративной сети. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 150-летию образования Банка России. – Курган: КФ АТиСО, 2010. – С. 336-342.
12. Маер А.В., Симахин В.А. Многомерный непараметрический датчик. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №15902. Москва, 2010

Подписано в печать 15.11.2013 г.
Формат 60x84/16. Тираж 120 экз. Зак. №574
Отпечатано в типографии «Дом печати»,
640000, г. Курган, ул. Гоголя, 103