

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ

ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

На правах рукописи  
УДК 681.31.:518.5

ХАМДАМОВ УТКИР РАХМАТИЛЛАЕВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МНОГОМЕРНЫХ  
СИГНАЛОВ НА БАЗЕ МЕТОДОВ СПЛАЙН – ФУНКЦИЙ И  
ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Ташкент – 2009

Работа выполнена в Ташкентском университете информационных технологий.

Научный руководит

A A / 2450  
X180 Хамдамов У.Р.

Официальные оппон

Моделирование  
процессов обраб...  
Т., 2009 Б/У

Ведущая организация

ун.

ий

Защита  
разового  
информац

С диссе  
универси

Авторефе

Ученый с  
специали

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ.

**Актуальность работы.** Особенностью современного этапа проведения научных исследований является их широкая автоматизация на основе средств вычислительной техники, что связано с большими объемами обрабатываемых данных. Важнейшее значение приобретают новые методы и алгоритмы, обеспечивающие своевременное и эффективное преобразование информации.

Для таких направлений, как автоматизация стендовых испытаний, обработка и восстановление геофизических данных, анализ и обработка изображений, прогнозирование сейсмических событий, актуальны проблемы совмещения процессов сбора и обработки аналоговой измерительной информации, и совершенствования программного обеспечения. Увеличение производительности, скорости взаимодействия, выполнения вычислений в реальном времени возможны только за счет разработки и внедрения новых алгоритмов и программных средств обработки и восстановления сигналов.

Актуальность задачи диссертационной работы обусловливается необходимостью разработки эффективных средств обработки одномерных и многомерных сигналов для многих разделов наук, как обработка результатов стендовых испытаний, геофизика, экология, сейсмология, радиолокация, обработка изображений, фильтрация и другие.

**Степень изученности проблемы.** Во многих существующих к настоящему времени методах и средствах обработки и восстановления сигналов требуется решение системы линейных алгебраических уравнений. Это приводит к значительному увеличению вычислительных затрат, к усложнению реализации и выполнению процедуры обработки в системах обработки сигналов. Все это ставит перед теорией и практикой обработки и восстановления сигналов в реальном масштабе времени новые задачи, которые требуют разработки и внедрения легко реализуемых и простых методов, алгоритмов и средств обработки сигналов.

В системах, работающих в реальном масштабе времени, для цифровой обработки сигналов важно, чтобы математические операции выполнялись быстро, и время, требуемое на выполнение команд, должно быть известно точно и заранее. Для этого и программа, и аппаратура должны быть очень эффективными. В цифровых сигнальных процессорах наиболее важной математической операцией и ядром всех алгоритмов цифровой обработки сигналов является умножение с последующим суммированием. Быстрое выполнение операции умножения с последующим суммированием очень важно для реализации цифровых фильтров реального времени, обработки сигналов, умножения матриц, манипуляции с графическими изображениями. Поэтому все это требует необходимости совершенствования методов, алгоритмов и программ обработки сигналов, определяющих качество и производительность цифровых систем.

**Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР.** В основе разработанных методов, алгоритмов и программных средств и их практического применения лежат научно-исследовательские работы, выполненные при непосредственном участии автора в соответствии с научно-техническими программами ГНТП-14 «Разработка современных информационных систем, интеллектуальных средств управления и обучения, баз данных и программных продуктов, обеспечивающих широкое развитие и внедрение информационных и телекоммуникационных технологий» и по проекту фундаментальных исследований БВ-Ф1-007 «Теоретико-методологические основы построения интеллектуальных программно-технических систем представления и обработки данных для поддержки принятия решений в слабо формализуемых информационных структурах», утвержденным Постановлением Координационного Совета комитета по координации развития науки и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

**Цель исследования.** Целью диссертационной работы является исследование методов, разработка алгоритмов и программного комплекса моделирования процессов обработки и восстановления сигналов на основе сплайн - функций.

**Задачи исследования:**

- исследование существующих методов обработки сигналов на основе одномерных и многомерных сплайнов;
- моделирование процессов вычисления коэффициентов восстановления одномерных и многомерных сигналов;
- разработка эффективных средств восстановления сигналов с применением цифровых процессоров обработки сигналов;
- разработка программного комплекса для моделирования процессов обработки многомерных сигналов методами сплайн - функций;
- решение задач практического применения разработанных алгоритмов и программного комплекса в конкретных прикладных областях.

**Объект и предмет исследования.** Полиномиальные, базисные интерполяционные и сглаживающие сплайны, кубические базисные сплайны, методы и средства обработки, прогнозирования и определения аномалий, используемых в геофизике и железнодорожных системах.

**Методы исследований.** Теоретическую основу проведенных исследований составляют теория функционального анализа, обобщенные спектральные методы, теория рядов и матриц, теория сплайн функций и моделирования, теория параллельных вычислительных процессов и численные методы решения линейных уравнений.

**Гипотеза исследования.** Гипотеза диссертационного исследования состоит в том, что для повышения степени научной обоснованности прогнозов и снижения уровня информационной неопределенности при изучении объектов и явлений необходимы эффективные методы и алгоритмы обработки сигналов и экспериментальных данных. Предлагаемые в диссертационном исследовании методы сплайн – функций, как аппарат

обработки и восстановления сигналов, приводит к повышению точности результатов и к значительному сокращению вычислительных затрат, а также позволяют широко применить принципы распараллеливания вычислений. Эти преимущества данных методик позволяет повысить уровень научной обоснованности прогнозов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- эффективные алгоритмы вычисления коэффициентов восстановления сигналов на основе одномерных и многомерных сплайнов;
- методы и программные средства восстановления сигналов с применением цифровых процессоров сигналов;
- программный комплекс для моделирования процессов обработки сигналов методами сплайн - функций;
- сплайн - метод анализа, оценки и прогнозирования эксплуатационной стойкости рельсов.

**Научная новизна.** На основе проведенных исследований получены следующие основные научные результаты:

- предложены методы, основанные на применении локальных базисных сплайнов, а также эффективные алгоритмы вычисления коэффициентов восстановления сигналов на основе одномерных и многомерных сплайнов;
- разработаны алгоритмы и программные средства восстановления сигналов с применением цифровых процессоров сигналов;
- разработаны алгоритмы и программный комплекс для моделирования процессов обработки сигналов методами сплайн - функций;
- предложен сплайн - метод анализа, оценки и прогнозирования эксплуатационной стойкости рельсов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования:**

- предложенные методы и алгоритмы вычисления коэффициентов восстановления сигналов на основе сплайн - функций приводят к повышению точности результатов и к значительному сокращению вычислительных затрат;
- предложенная вычислительная структура на основе кубического базисного сплайна позволяет сэкономить объем памяти в два раза по сравнению с существующими системами;
- разработанный программный комплекс моделирования процессов обработки сигналов методами сплайн – функций с применением цифровых процессоров сигналов позволяет обрабатывать различные классы сигналов, используемые в различных сферах науки;
- предложенный сплайн – метод анализа, оценки и прогнозирования эксплуатационной стойкости рельсов позволяет с достаточной точностью оценить - усталость, прогнозировать стойкость и прочность железнодорожных рельсов;

**Реализация результатов.** Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрялись в государственной акционерной железнодорожной компании «Ўзбекистон темир йўллари». Суммарный экономический эффект составляет 26 млн. сум в год. Результаты диссертационной работы также внедрены в учебный процесс на кафедрах «Информационные технологии» и «Компьютерные системы» Ташкентского университета информационных технологий.

**Апробация работы.** Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы докладывалась и обсуждалась на республиканской научной конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий» (Ташкент, 2006г.); на международной научно-практической конференции «Разработка, оценка эффективности и реализация инвестиционных и инновационных проектов» (Ташкент, 2006г.); на IV международной конференции «Intelligent Systems for Industrial Automation» (Ташкент, 2006г.); на научно – технической конференции аспирантов, магистрантов и одарённых студентов «Ахборот – коммуникация технологиялари» (Ташкент, 2007г.); на региональном научно – практическом семинаре «Фан-таълим-ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот технологияларини урни, ахамияти ва истикболлари» (Гулистан, 2007г.); на международной конференции «Information Technology Promotion in Asia 2007» (Ташкент, 2007г.); на II международной конференции «Mobile Computing, Communications, and Applications» (Ташкент, 2007г.); на международной конференции «IT Promotion in Asia 2008» (Ташкент, 2008г.).

**Опубликованность результатов.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в научных журналах – 4 статьи, из них в журнале «Доклады академии наук РУз» - 1 статья, в журнале «Вестник ТУИТ» - 1 статья, в журнале «Вестник ТГТУ» - 1 статья и в журнале «Техника юлдузлари» - 1 статья, в сборниках научных трудов международных конференций – 4 статьи, в сборниках материалов республиканской научной конференции – 2 статьи, в сборниках тезисов республиканских и международных конференций – 4 статьи, также 3 свидетельства Патентного Ведомства Республики Узбекистан.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 107 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 130 страницах текста. Работа содержит 41 рисунков и 6 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.**

Во введении кратко обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и определены основные задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, а также изложены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе диссертационной работы на основе литературных источников проведен обзор и анализ методов обработки одномерных и

многомерных сигналов и экспериментальных данных на основе сплайн – функций и проанализирован класс процессоров цифровой обработки сигналов для реализации методов сплайн – восстановления.

В последние годы для решения задач анализа и восстановления сигнала широко применяются методы сплайн - функции и обобщенные спектральные методы. Сочетание возможности теории базисных сплайнов и спектральных методов позволяет разработать новые алгоритмы обработки и восстановления сигналов, отвечающих требованиям высокой производительности и точности.

Анализ существующей литературы показывают, что по способу приближения используются интерполяционные и сглаживающие сплайны, а по виду представления полиномиальные и базисные сплайны. Интерполяционные сплайны это такие сплайны, которые удовлетворяли бы совокупностям заданных граничных условий и условий во внутренних точках областей определения функций, а сглаживающие сплайны связаны с решением задач оптимизации различного рода функционалов. Построение математических моделей с использованием полиномиальных сплайнов связаны с решением систем уравнений, что требуют больших вычислительных затрат, а алгоритмы полученные на их основе являются сложными. Базисные сплайны являются эффективным средством локального приближения в тех случаях, когда оно строится на фиксированном отрезке и зависит только от значений аппроксимируемой функции на этом отрезке.

Важное свойство  $B$ -сплайнов заключается в том, что величины их носителей подвергаются растяжению при повышении их степени: область ненулевых значений одной базисной функции степени  $m$  представляют собой отрезок длиной  $(m + 1)h$ , где  $h$ -шаг между двумя соседними узлами  $B$ -сплайна. Важным свойством является то, что базисные функции преобразуются друг в друга посредством операции сдвига вдоль оси на целое число шагов.

Наиболее простые аналитические выражения  $B$ -сплайнов получаются для случаев равномерного задания сеток. В работе рассмотрены базисные сплайны нулевой, первой, второй и третьей степени.

Анализ существующей литературы показал, что большинство работ посвящены изучению свойств кубических базисных сплайнов и их возможностей практического применения в различных областях.

Кубические сплайны имеют существенную математическую особенность. Они являются единственной функцией, обладающей свойством минимальной кривизны среди всех функций, интерполирующих заданные точки и имеющих вторую производную, интегрируемую с квадратом.

Кубические сплайны дефекта  $d = 1$  наиболее широко распространены в приложениях. Такие сплайны на каждом из отрезков  $[x_i, x_{i+1}]$  совпадают с кубическими многочленами.

Для приближения функции  $f(x)$  кубические базисные сплайны представляется в виде сумм четырех парных произведений. Тогда формулу приближения функции  $f(x)$   $B$ -сплайнами можно записать в виде суммы:

$$f(x) \cong S_m(x) = \sum_{i=-1}^{n+1} b_i(f) B_{m,i}(x) \quad (1)$$

$$f(x) \cong S_3(x) = b_{-1} B_{-1}(x) + b_0 B_0(x) + b_1 B_1(x) + b_2 B_2(x)$$

где  $S_m(x)$  - сплайн - функция степени  $m$ ;  $b_i(f)$  - последовательность линейных функционалов;  $B_{m,i}(x)$  - текущий  $B$ -сплайн степени  $m$ .

Многомерный базисный сплайн является примером функции нескольких переменных, когда задана комбинация функций, каждая из которых зависит от одной независимой переменной.

Многомерные базисные сплайны равных степеней  $m$  по каждому аргументу определяются в виде тензорных прямых произведений одномерных  $B$ -сплайнов. Для приближения функции  $f(x, y)$  бикубические базисные сплайны представляются в виде двойных сумм кратных произведений, где сомножителями являются коэффициенты и одномерные  $B$ -сплайны. Тогда формулу приближения функции  $f(x, y)$   $B$ -сплайнами можно записать в виде:

$$S_m(x, y) = \sum_{i=-m}^{n+m} \sum_{j=-m}^{n+m} b_{ij} B_{m,i}(x) B_{m,j}(y) \quad (2)$$

$$f(x, y) \cong S_{3,3}(x, y) =$$

$$\begin{aligned} &= b_{-1,-1} B_{-1}(x) B_{-1}(y) + b_{-1,j+0} B_{-1}(x) B_{j+0}(y) + \\ &+ b_{-1,-1} B_{-1}(x) B_{j+1}(y) + b_{-1,j+2} B_{-1}(x) B_{j+2}(y) + \\ &+ b_{i+0,-1} B_{i+0}(x) B_{j-1}(y) + b_{i+0,j+0} B_{i+0}(x) B_{j+0}(y) + \\ &+ b_{i+0,j+1} B_{i+0}(x) B_{j+1}(y) + b_{i+0,j+2} B_{i+0}(x) B_{j+2}(y) + \\ &+ b_{i+1,-1} B_{i+1}(x) B_{j-1}(y) + b_{i+1,j+0} B_{i+1}(x) B_{j+0}(y) + \\ &+ b_{i+1,j+1} B_{i+1}(x) B_{j+1}(y) + b_{i+1,j+2} B_{i+1}(x) B_{j+2}(y) + \\ &+ b_{i+2,-1} B_{i+2}(x) B_{j-1}(y) + b_{i+2,j+0} B_{i+2}(x) B_{j+0}(y) + \\ &+ b_{i+2,j+1} B_{i+2}(x) B_{j+1}(y) + b_{i+2,j+2} B_{i+2}(x) B_{j+2}(y), \end{aligned}$$

В практике для восстановления сигналов с помощью сплайн - функций используется система кубических базисных сплайнов. Система кубических базисных сплайнов состоит из четырех базисных сплайнов  $B_{3,-1}(x)$ ,  $B_{3,0}(x)$ ,  $B_{3,1}(x)$ ,  $B_{3,2}(x)$ . В интервале  $[0,1]$  находится часть значений каждого сплайна, и эта часть значений будет служить базисом для остальных интервалов.

В данной главе также проанализирован класс процессоров цифровой обработки сигналов для реализации методов сплайн - восстановления.



Методы сплайн – функций удобны тем, что они позволяют широко применять принципы распараллеливания и восстановления сигналов, основываясь на выполнении операций параллельного умножения с накоплением. Эти преимущества методов сплайн – функций позволяют применить их в задачах цифровой обработки сигналов. Для цифровой обработки сигналов методами сплайн – функций выбраны процессоры фирмы Analog Devices – ADSP Blackfin. Семейства этих процессоров являются наиболее подходящими для обработки выбранного класса сигналов. Также, стоимость этих процессоров является сравнительно низкой, они имеют параллельные умножители с накоплением и динамическое управление питанием, быстродействие и объем требуемой памяти удовлетворяют требованиям к обработке сигналов. Все процессоры BLACKFIN полностью поддерживаются средствами разработки Analog Devices CROSSCORE, которые включают в себя интегрированную среду разработки VisualDSP++.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию способов вычисления коэффициентов восстановления методами сплайн – функций. Предлагаются модели и алгоритмы вычисления коэффициентов восстановления на основе кубических и бикубических сплайнов и параллельная вычислительная структура на основе кубического базисного сплайна.

Задача приближения функциональных зависимостей и экспериментальных данных системами базисных сплайнов в конечном итоге приводится к задаче вычисления коэффициентов. В работе исследованы различные методы вычисления коэффициентов восстановления такие как, интерполяционные формулы, метод наименьших квадратов и точечные формулы.

Построение интерполирующих зависимостей тесным образом связано с решением систем алгебраических уравнений, где матрицы коэффициентов имеют ленточную форму. Задача интерполяции функции  $f(x)$  совокупностью базисных сплайнов сводится к отысканию коэффициентов  $b_i$  в формуле (3), принимающих такие значения, чтобы на отрезке  $[a,b]$  удовлетворялись равенства (4).

$$f(x) \cong S_m(x) = \sum_{i=-1}^{n+1} b_i(f) B_{m,i}(x) \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n b_i B_{m,i}(x_i) = f(x_i) \quad (4)$$

Проблемы построения интерполирующих зависимостей на основе B-сплайнов более высоких степеней решаются более сложным образом. Как правило, задача нахождения  $b$  – коэффициентов сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Для решения систем алгебраических уравнений с матрицами коэффициентов эффективно применение метода прогонки. Решение таких уравнений приводит к увеличению вычислительных затрат в вычислительных системах.

Коэффициенты аппроксимации  $B$ -сплайнами могут быть найдены по методу наименьших квадратов. В этом случае необходимо составить, и решить квазидиагональную систему линейных алгебраических уравнений вида:

$$\sum_{k=1}^n (B_i, B_k) b_k = (B_i, f) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

где  $(B_i, B_k)$   $(B_i, f)$  - скалярные произведения.

Данная система уравнений применима для определения коэффициентов  $b_i$  внутри локальной области, на ее границах и за ее пределами, но в близкой окрестности области должна быть использована дополнительная информация либо с помощью расширения сетки путем введения дополнительных узлов, либо построения сплайна степени  $m$ , интерполирующей значения функции  $f(x_i) = f_i$  в начале и конце отрезка.

Алгоритмы вычисления коэффициентов аппроксимации системами базисных сплайнов не требуют решения систем алгебраических уравнений, т.е. носят явный характер. Необходимый в этих случаях объем вычислений не зависит от числа узлов сетки, а определяется лишь степенью сплайна. Поэтому он получается значительно меньшим, чем при построении интерполяционных сплайнов.

На основе проведенных исследований получены так называемые точечные сглаживающие формулы вычисления коэффициентов для сплайнов третьей степени:

3-точечная формула:

$$b_i = \frac{1}{6}(-f_{i-1} + 8f_i - f_{i+1}) \quad (6)$$

5-точечная формула:

$$b_i = \frac{1}{36}(f_{i-2} - 10f_{i-1} + 54f_i - 10f_{i+1} + f_{i+2}) \quad (7)$$

7-точечная формула:

$$b_i = \frac{1}{216}(-f_{i-3} + 12f_{i-2} - 75f_{i-1} + 344f_i - 75f_{i+1} + 12f_{i+2} - f_{i+3}) \quad (8)$$

Точечные формулы вычисления коэффициентов могут быть распространены и на случаи многомерной аппроксимации. Например, 3-точечные формулы для бикубического сплайна на равномерных сетках  $\Delta x$  и  $\Delta y$  могут быть получены на основе формул для одномерных сплайнов:

$$\begin{aligned} a_{ij} &= (-f_{i-1j} + 8f_{ij} - f_{i+1j})/6, & i &= 1, 2, K, n_1 - 1; \\ b_{ij} &= (-a_{i,j-1} + 8a_{ij} - a_{i,j+1})/6 & j &= 1, 2, K, n_2 - 1; \end{aligned} \quad (9)$$

Эти формулы сохраняют свойства гладкости приближений, а значения коэффициентов не зависят от отсчетов в точках, достаточно удаленных от текущей точки.

В таблице 1 приведены среднеквадратические ошибки восстановления функциональных зависимостей и экспериментальных данных, полученные в результате аппроксимации кубическими базисными сплайнами с использованием трех - точечной формулы вычисления коэффициентов. В таблице 2 приведены результаты сравнения возможностей классических полиномов и кубических базисных сплайнов.

Точность восстановления базисными сплайнами с использованием точечных формул вычисления коэффициентов зависит от количества точек применяемой формулы: с увеличением количества используемых точек в формуле уменьшается значение ошибки, но увеличивается количество вычислительных операций.

Таблица 1

Среднеквадратические ошибки аппроксимации функциональных зависимостей и экспериментальных данных

№	Функциональные зависимости	Среднеквадратические ошибки			
		N=64x64	N=128x128	N=512x512	N=1024x1024
1	$z = \text{Sin}(x^2 + y^2)$	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$5,81 \cdot 10^{-4}$	$13,21 \cdot 10^{-4}$	$31,14 \cdot 10^{-4}$
2	$z = x^2 * y^2$	$0,03 \cdot 10^{-4}$	$0,19 \cdot 10^{-4}$	$11,09 \cdot 10^{-4}$	$86,36 \cdot 10^{-4}$
3	$z = x^3 + y^3$	$0,45 \cdot 10^{-4}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$25,53 \cdot 10^{-4}$	$100,7 \cdot 10^{-4}$
4	Электромагнитный сигнал	0,025631	0,102020	0,075048	-

Таблица 2

Результаты сравнения возможностей классических полиномов третьей степени и кубических базисных сплайнов.

№	Показатели	Классические полиномы третьей степени	Базисные сплайны третьей степени	Преимущества базисных сплайнов
1	Командный цикл	7	3	2,33 раза меньше
2	Погрешность округления	$\varepsilon \leq 25 \cdot 2^{-l}$	$\varepsilon \leq 18 \cdot 2^{-l}$	1,39 раза меньше
3	Методическая погрешность приближения	$\varepsilon \leq \frac{3}{128} \max  f^{IV}(x)  \cdot h^4$	$\varepsilon \leq \frac{5}{384} \max  f^{IV}(x)  \cdot h^4$	1,80 раза меньше
4	Алгоритм вычисления коэффициентов	Требует решения систем уравнений	Не требует решения систем уравнений	Не требует решения систем уравнений

Результаты исследования показывает, что применение кубических базисных сплайнов для восстановления сигналов по сравнению с классическими полиномами дают погрешность округления в 1,39 раза меньше, их методическая погрешность в 1,8 раза меньше. Время аппроксимации значения функции в одной точке кубическими сплайнами в 2,33 раза меньше, чем классические полиномы третьей степени.

Таким образом, опыт применения сплайн – функций, как аппарата приближения функций, показывает, что во всех известных случаях удавалось добиться ощутимых результатов по сравнению с классическим аппаратом многочленов. В одних задачах переход к сплайнам приводит к повышению точности результатов, в других - к значительному сокращению вычислительных затрат, в третьих - достигаются оба эффекта одновременно.

В работе также предлагается параллельная вычислительная структура для восстановления одномерных сигналов кубическими базисными сплайнами. Данная вычислительная структура построена на основе кубического базисного сплайна и значения определены на интервале  $[-2, 2]$ . Значения кубического сплайна в интервале  $[0, 2]$  симметричны со значениями в интервале  $[-2, 0]$  и для дальнейших вычислений в памяти достаточно хранить половину сплайна. Исходя из этого, можно сэкономить объем памяти в два раза по сравнению с существующими системами.

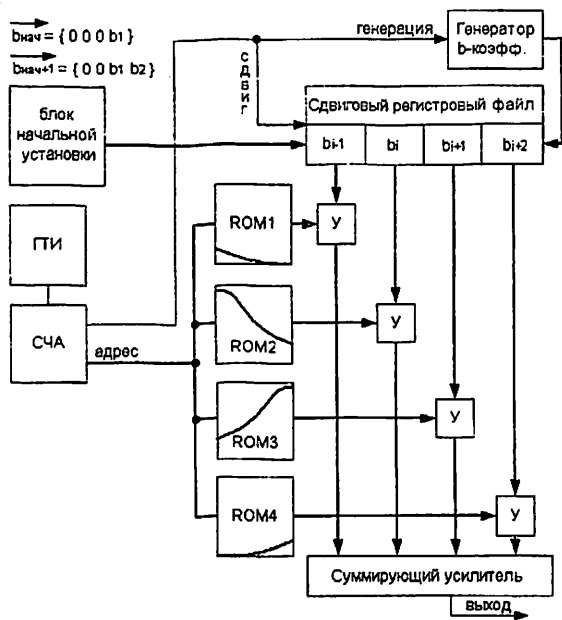


Рис. 1. Параллельная вычислительная структура на основе кубического базисного сплайна.

Предложенная параллельная вычислительная структура состоит из блока начальной установки, генератора тактовых импульсов (ГТИ), счетчика адресов (СЧА), генератора  $b$ -коэффициентов, регистра сдвига, запоминающего устройства (ЗУ), состоящего из четырех подсекций (ROM1, ROM2, ROM3, ROM4) для хранения значений базисного сплайна, четырех умножителей и одного суммирующего усилителя.

В третьей главе диссертационной работы предлагается аппаратно-программные средства для моделирования процессов обработки сигналов и сплайн-метод анализа, обработки и определения аномалий изменения структуры рельсов, основанный на применения спектральных свойств базисных сплайнов.

В настоящее время наблюдается непрерывный рост интереса специалистов-разработчиков к использованию в различных устройствах обработки сигналов цифровых сигнальных процессоров. Это обусловлено как удобствами применения, доступностью и широкими возможностями отладочных инструментов самих процессоров. В работе предлагается инструментальные средства для моделирования процессов восстановления одномерных и многомерных сигналов для процессоров цифровой обработки сигналов (ПЦОС) семейства Blackfin. Среда разработки проектов VisualDSP++ позволяет разработчикам разрабатывать и выполнять отладку приложений. Эта среда включает лёгкий в использовании ассемблер, компилятор C/C++ и библиотеку исполняемых функций C/C++, включающую математические функции и функции ПЦОС. Ключевой особенностью средств разработки программного обеспечения является эффективность кода, написанного на языках C/C++.

В работе предложен алгоритм сглаживания сигналов и экспериментальных данных с использованием цифровых сигнальных процессоров. Алгоритм основывается на применении сглаживающего сплайна. Методы сплайн – функций удобны тем, что они позволяют широко применить принципы распараллеливания, объединения процесса ввода с обработкой. Обработка сигналов методами сплайн – функций основывается на выполнении операций параллельного умножения с накоплением. Наличие параллельных умножителей с накоплением, запоминающего устройства с произвольным доступом, а также инструментальных средств программирования в цифровых процессорах сигналов позволяет применить их в задачах обработки сигналов методами сплайн – функций.

При моделировании процесса восстановления и сглаживания экспериментальных данных с использованием сплайн – функций для цифрового процессора обработки сигналов использован симулятор VisualDSP++ процессора Blackfin ADSP-BF533 компании Analog Devices.

В расчетах сглаживания экспериментальных данных наилучшие сглаживающие эффекты показал 7-точечные формулы:

$$S_i = \frac{1}{21}(7y_i + 6(y_{i-1} + y_{i+1}) + 3\tilde{y}_{i-2} + y_{i+2}) - 2(y_{i-3} + y_{i+3})) \quad (10)$$

В результате расчетов можно считать, что применение 7-точечных формул для сглаживания экспериментальных данных позволяет получить наиболее хорошие сглаживающие эффекты.

Важным направлением экспериментальных исследований являются стендовые испытания новых материалов и сложных объектов на воздействие климатических, механических, акустических и других факторов окружающей среды, проводимые в строительстве железных дорог, в машиностроении, авиа и ракетостроении, электронной технике, приборостроении и ряде других отраслей промышленности. В данной работе предлагается методика оценки сравнительной работоспособности рельсовых сталей, подвергнутых различным видам термической обработки, имеющих различную структуру и механические свойства. В качестве критерия оценки предлагается относительная величина скрытой энергии деформаций, накапливаемой в деформируемых объемах материала к моменту разрушения, то есть энергоемкость материала.

Традиционные методы и средства эксплуатационного контроля позволяют выявлять уже развитые дефекты. Эти средства контроля не обеспечивают диагностики рельсов и колесных пар на стадии предразрушения и поэтому не могут гарантировать безопасность движения на железных дорогах. Используемые при эксплуатационном контроле магнитные вагон-дефектоскопы основаны на считывании магнитных полей рассеяния, образующихся в зоне расположения развитого дефекта.

Для обработки сигналов, полученного в процессе исследования была применена спектральная теория В-сплайнов. Локальный характер В-сплайнов и финитность отрезков, на которых непрерывные сигналы обычно определены в реальной действительности, являются основанием для перехода при решении задачи дискретизации от моделей сигналов с финитным спектром к спектральным отображениям сигналов, принадлежащим классу целых функций частотного аргумента. Уникальное свойство В-сплайнов заключается в том, что их амплитудным спектральным характеристикам соответствует четкое и достаточно простое аналитическое описание, имеющее много общего с описанием ядра ряда Котельникова-Шеннона:

$$F_{B_0}(\omega) = hB_m(0) \left( \frac{\sin(\omega h / 2)}{\omega h / 2} \right)^{m+2} \quad (11)$$

где  $h$  – шаг дискретизации;  $B_m(0)$  – амплитуда В-сплайна степени  $m$ .

Ранее отмечалось, что произвольная непрерывная функция  $f(x)$ , заданная на конечном отрезке  $x \in [a, b]$  и аппроксимируемая на нем полиномиальным сплайном  $S_m(x)$  может быть представлена в виде линейной суммы:

$$f(x) \cong S_m(x) = \sum_{i=1}^{n+1} b_i B_{m,i}(x) \quad (12)$$

где  $i$  – текущий номер узла сплайна ( $i = -1, 0, 1, K, n+1$ );  $b_i$  – коэффициенты В-сплайнов, аппроксимирующей функцию.

Выражение для амплитудной спектральной плотности последовательности, состоящей из конечного числа прямоугольных импульсов и операторное выражение последовательности, включающей конечное число попарно пересекающихся треугольных импульсов, легко получаются в аналитической форме. От операторного выражения заменой комплексной переменной  $p$  на  $j\omega$  можно перейти к спектральной плотности. Если расширить этот подход применительно к конечной последовательности непересекающихся В-сплайнов произвольной целой степени  $m$  с изменяющимися амплитудами, то амплитудная спектральная плотность такой последовательности может быть описана следующей формулой:

$$F_{\Sigma B}(\omega) = F_{B_0}(\omega) \left| \sum_{i=0}^n b_i \exp(-j\omega(m+1)h) \right| \quad (13)$$

Она содержит комплексные экспоненциальные множители, учитывающие эффекты задержек каждого последующего В-сплайна по отношению к каждому предыдущему на шаг  $h$ .

Выполненная работа показала уникальные возможности нового метода диагностики: без специального намагничивания, с помощью двух-четырех датчиков, без непосредственного контакта с контролируемой поверхностью выполнять экспресс-анализ состояния рельс и определять участки, предрасположенные к повреждениям. При этом сканирование можно осуществлять со скоростью движения поезда. Резкое локальное изменение магнитного поля соответствует зоне развивающегося дефекта.

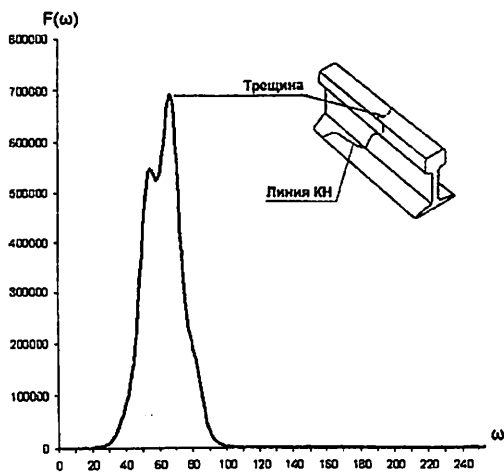


Рис. 2. Результаты обработки сигнала с помощью кубических В-сплайнов.

**Четвертая** глава диссертационной работы посвящена разработке программного комплекса для моделирования процессов обработки одномерных и многомерных сигналов и экспериментальных данных методами сплайн – функций. В практике научных исследований часто сталкиваются с задачами, в которых по экспериментальным данным необходимо восстановить общий характер явления или процесса. Одним из путей решения таких задач является применение сплайн - методов приближения экспериментальных данных. В рамках данной работы разработаны алгоритмы и программный комплекс моделирования процессов обработки многомерных сигналов и экспериментальных данных с использованием методов сплайн – функций. При разработке программного комплекса использованы язык системного программирования Ассемблер, объектно-ориентированный язык программирования Delphi 6.0 и специальная среда разработки VisualDSP++ поддерживающий оптимизированный компилятор С и С++ для цифровых процессоров сигналов типа BLACKFIN.

Программный комплекс включает в себя следующие составляющие программы: восстановления и сглаживания одномерных и многомерных сигналов; оценки погрешности восстановления; реализация сплайн-метода оценки эксплуатационной стойкости рельсов; спектральная обработка сигналов системами базисных сплайнов.

Программы моделирования процессов обработки и сглаживания одномерных и многомерных сигналов на основе базисных сплайнов предназначены для определения параметров восстановления сигналов и экспериментальных данных, аппроксимации сигналов с помощью точечных формул и сглаживания различных классов сигналов.

Программа оценки погрешности восстановления позволяет вычислить среднеквадратические ошибки и оценки точности восстановления одномерных и многомерных сигналов и экспериментальных данных.

Программа реализации сплайн-метода оценки эксплуатационной стойкости рельсов на основе спектральных свойств методов сплайн - функций позволяет оценить эксплуатационную стойкость железнодорожных рельсов. Программа обрабатывает отсчеты сигнала магнитного поля, полученного с помощью магнитного вагон – дефектоскопа.

Программный комплекс оформлен в виде единого программного пакета, состоящего из взаимосвязанных программ с определенными параметрами. В программном комплексе предусмотрены несколько методов обработки сигналов, которые позволяет использовать его во многих разделах наук, как обработка результатов стендовых испытаний, геофизика, экология, сейсмология, радиолокация, обработка изображений, фильтрация и другие. При установке пакета все программные модули реализуется одновременно, это позволяет быть полноценным продуктом и использовать всевозможные функции комплекса.

Программный комплекс ориентирован на использование в компьютерах типа IBM PC, совместимых с операционной системой Windows



XP и выше, и в цифровых процессорах сигналов типа Blackfin компании Analog Devices. Программный комплекс занимает 731 Кбайт внешней памяти и при загрузке в оперативную память занимает 10 Кбайт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Исследованы существующие методы обработки сигналов и выявлены недостатки классических полиномиальных сплайнов и показано, что применение базисных сплайнов для задач восстановления функций и экспериментальных зависимостей, позволяет получить алгоритмы для определения параметров, эффективно реализуемые на сигнальных процессорах.

2. В результате исследования методов обработки сигналов многомерными сплайнами выявлено, что локальные и финитные свойства одномерных сплайнов полностью распространяются для многомерных сплайнов и позволяют получить легко реализуемые алгоритмы для определения параметров восстановления. Они также являются удобными с точки зрения распараллеливания вычислений.

3. Проанализирован класс процессоров цифровой обработки сигналов и для реализации методов сплайн - восстановления предложены процессоры фирмы Analog Devices – ADSP Blackfin, отличающиеся развитыми средствами эмуляции и удобством отладки комплекса. Гарвардская архитектура и наличие аппаратно – реализованных специальных команд умножения, параллельного умножения с накоплением дают возможность широкого применения современных ЦПС для реализации методов сплайн – восстановления сигналов.

4. Для обработки выбранного класса сигналов предложен метод точечных формул, который позволяет избежать решения систем уравнений по сравнению с классическими полиномами и полиномиальными сплайнами, разработаны эффективные алгоритмы вычисления коэффициентов восстановления одномерных сигналов на основе точечных формул, а также предложены точечные формулы для вычисления коэффициентов восстановления бикубическими базисными сплайнами.

5. Разработаны программы и эффективные вычислительные структуры для восстановления сигналов на основе кубических базисных сплайнов и сглаживания сигналов на основе предложенных методов. Разработанные программы эффективно реализуются на симуляторе VisualDSP++.

6. Предложен сплайн-метод анализа, обработки и определения аномалий изменения структуры рельсов, основанный на применения спектральных свойств базисных сплайнов. Проведенные эксперименты показали, что применение разработанного метода позволяет с достаточной точностью оценить усталость, - прогнозировать стойкость и прочность железнодорожных рельсов.

7. Предложен программный комплекс для моделирования процессов обработки сигналов с использованием методов сплайн – функций, защищенный соответствующим свидетельством Патентного Ведомства Республики Узбекистан. Программный комплекс оформлен в виде единого программного пакета, состоящего из взаимосвязанных программ с определенными параметрами, и эффективно реализуется в сигнальных процессорах семейства Blackfin. Его можно использовать для восстановления различных классов сигналов для многих разделов наук, таких как геофизика, сейсмология, радиолокация, обработка изображений, фильтрация и другие.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.

1. Зайнидинов Х.Н., Хамдамов У.Р. Сравнительный анализ ошибок восстановления функциональных зависимостей с использованием локальных сплайнов. // ТЕХНИКА YULDUZLARI. - Ташкент, 2006. - №4. - С.28-32.

2. Зайнидинов Х.Н., Хамдамов У.Р. Применение многомерных базисных сплайнов для обработки результатов аэромагнитных измерений. // Совместный выпуск по материалам республиканской научной конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий». 11-13 октября 2006. - Ташкент, 2006. - С. 228-232.

3. Зайнидинов Х.Н., Хамдамов У.Р., Рахимов Б.С. Программный комплекс для обработки одномерных и многомерных геофизических сигналов в кусочно-полиномиальных базисах. // Совместный выпуск по материалам республиканской научной конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий». 11-13 октября 2006. - Ташкент, 2006. - С. 205-207.

4. Зайнидинов Х.Н., Хамдамов У.Р. Кусочно-базисные методы восстановления многомерных сигналов. // Сб. трудов регионального научно – практического семинара «Фан – таълим – ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот технологияларининг ўрни, аҳамияти ва истиқболлари». 12 июня 2007. - Гулистан, 2007. - С.25-27.

5. Зайнидинов Х.Н., Хамдамов У.Р. Сглаживание экспериментальных данных с помощью S-сплайнов. // Доклады АН РУз. - Ташкент, 2008. - №1. - С. 30-32.

6. Касымов С.С., Зайнидинов Х.Н., Хамдамов У.Р. Программа для восстановления многомерных сигналов методами сплайн - функций. // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство DGU 01319. 05.07.2007г.

7. Касымов С.С., Зайнидинов Х.Н., Хамдамов У.Р. Программа сглаживания экспериментальных данных на цифровых процессорах сигналов ADSP-BF533 методами сплайн - функций. // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство DGU 01320. 05.07.2007г.

8. Хамдамов У.Р. Кусочно-базисные методы в задачах разработки информационных систем. //Материалы Международной научно-практической конференции «Разработка, оценка эффективности и реализация инвестиционных и инновационных проектов». 14-16 ноября 2006. - Ташкент, 2006. - С. 316-317.

9. Хамдамов У.Р. Восстановление функциональных зависимостей методами базисных сплайнов. // Вестник ТашГТУ. - Ташкент, 2006. - №4. - С.23-25.

10. Хамдамов У.Р. Программирование цифровых сигнальных процессоров в среде VisualDSP++. // Тезисы докладов научно – технической конференции аспирантов, магистров и одаренных студентов «Ахборот-коммуникация технологиялари». 4-5 мая 2007. - Ташкент, 2007. - С. 63-64.

11. Хамдамов У.Р. Применение процессора цифровой обработки сигналов ADSP-BF533 в задачах восстановления сигналов. // Сб. трудов регионального научно – практического семинара «Фан – таълим – ишлабчиқариш интеграциясида ахборот технологияларининг ўрни, аҳамияти ва истиқболлари». 12 июня 2007. - Гулистан, 2007. - С.15-16.

12. Хамдамов У.Р. Программные средства для обработки сейсмических сигналов методами сплайн – функций. // Вестник ТУИТ. - Ташкент, 2007. - №4, - С. 12-14.

13. Хачатурьян С.В., Хамдамов У.Р., Джумабаев Д.А., Махмудов С.С., Нурматов М, Тураев М.У. Программа оценки эксплуатационной стойкости рельсов. // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство DGU 01219. 30.01.2007г.

14. Kasymov S.S., Zaynidinov H.N., Hamdamov U.R., Rakhimov B.S. Piecewise basic methods of the analysis and processing of many-dimensional signals. //Proceedings Fourth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation (WCIS 2006). - Tashkent, Uzbekistan, November 21-22, 2006. - P. 274-275.

15. Zaynidinov H.N., Hamdamov U.R. Parallelizing of Evaluations at Restoring Signals by Systems of Cubic Splines. // Proceedings International Conference on Information Technology Promotion in Asia 2007 (ITPA 2007). - Tashkent, Uzbekistan, September 24-28, 2007. - P.190-194.

16. Zaynidinov H.N., Hamdamov U.R. Roundoff Errors at a Parallelizing of Evaluations by Systems of Basic Splines. // Proceedings The Second International Conference on Mobile Computing, Communications and Applications (ICMOCCA2007). - Tashkent, Uzbekistan, September 26-28, 2007. - P. 95-98.

17. Zaynidinov H.N., Hamdamov U.R., Elov D., Iminov A. Spline – Method of the Analysis, Processing and Definition of the Change Anomalies of Rails Structure. // Proceedings International Conference on IT Promotion in Asia 2008 (ITPA 2008). - Tashkent, uzbekistan, September 22-26, 2008. - P.185-188

Техника фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Хамдамов Уткир Рахматиллаевичнинг 05.13.11 – «Ҳисоблаш машиналари, мажмуалари ва компьютер тармоқларининг математик ва дастурий таъминоти» ихтисослиги бўйича «Сплайн – функциялар методлари асосида кўп ўлчовли сигналларни қайта ишлаш жараёнларини моделлаш ва дастурий тадбиқ қилиш» мавзусидаги диссертациясининг

## РЕЗЮМЕСИ

**Таянч сўзлар:** сплайн, базисли функция, базисли сплайн, нуктали формула, силлиқлаш коэффициенти, сплайн – функция, кубик базисли сплайн, сигнал процессори, сигналларни рақамли қайта ишлаш, симулятор, дастурий мажмуа, сигнал, рельс.

**Тадқиқот объекти:** полиномал, интерполяцион ва силлиқловчи сплайнлар, кубик базисли сплайнлар, геофизика ва темир йўл тизимларида қўлланиладиган сигналларни қайта ишловчи ва ўзгаришларни прогноз қилувчи усуллар ва воситалар.

**Ишнинг мақсади:** Сплайн – функциялар асосида сигналларни қайта ишлаш ва тиклаш жараёнларини моделлаш усулларини тадқиқ қилиш, алгоритмларини ва дастурий мажмуасини ишлаб чиқиш.

**Тадқиқот методлари:** олиб борилган тадқиқот усулларига функционал таҳлил назарияси, умумлашган спектрал усуллар, қаторлар ва матрицалар назарияси, сплайн функциялар назарияси ва моделлаш, параллел ҳисоблаш жараёнлари назарияси ва чизиқли тенгламаларни ечиш усуллари қиради.

**Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги:** бир ва кўп ўлчовли сплайнлар асосида сигналларни тиклаш усуллари ва коэффициентларни ҳисоблашнинг самарали алгоритмлари тақлиф қилинди; рақамли сигнал процессорларини қўллаш орқали сплайн - функциялар усуллари билан сигналларни қайта ишлаш жараёнларини моделловчи алгоритмлар ва дастурий мажмуа ишлаб чиқилди; рельсларнинг эксплуатацион мустаҳкамлигини аниқлаш, баҳолаш ва таҳлил қилиш сплайн методи тақлиф қилинди.

**Амалий аҳамияти:** Blackfin оиласидаги рақамли сигнал процессорларига қўлланиладиган сигналларни тикловчи дастурий воситалар ишлаб чиқилди; кубик базисли сплайн асосида параллел ҳисобловчи структура тақлиф қилинди; сплайн – функциялар методлари асосида сигналларни тиклаш жараёнларини моделловчи дастурий мажмуа яратилди.

**Тадқиқот этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги:** диссертация ишининг асосий назарий ва амалий натижалари «Ўзбекистон темир йўллари» давлат акциядорлик темир йўл компаниясида тадқиқ қилинди. Жами иқтисодий самарадорлик йилиги 26 млн. сўмни ташкил қилади.

**Қўлланиш соҳаси:** диссертация ишида ишлаб чиқилган усуллар, алгоритмлар ва дастурий воситалар фаннинг геофизика, экология, сейсмология ва радиолокация соҳаларида сигналларни қайта ишлашда, ҳамда темир йўл тизимларида рельсларнинг мустаҳкамлигини баҳолаш масалаларида ишлатилиши мумкин.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Хамдамова Уткира Рахматиллаевича на тему: «Моделирование процессов обработки многомерных сигналов на базе методов сплайн – функций и программная реализация» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

**Ключевые слова:** сплайн, базисная функция, базисный сплайн, точечная формула, коэффициент сглаживания, сплайн – функция, кубический базисный сплайн, сигнальный процессор, цифровая обработка сигналов, симулятор, программный комплекс, сигнал, рельс.

**Объекты исследования:** полиномиальные, интерполяционные и сглаживающие сплайны, кубические базисные сплайны, методы и средства обработки сигналов и прогнозирования аномалий, используемых в геофизике и железнодорожных системах.

**Цель работы:** исследование методов и разработка алгоритмов и программного комплекса моделирования процессов обработки и восстановления сигналов на основе сплайн - функций.

**Методы исследования:** теория функционального анализа, обобщенные спектральные методы, теория рядов и матриц, теория сплайн функций и моделирования, теория параллельных вычислительных процессов и численные методы решения линейных уравнений.

**Полученные результаты и их новизна:** предложены методы и эффективные алгоритмы вычисления коэффициентов восстановления сигналов на основе одномерных и многомерных сплайнов; разработаны алгоритмы и программный комплекс для моделирования процессов обработки сигналов методами сплайн - функций с применением цифровых процессоров сигналов; предложен сплайн - метод анализа, оценки и прогнозирования эксплуатационной стойкости рельсов.

**Практическая значимость:** разработаны программные средства восстановления сигналов с применением цифровых сигнальных процессоров семейства Blackfin; предложена параллельная вычислительная структура на основе кубического базисного сплайна; разработан программный комплекс для моделирования процессов восстановления сигналов методами сплайн – функций.

**Степень внедрения и экономическая эффективность:** основные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрялись в государственной акционерной железнодорожной компании «Ўзбекистон темир йўллари». Суммарный экономический эффект составляет 26 млн. сум в год.

**Область применения:** разработанные в диссертационной работе методы, алгоритмы и программные средства могут быть использованы в геофизике, экологии, сейсмологии и радиолокации для обработки сигналов, а также для решения задач прогнозирования стойкости рельсов железнодорожных систем.

## RESUME

Thesis of Utkir Hamdamov on the scientific degree competition of the doctor of philosophy in technical sciences on speciality 05.13.11 - «Mathematical and software of computers, complexes and computer networks» subject: «Simulation of processes of many-dimensional signals processing on the basis of methods a spline – functions and software implementation»

**Key words:** a spline, basic function, basic spline, dot formula, smoothing factor, spline - function, cubic basic spline, signal processor, digital signal processing, simulator, program complex, signal, rail.

**Subjects of research:** polynomial, interpolation and smoothing splines, cubic basic splines, methods and resources of signal processing and prediction of anomalies used in geophysics and railway systems.

**Purpose of work:** development of methods, algorithms and program complex for simulation of processes of processing and restoring of signals on a basis a spline - functions.

**Methods of research:** the theory of the functional analysis, generalized spectral methods, theory of numbers and matrixes, theory a spline of functions and simulation, theory of parallel computing processes and numerical methods of solution of simple equations.

**The results obtained and their novelty:** the methods and effective algorithms of calculation of signal restitution coefficients on the basis of one-dimensional and many-dimensional splines are offered; the algorithms and program complex for simulation of processes of signal processing by methods a spline - functions with application of digital data processors of signals are developed; the spline - method of the analysis, estimation and prediction of operation stability of rails is offered.

**Practical value:** the software of the signals restoring with application of digital signal processors of the set Blackfin are developed; the parallel computing structure is offered on the basis of a cubic basic spline; the program complex for simulation of processes of restoring of signals by methods a spline - functions is developed.

**Degree of embed and economic effectivity:** the main theoretical and practical results of dissertation work took root in the state joint-stock railway company «Uzbekistan temir yo'llari». The summarized economic benefit makes 26 mln. sum in a year.

**Field of application:** the methods, algorithms and software designed in dissertation work can be used in geophysics, ecology, seismology and radiolocation for signal processing, and also for problem solving of prediction of stability of rails in railway systems.

---

Подписано к печати 14.04.2009 г. Формат 60x84 1/16.  
Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 47.

---

Отпечатано в типографии ТГТУ. г.Ташкент,  
ул.Талабалар 54. тел: 246-63-84.