

**На правах рукописи**

**ЗАЙКО Наталья Александровна**

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД  
К ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
В ЗАДАЧЕ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА  
ДААННЫХ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

**Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа 2008**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и перспективность работы.** Точность является основной характеристикой средств измерений (СИ) как устройств для получения и обработки информации.

Повышение точности СИ позволяет увеличить достоверность получаемой с их помощью информации и повысить эффективность применения СИ. Поэтому актуальной является задача получения научно обоснованных оценок точности и достоверности результатов измерений с помощью СИ. По Закону России «Об обеспечении единства измерений» без такой оценки результаты измерений и обработки не могут быть использованы в производственных целях и научных исследованиях. Учет этих требований позволит существенно сократить экономические потери в хозяйстве страны из-за неточности измерений.

Так, например, повышение точности СИ в 1,5 раза при испытании ракетных двигателей позволяет уменьшить количество испытаний более, чем в 7 раз. Стоимость каждого испытания составляет около 100 тыс. долл. США. Для стендовых испытаний ракетных двигателей при 1%-й инструментальной погрешности расходомера жидкого кислорода количество некондиционных испытаний приблизительно равно 50%. При уменьшении погрешности в 2 раза количество некондиционных испытаний уменьшилось в 10 раз.

В нефтегазовой промышленности актуально повышение эффективности использования тонких пластов, насыщенных нефтью и газом. Для этого используют наклонно-направленное бурение с целью пробуривания длинного канала сбора, расположенного вдоль пролегания пласта. При этом необходимо учитывать тот факт, что ресурс близко лежащих пластов, в основном, исчерпан и возникает необходимость глубинного бурения для добычи природных ресурсов. Это существенно повышает требования к точности измерений.

Практически все сигналы на входе СИ являются случайными, так как они подвержены воздействию большого количества независимых возмущающих воздействий. Поэтому весьма важным является нахождение вероятностных характеристик случайных процессов с требуемой точностью.

Количественно точность СИ описывается через характеристики их погрешностей. Поэтому для разработки и при эксплуатации СИ необходима теория точности СИ, адекватно отражающая возможности алгоритмов измерений и обработки данных с учетом их особенностей. На этой теории должны базироваться достоверные методы оценки погрешностей, синтеза алгоритмов и прецизионных СИ для измерений случайных сигналов.

Таким образом, задача повышения точности оценки вероятностных характеристик случайных процессов в настоящее время является весьма актуальной.

Существующее обеспечение точности СИ не отражает отмеченные тен-

денции, в результате чего решение указанной задачи оказывается неудовлетворительным.

Стоит отметить, что около 40% всех измерений связано с исследованием случайных процессов, причем доля таких измерений непрерывно растет. Поэтому поставленная задача перспективна.

Все это требует построения и использования адекватных моделей, как самого процесса измерения, так и его обработки и анализа результата с учетом изменяющихся условий измерений и внешних возмущающих воздействий.

Однако как адекватность этих моделей реальному процессу, так и диапазоны реализаций не являются априорной информацией и подлежат проверке.

**Целью работы** является повышение точности и достоверности оценки характеристик и свойств случайных сигналов на основе математической модели процесса обработки данных натурального эксперимента.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка модели процесса обработки и оценки характеристик случайного сигнала, приемлемой для описания цифровых методов идентификации результатов измерений.

2. Разработка методических основ комплексного подхода получения и уточнения вероятностных характеристик случайного процесса, а также оценки погрешностей, вызванных методом обработки результатов измерений, дискретизацией входного сигнала и ограниченной разрядностью процессора; проверки адекватности моделей, используемых для описания реальных процессов.

3. Синтез алгоритмов и разработка программ идентификации параметров случайного сигнала и исследование их возможностей для обеспечения требуемой точности определения вероятностных характеристик случайных процессов.

4. Применение методики комплексного подхода к оценке погрешностей случайных сигналов и адаптация разработанного программного продукта для использования на реальных случайных процессах.

**На защиту выносятся следующие результаты исследований:**

1. Дискретная модель процесса обработки результатов измерения вероятностных характеристик случайных сигналов.

2. Методические основы комплексного подхода совместного определения закона распределения погрешности сигнала, оценки погрешностей обработки результатов измерений, дискретизации и ограниченной разрядности процессора на основе анализа экспериментальных данных и математической модели процесса обработки.

3. Численные алгоритмы и программы идентификации параметров случайного сигнала, разработанные на основе дискретной модели и комплексного подхода к оценке погрешностей измерений и результатов их обработки.

4. Результаты апробации предложенной методики и исследования свойств алгоритмов применительно к случайным сигналам.

**Научная новизна данной работы заключается в следующем:**

1. Разработанная модель процесса обработки случайного сигнала, в отличие от известных, позволяет одновременно учесть ограниченность диапазона измерений, дискретность отсчетов и накопление погрешности округления.

2. Сформулированный на основе дискретной модели комплексный подход к оценке погрешностей обработки результатов измерений и методика, реализующая этот подход, отличаются сочетанием статистических и детерминированных способов уменьшения погрешностей, что дает возможность оценить все составляющие погрешности, уточнить результат применения разработанных методов и убедиться в достоверности полученных оценок, проверить адекватность моделей, применяемых для описания реальных процессов.

3. Разработанные алгоритмы и программы, в отличие от известных, позволяют представить информацию в виде, дающем возможность оценки всех составляющих погрешностей (имеющих разный порядок) результатов обработки данных натурального эксперимента, что позволяет принимать решения о достоверности получаемых результатов.

4. Результаты апробации позволили определить закономерности изменения погрешностей численных методов и округления при обработке случайных сигналов, что позволило выбрать наилучшие алгоритмы и значения параметров процесса обработки. Это в 2–4 и более раз увеличило точность и повысило достоверность результатов обработки конкретного случайного сигнала.

**Методы исследования.** В качестве методологической основы для решения сформулированной задачи использованы теория вероятностей и методы математической статистики, математическое моделирование, методы идентификации и экстраполяции результатов обработки экспериментальных данных.

**Практическую ценность** имеют алгоритмы идентификации параметров случайного сигнала, программы, реализующие разработанные алгоритмы и методы практической оценки их погрешностей.

**Внедрение результатов работы** осуществлено в НИИ ТС «Пилот» при наклонно-направленном бурении в процессе обработки сигналов из забоя скважины, а также в учебном процессе УГАТУ при выполнении учебно-исследовательских лабораторных работ по курсам «Стохастическая теория электрических цепей» и «Физические методы измерения и контроля».

Работа была поддержана стипендиями Президента Республики Башкортостан (2005-2006) и Президента Российской Федерации (2006-2007), грантом РФФИ 08-07-09226-моб\_з.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XXVII, XXVIII, XXX Международных научных конференциях

«Гагаринские чтения» (Москва, 2001, 2002 и 2004 гг.);

- второй Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (Уфа, 2001 г.);
- Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления и обработки информации» (Уфа, 2001 и 2003 гг.);
- XVII Всемирном Конгрессе ИМЕКО по измерениям (Хорватия, Дубровник, 2003 г.);
- Всероссийской научной конференции «VII Королевские чтения» (Самара, 2003 г.);
- 5-й, 7-м, 10-м Международных научных семинарах «Компьютерные науки и информационные технологии» (Уфа, 2003 и 2005 гг.; Турция, Анталия, 2008 г.);
- второй Международной летней научной школе «Гидродинамика больших скоростей» (Чебоксары, 2004 г.);
- второй Всероссийской научно-практической конференции «Вузовская наука – России» (Набережные Челны, 2005 г.);
- Международной научно-технической конференции «Информационные, измерительные и управляющие системы» (Самара, 2005 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 18 работ в журналах, материалах научно-технических конференций российского и международного уровней, получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 126 страниц текста основного содержания, 51 рисунок и 92 наименования списка литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** к диссертации обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель и задачи исследования, приводятся результаты, выносимые на защиту, сведения о реализации работы, ее апробации и публикациях.

**В первой главе** проведен анализ существующих моделей идентификации характеристик случайных процессов, рассмотрены методы исследования экспериментальных результатов.

**Эмпирические исследования** являются основным источником объективной информации о характеристиках процессов, протекающих в реальных объектах, в том числе и в современных СИ. Основные процессы, имеющие место в СИ, носят вероятностный характер. Для оценки их показателей проводится регистрация соответствующих первичных параметров с последующей обра-

боткой накопленных данных с привлечением аппарата теории вероятности и методов математической статистики.

*Имитационное моделирование* представляет собой численный метод проведения на ЭВМ вычислительных экспериментов с математическими моделями, имитирующими поведение реальных процессов, протекающих в СИ.

При исследовании сложных СИ, подверженных случайным возмущениям, используется вероятностное имитационное моделирование, которое оперирует с конкретными случайными числовыми значениями параметров процессов, протекающих в СИ. Поэтому для нахождения объективных и устойчивых характеристик процесса требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой полученных данных.

Общепринятая теория точности СИ основывается на *элементарном подходе к оценке погрешности*. Сущность его заключается в том, что каждый фактор, влияющий на результат измерения, учитывается своей элементарной погрешностью. Каждая элементарная погрешность оценивается своим методом, на основе своей математической модели и не учитывает влияние остальных факторов. Учесть интегральное влияние различных факторов при суммировании элементарных погрешностей практически не удается.

**Во второй главе** проводится построение математической модели процесса обработки и оценки характеристик случайного сигнала на базе комплексного подхода к оценке погрешностей.

Информационные процессы, протекающие в комплексе измерений и обработки их результатов, представляют собой совокупность измеряемых величин, воспринимаемых с помощью датчиков, поступающих в измерительный канал, преобразуемых здесь в цифровой отсчет и поступающих в систему обработки, где с помощью алгоритмов обработки информации, а также правил их выбора и оценки погрешностей рассчитываются характеристики процесса с оценкой их точности, что в конечном итоге и поступает к потребителю информации.

Концептуальная постановка задачи моделирования выглядит следующим образом.

**Дано:**

- дискретная последовательность данных, представленных в цифровом формате  $\langle x_n \rangle$ ;
- точностная характеристика СИ в виде плотности вероятности погрешности  $\omega[\Delta]$ , моментов: математического ожидания  $m_\Delta$ , дисперсии  $D_\Delta$ , и др.

**Определить:**

- закон распределения входного сигнала;
- с его помощью найти вероятностные характеристики случайного процесса  $x(t)$ ;

- оценки их погрешностей.

Поскольку закон распределения можно определить только приближенно, то необходимо найти оценки погрешностей характеристик, вызванные различными источниками (внешними помехами, измерительным прибором, методом вычисления характеристик и ограниченностью разрядности представления чисел в ЭВМ).

Расширить возможности методов обработки экспериментальной информации можно за счет комплексного учета основных факторов, влияющих на точность статистических измерений.

Идея *комплексного подхода* заключается в использовании априорной математической модели общей погрешности в виде суммы:

$$\Delta_{\text{общ}} = \Delta_{\text{возм}} + \Delta_{\text{СИ}} + \Delta_{\text{метод}} + \Delta_{\text{окр}} \quad (1)$$

с последующим построением апостериорной модели путем анализа данных с помощью применения разработанной методики и алгоритмов, приведенных ниже.

1. Внешние воздействия возмущающих факторов  $\Delta_{\text{возм}}$  описываются случайной моделью с априори неизвестным законом распределения  $\omega_1[X]$ .

2. Погрешность СИ  $\Delta_{\text{СИ}}$  считается случайной величиной с известным законом распределения  $\omega[\Delta]$ .

3. Погрешность метода  $\Delta_{\text{метод}}(N, B) = y_{N, B} - y$  (где  $y_{N, B}$  и  $y$  – вычисленное и точное значения) обусловлена дискретизацией входного сигнала, ограниченностью диапазона измерения и ее модель представляется определенными функциональными зависимостями от количества слагаемых сумм и величины диапазона измерения

$$y_{N, B} - y_B = c_1(B)N^{-k_1} + c_2(B)N^{-k_2} + \dots, \quad (2)$$

$$y_B - y = C_1B^{-l_1} + C_2B^{-l_2} + \dots, \quad (3)$$

где  $y$  – точное значение;  $y_{N, B}$  – приближенный результат, полученный при числе слагаемых суммы, равном  $N$ , и длине диапазона измерения, равном  $B$ ;  $y_B$  – предельное при  $N \rightarrow \infty$  значение  $y_{N, B}$  при данном  $B$ ;  $k_1, k_2, \dots, l_1, l_2, \dots$  – действительные числа ( $0 < k_1 < k_2 < \dots, 0 < l_1 < l_2 < \dots$ ), которые могут быть априори известны или неизвестны в зависимости от конкретной ситуации. То есть, модель этих составляющих погрешности является детерминированной.

4. Погрешность округления  $\Delta_{\text{окр}}$  считается неизвестной величиной, диапазон изменения которой определяется экспериментально и может зависеть как от метода вычисления, так и от длины мантииссы машинного слова и способа округления (оценка проводится в гл. 3).

Комплексный подход предполагает использование разработанной методики обработки данных с целью выделения полезной информации путем уменьшения или подавления составляющих погрешности. Для этого в определенной последовательности используется набор известных, адаптированных к



задаче алгоритмов оценки и уменьшения разных видов погрешности.

1. Поскольку закон распределения случайной величины неизвестен, то определяется приближенная зависимость плотности вероятности на основе дискретных эмпирических данных:

- оценка одномерной плотности вероятности

$$\langle \omega_1(X) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \omega[\langle x_n \rangle - X],$$

- оценка двумерной плотности вероятности

$$\langle \omega_2(X_1, X_2, k) \rangle = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} \omega[\langle x_n \rangle - X_1] \omega[\langle x_{n+k} \rangle - X_2].$$

2. Алгоритмы вычисления оценок моментов случайного сигнала, сводятся на основе полученных оценок плотностей вероятности к вычислению средних арифметических результатов измерений или их комбинаций. Для оценки погрешности полученных значений (например, математического ожидания, коэффициента корреляции и др.) используются вычисленные аналогичным способом величины дисперсии и дисперсии дисперсии погрешности. Согласно этим оценкам при необходимости уменьшения (как  $1/\sqrt{N}$ ) случайной составляющей погрешности результатов расчетов необходимо соответствующее увеличение длины выборки  $N$ .

3. Оценка и уменьшение погрешностей дискретизации и ограниченности диапазона измерения проводится с помощью идентификации и экстраполяции результатов расчета характеристик сигнала. Для этого применяются методы Ричардсона, Ромберга, Нэвилла, встроенные в алгоритм идентификации, а в случае неизвестных показателей в (2), (3)  $\delta^2$ ,  $\epsilon$ ,  $\theta$ -алгоритмы. При этом сначала проводится экстраполяция по  $N$ , а затем экстраполированные по  $N$  значения экстраполируются по  $B$ . Эффективность экстраполяции определяется с помощью графиков, построенных в логарифмическом масштабе (см. рис. 2-5), что позволяет оценивать погрешности разных порядков. Набор алгоритмов экстраполяции выбирается в соответствии с результатами их применения к анализируемому сигналу.

4. Применение методов экстраполяции позволяет подавить составляющие погрешностей (2), (3), что дает возможность обнаружить скрытую за погрешностями метода накопившуюся погрешность округления.

5. На основании изучения результатов расчетов строится апостериорная модель сигнала, которая может быть использована для оценки погрешностей при изменении характеристик сигнала.

6. Анализ результатов расчетов на этом этапе позволяет подобрать оптимальные параметры численных методов (длины кванта дискретизации и диапазона измерения, тип переменных). Далее эти параметры могут оставаться неизменными, или периодически корректироваться, если характер сигнала претерпевает значительные изменения.

7. Проводится комплекс вычислений, оценок погрешностей и проверка

достоверности этих оценок с помощью адаптированного программно-алгоритмического обеспечения.

**В третьей главе** осуществлено исследование разработанных моделей и методов оценки погрешностей измерений и результатов их обработки на модельных сигналах, содержащих детерминированную и случайную составляющие.

Проведен анализ поведения коэффициента корреляции в зависимости от вида входного сигнала и получены зависимости коэффициента корреляции  $r(k)$  для различного вида входных сигналов.

Предложены алгоритмы идентификации математических моделей (2) и (3). Алгоритм 1 (рис. 1) обычно используется для оценки погрешности дискретизации по числу отсчетов  $N$ , алгоритм 2 более удобен для оценки погрешности, вызванной ограниченностью диапазона измерения  $B$ , поскольку он требует линейного, а не экспоненциального роста числа отсчетов. Результаты применения этих алгоритмов приведены на рис. 2-5.

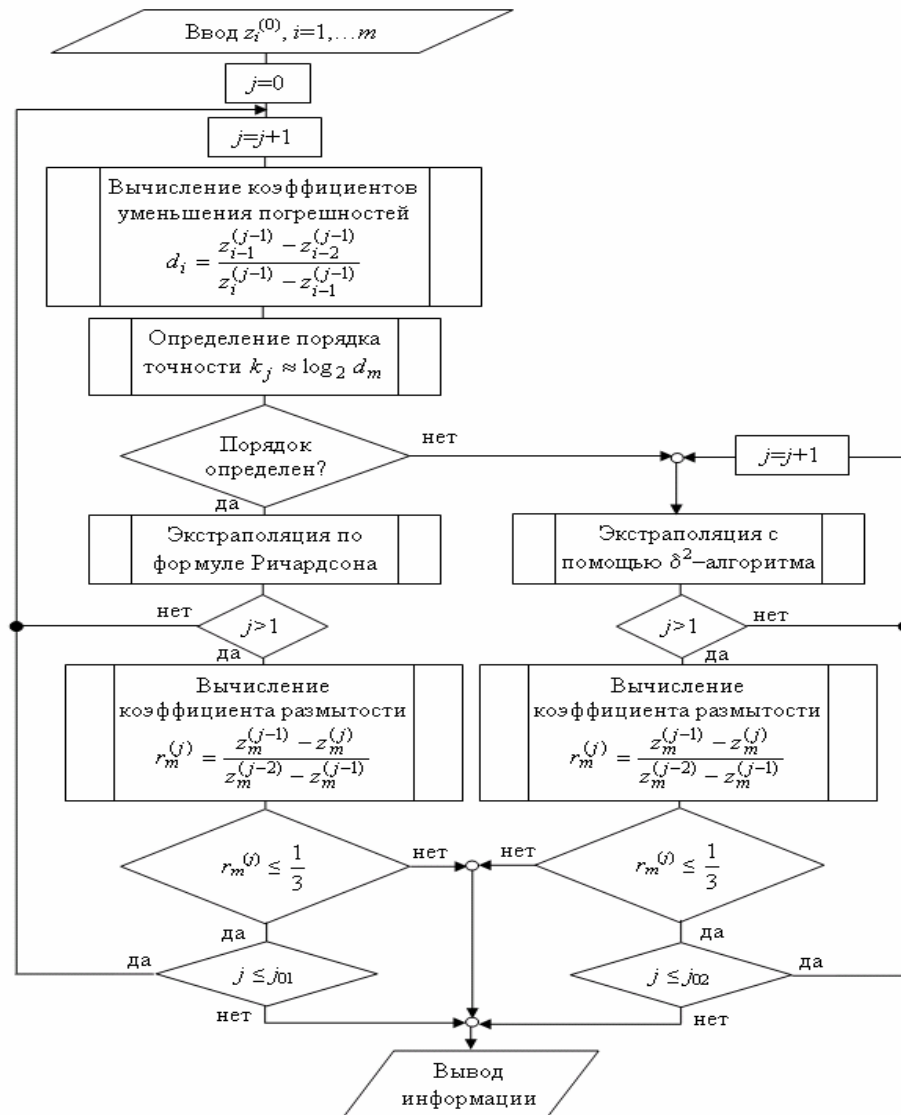


Рисунок 1 – Алгоритм 1 идентификации математических моделей

Осуществлена оценка погрешностей, вызванных дискретностью входного сигнала, ограниченностью диапазона измерений, накоплением погрешности округления.

Рассмотрим зависимость относительной погрешности коэффициента корреляции  $r(k)$  от количества отсчетов  $N$  (рис. 2, 3). Данную зависимость удобнее всего проиллюстрировать в логарифмическом масштабе, поэтому по оси абсцисс будет откладываться десятичный логарифм от количества отсчетов  $N$ , а по оси ординат – десятичный логарифм относительной погрешности вычисления величины коэффициента корреляции  $r(k)$ . Величину  $-\lg\delta$  назовем точностью, выраженной в количестве точных десятичных значащих цифр.

Адаптированным методом Ромберга проведена идентификация математических моделей (2) и (3) по результатам численных экспериментов, что позволило путем экстраполяции получить оценки погрешности и уточнить эти результаты. На рис. 2, 3 цифрой 0 обозначена зависимость погрешности исходных результатов вычисления коэффициента корреляции, цифрами 1–3 показаны результаты однократной, двукратной и т.д. экстраполяции численных данных, проведенной согласно известной методике. Буквой  $a$  обозначены прямые  $y=2+\frac{1}{2}\lg N$  и  $y=12+\frac{1}{2}\lg N$ , оценивающие уровень случайной составляющей погрешности результата, буквой  $b$  – прямые  $y=6,5-\frac{1}{2}\lg N$  и  $y=16,5-\frac{1}{2}\lg N$ , оценивающие уровень накопленной погрешности округления.

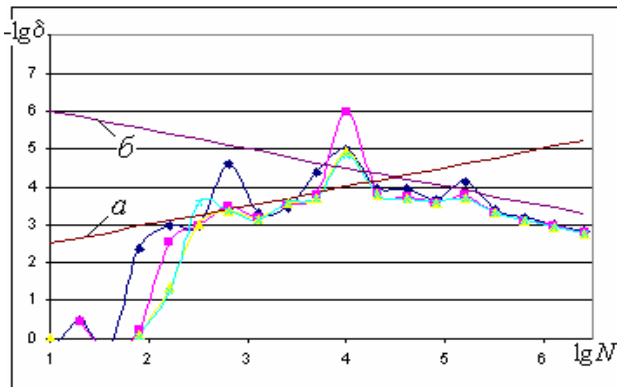


Рисунок 2 – Зависимость погрешности вычисления коэффициента корреляции  $r(k)$  от количества отсчетов  $N$ . Переменные типа single

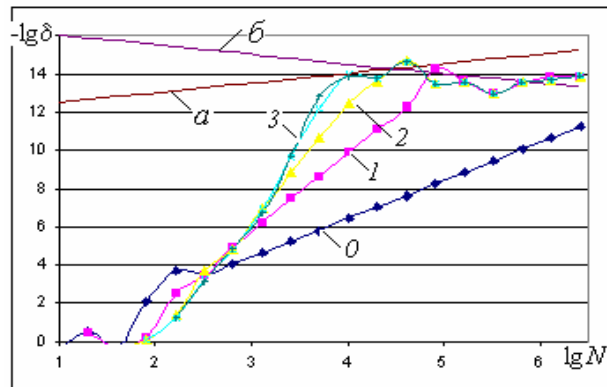


Рисунок 3 – Зависимость погрешности вычисления коэффициента корреляции  $r(k)$  от количества отсчетов  $N$ . Переменные типа double

Экстраполяция позволяет достаточно надежно оценить погрешность численного метода, увеличить точность результата. Путем идентификации и подавления составляющих погрешности численного метода удастся визуально оценить зависимость погрешности округления от  $N$ . Как видно из рис. 2, 3, при суммировании погрешность округления накапливается по статистическому закону. Из-за накопления погрешности округления наблюдается уменьшение точности при  $\lg N > 4$ . Рис. 3 показывает, что экстраполяция позволяет уменьшить погрешность метода на несколько порядков, но только при  $\lg N > 3$ .

Результаты показывают, что накопление погрешности округления происходит по статистическому закону. Оценка относительной погрешности округления может выглядеть следующим образом  $\delta_{окр} \approx 10^{-M} \sqrt{N}$ , где  $M$  – число разрядов мантиссы.

Для изучения характера изменения коэффициента корреляции при расширении диапазона были проведены расчеты с помощью алгоритмов 1 и 2, результаты которых представлены на рис. 4 и 5.

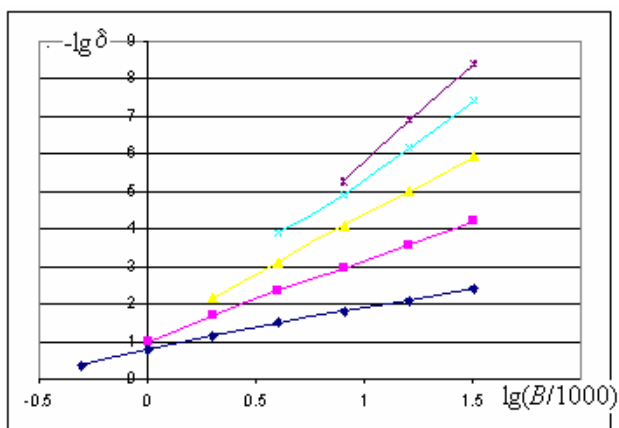


Рисунок 4 – Результаты экстраполяции зависимости значений коэффициента корреляции от величины диапазона измерения с помощью алгоритма 1

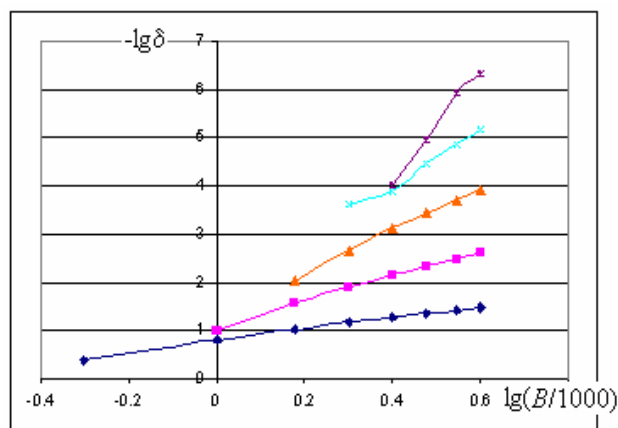


Рисунок 5 – Результаты экстраполяции зависимости значений коэффициента корреляции от величины диапазона измерения с помощью алгоритма 2

По оси абсцисс откладывается  $\lg(B/1000)$ , где  $B$  – величина диапазона измерения, а по оси ординат  $-\lg \delta$ , где  $\delta$  – относительное отличие текущего вычисленного значения от эталонного предельного значения. Каждое использованное значение исследуемой зависимости для каждого  $B$  получалось в результате экстраполяции по  $N$ . Как видно из рис. 4 и 5, зависимость коэффициента корреляции от величины диапазона  $B$  приближенно можно представить функцией  $r_{\infty} - \text{const}/B$ . Экстраполяция позволяет уточнить предельные значения коэффициента корреляции на несколько значащих цифр. При этом сами расчетные значения могут оказаться недостаточно точными. Наличие предельного значения, закономерностей изменения погрешностей при увеличении  $B$  или их отсутствие представляет собой важнейшую информацию не только для оценки точности результатов обработки, но и для принятия решения об адекватности модели случайного процесса и реального сигнала. Как видно из сравнения двух рисунков, алгоритм 2 позволяет добиться большей точности при меньшем обрабатываемом диапазоне измерения.

Чтобы увеличить точность расчетов вероятностных характеристик возможно применение интерполяции для восстановления сигнала между дискретными отсчетами. Для этого воспользуемся полиномом 1-й степени, с помощью

которого будем дополнять существующий набор отсчетов  $z_n$ . В середину между каждой парой отсчетов будем добавлять одну точку. Получим последовательность данных удвоенной длины  $z_n^*$ ,  $n=1, \dots, 2N-1$ . Исследование показало, что при этом погрешность, связанная с дискретизацией, уменьшается в 2–4 раза.

Для оценки эффективности применения предложенной методики определения вероятностных характеристик случайных процессов на базе комплексного подхода к оценке погрешностей и предложенных моделей и методов было проведено исследование с использованием численных данных Винеровского и Марковского случайных процессов.

Результаты исследования Винеровского случайного процесса показали, что при неизменной длительности реализации в процессе восстановления случайного сигнала между дискретными отсчетами полиномом 1-й степени, для дисперсии погрешности математического ожидания и дисперсии погрешности дисперсии наблюдается уменьшение дисперсий в 2–4 раза (рис. 6). Здесь по оси абсцисс отложено отношение  $NT_0/6\sigma_\delta^2$ , где  $N/2$  – интенсивность спектральной плотности белого шума,  $T_0$  – шаг дискретизации,  $\sigma_\delta^2$  – дисперсия погрешности, а по оси ординат – относительное повышение точности за счет перехода от экстраполяции к интерполяции.

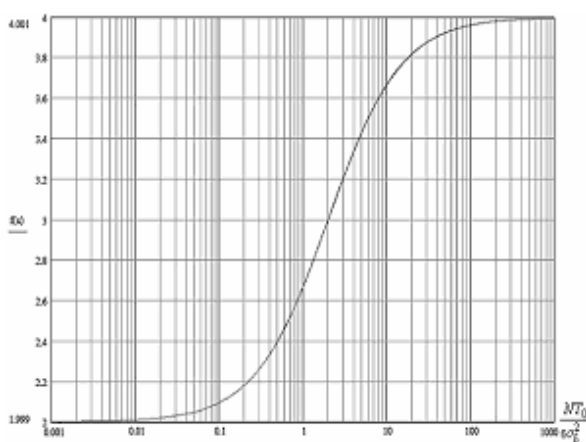


Рисунок 6 – Относительное уменьшение дисперсии погрешности вычисления математического ожидания и дисперсии Винеровского процесса за счет интерполяции

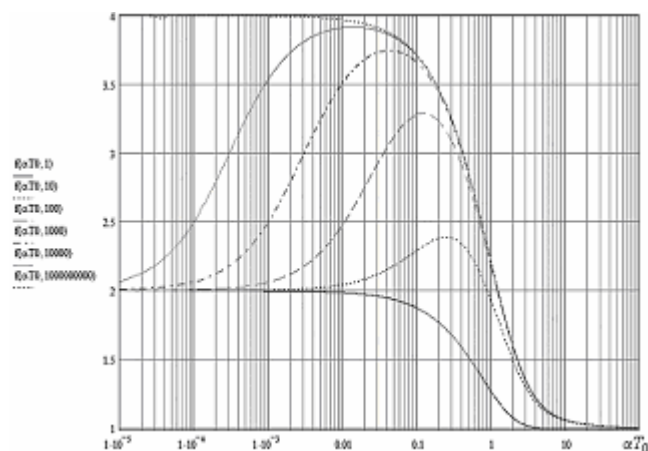


Рисунок 7 – Относительное уменьшение дисперсии погрешности вычисления математического ожидания Марковского процесса за счет интерполяции

Результаты исследования для Марковского случайного процесса показали, что при неизменной длительности реализации в процессе восстановления случайного сигнала между дискретными отсчетами полиномом 1-й степени, дисперсия погрешности математического ожидания (рис. 7) зависит от отношения дисперсий сигнала и погрешности  $\sigma_x^2/\sigma_\delta^2$ ; при этом наблюдается

уменьшение дисперсии в 2–4 раза. При больших шагах дискретизации  $T_0$  коррелированность между отсчетами пропадает и эффективность интерполяции уменьшается ( $\alpha$  – коэффициент динамичности Марковского процесса).

При адаптации программного продукта к реальной ситуации такое исследование позволяет на основе апостериорной информации найти диапазоны параметров численных алгоритмов, приемлемые по затратам вычислительных ресурсов для получения искомым параметров с заданной точностью.

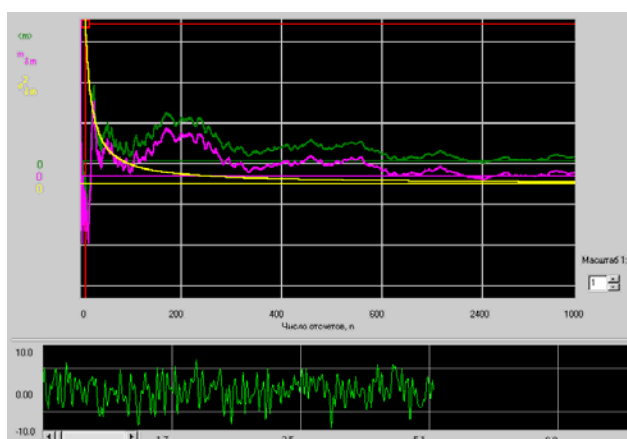
**В четвертой главе**, на основе разработанного комплексного подхода к оценке погрешностей и идентификации вероятностных характеристик случайных процессов и методов обработки результатов измерений на базе комплексной модели (1) осуществлено построение программного обеспечения обработки результатов измерений (рис. 8).



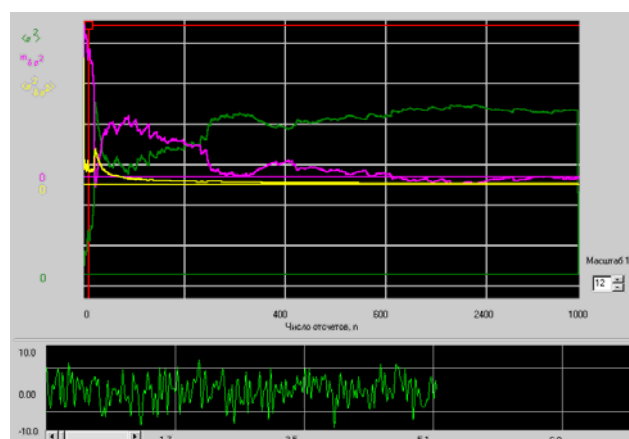
Рисунок 8 – Схема работы программного комплекса

На вход по каналам связи поступает исходная информация, которая анализируется с целью идентификации текущей измерительной ситуации. Затем пользователь вводит управляющие данные (число отсчетов, интервал группи-

рования и шаг дискретизации). Далее следует обращение системы к алгоритмам обработки отсчетов и оценки погрешностей, а также правилам их выбора за информацией, необходимой для идентификации ситуации. Результатом этого обращения является построение математической модели текущей ситуации и выбор оптимальной комбинации алгоритмов обработки измерений из числа возможных в данный момент. Реализация выбранной комбинации осуществляется путем проведения необходимых вычислений и получения обоснованных оценок точности и достоверности результатов измерений. В итоге пользователь получает результаты расчета вероятностных характеристик с оценкой их погрешностей в виде наглядных графиков.



*Рисунок 9* – Зависимость математического ожидания от числа отсчетов и его характеристики погрешности



*Рисунок 10* – Зависимость дисперсии от числа отсчетов и ее характеристики погрешности

На рис. 9 и 10 приведены примеры построения зависимостей математического ожидания и дисперсии от числа отсчетов с оценкой характеристик их погрешностей.

Внедрение полученных результатов в нефтегазовую промышленность было осуществлено в составе работ НИИ ТС «Пилот» (г. Уфа). Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что определение вероятностных характеристик случайных процессов, присутствующих в процессе работы буровой колонны, и оценка их погрешностей позволяет эффективнее управлять процессом бурения на основе надежных и точных характеристик технологических параметров бурения. Применение разработанной модели процесса идентификации вероятностных характеристик случайных процессов и методов обработки результатов измерений на основе этой модели позволяет при обработке сигналов из забоя скважины в процессе наклонно-направленного бурения на глубине 2–5 км попасть в нефтеносный пласт толщиной 1,5–3 м и пробурить там канал сбора нефти длиной 700–1500 м.

В учебном процессе разработанные методы используются при выполнении лабораторных работ по курсам «Стохастическая теория электрических цепей» и «Физические методы измерения и контроля».



## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана дискретная модель процесса обработки результатов измерения случайного сигнала, которая, в отличие от известных, позволяет учесть влияние на результаты обработки всех видов источников погрешности в комплексе. Погрешность результата обработки данных состоит из четырех составляющих: внешние помехи, погрешность измерительного прибора, погрешность численного метода обработки и накопленная погрешность округления, вызванная ограниченной разрядностью процессора.

2. На основе дискретной модели разработаны методические основы комплексного подхода к оценке погрешностей обработки результатов измерений, который не требует знания закона распределения измеряемой составляющей и, в отличие от известных, сочетает статистические и детерминированные способы уменьшения погрешностей, что дает возможность оценить все их составляющие. Исследование показало, что этот подход позволяет уточнить результаты и увеличить надежность полученных оценок, проверить адекватность моделей, применяемых для описания случайных процессов.

3. Разработанные алгоритмы и программы позволяют пользователю в наглядном виде получать информацию об исследуемых параметрах и оценки их погрешностей, что дает возможность оценки всех составляющих погрешностей, имеющих разный порядок. Это обеспечивает, в отличие от известных средств, принятие обоснованных решений о достоверности полученных результатов обработки данных натурального эксперимента.

4. Результаты апробации предложенной методики позволили определить закономерности изменения погрешностей численных методов и округления при обработке случайных сигналов, что позволило выбрать наилучшие алгоритмы и значения параметров процесса обработки. Так, синтезированные алгоритмы позволили при той же длительности реализации уменьшить погрешность получаемых оценок вероятностных характеристик в 2–4 и более раз по сравнению с известными ранее методиками обработки измерительной информации. При неизменной точности во столько же раз можно уменьшить требуемую длительность реализации случайного процесса.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### ***В рецензируемых журналах из списка ВАК***

1. Комплексный подход к определению погрешностей статистических измерений / Н.А. Заико и др. // Вестник СамГТУ. Самара : СамГТУ, 2005. Вып. 3. С. 218–223.



2. Интеллектуальная система для моделирования случайных процессов на базе комплексного подхода к определению погрешностей / Н.А. Заико // Вестник УГАТУ. Серия управление, вычислительная техника и информатика. Уфа : УГАТУ, 2007. Т.9, № 5(23). С. 101–107.

3. Дискретная модель измерения эргодических случайных процессов / Н.А. Заико // Вестник УГАТУ. Серия управление, вычислительная техника и информатика. – Уфа : УГАТУ, 2008. Т.10, № 2(27). – С. 172–176.

### *В других изданиях*

4. Комплекс виртуальных учебно-исследовательских лабораторных работ по теории сигналов / О.Н. Нагаев, Н.А.Заико // XXVII Гагаринские чтения : матер. Междунар. молодежн. науч. конф. М. : МАТИ, 2001. Т. 6. С. 50–51.

5. Анализатор случайных сигналов АСС-3 / О.Н. Нагаев, Н.А. Заико // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций : матер. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. Уфа : УГАТУ, 2001. С. 88–90.

6. Виртуальная лабораторная работа по исследованию энтропии сигналов / Н.А. Заико // Интеллектуальные системы управления и обработки информации : матер. Межднар. молодежн. науч.-техн. конф. Уфа : УГАТУ, 2001. С. 201. (На англ. яз.).

7. Виртуальная лабораторная работа по исследованию характеристических функций и энтропии сигналов / Н.А. Заико, О.Н. Нагаев // XXVIII Гагаринские чтения : матер. Междунар. молодежн. науч. конф. М. : МАТИ, 2002. Т. 6. С. 14.

8. Точность статистических и спектральных измерений / Н.А. Заико и др. // Матер. XVII Всемирн. конгресса ИМЕКО по измерениям (ТС-8). Дубровник, Хорватия, 2003. С. 1275–1279. (Статья на англ. яз.).

9. Уместность обработки статистических и спектральных данных / Н.А. Заико и др. // Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT'2003) : матер. 5-й Междунар. науч. сем. Уфа, Россия, 2003. Т. 1. С. 250–254. (Статья на англ. яз.).

10. Определение ошибок статистических и спектральных измерений / Н.А. Заико // VII Королевские чтения : матер. Всерос. молодежн. науч. конф. Самара : СГАУ, 2003. Т. 2. С. 59–60.

11. Точность вероятностных и спектральных измерений / Н.А. Заико // XI Туполевские чтения : матер. Всерос. молодежн. науч. конф. Казань : КГТУ, 2003. Т. 2. С. 86.

12. Инструментальные погрешности статистических и спектральных измерений / Н.А. Заико // Интеллектуальные системы управления и обработки информации : матер. Межднар. молодежн. науч.-техн. конф. Уфа : УГАТУ, 2003. С. 67.

13. Комплексный подход к определению методических и инструментальных погрешностей статистических и спектральных измерений / Н.А. Заико // XXX Гагаринские чтения : матер. Междунар. молодежн. науч. конф. М. : МАТИ, 2004. Т. 6. С. 74.

14. Определение методических и инструментальных погрешностей статистических и спектральных измерений / В.П. Житников, Н.А. Заико // Гидродинамика больших скоростей : матер. 2-й Междунар. летн. науч. шк. Чебоксары, 2004. С. 281–285. (Статья на англ. яз.).

15. Интеллектуальная измерительная система для исследования вероятностных характеристик случайных сигналов / Н.А. Заико // XII Туполевские чтения : матер. Междунар. молодежн. науч. конф. Казань : КГТУ, 2004. Т. 4. С. 40.

16. Интеллектуальная измерительная система для анализа случайных процессов с применением комплексного подхода к определению погрешностей / Н.А. Заико // Вузовская наука – России : матер. 2-й межвуз. науч.-практ. конф. Наб. Челны : КамПИ, 2005. Т. 1. С. 254–256.

17. Комплексный подход к определению погрешностей статистических измерений / Н.А. Заико и др. // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2005) : матер. Междунар. науч.-техн. конф. Самара : СамГТУ, 2005. С. 176–177.

18. Интеллектуальная измерительная система для анализа вероятностных характеристик случайных процессов с использованием комплексного подхода к определению погрешностей / Н.А. Заико // Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT'2005) : матер. 7-го Междунар. науч. сем. Уфа, Россия, 2005. Т. 2. С. 27–29. (Статья на англ. яз.).

19. Интеллектуальная измерительная система на базе комплексного подхода к определению методических погрешностей статистических измерений / Н.А. Заико // Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT'2006) : матер. 8-го Междунар. науч. сем. Карлсруэ, Германия, 2006. Т. 2. С. 85–90. (Статья на англ. яз.).

20. Интеллектуальная система для анализа вероятностных характеристик случайных процессов / Н.А. Заико // Полет. – М. : Машиностроение, 2007. № 9. С. 39–44.

21. Математическая модель процесса обработки и оценки характеристик случайного сигнала / Н.А. Заико // Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT'2008) : матер. 10-го Междунар. науч. сем. Анталия, Турция, 2008. Т. 2. С. 210–214. (Статья на англ. яз.).

22. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2008612822. Программный модуль для анализа измерительной информации на базе комплексного подхода к определению погрешностей / В.П. Житников, Н.А. Заико. М. : Роспатент, 2008. Зарег. 09.06.2008 г.

Диссертант

Н.А. Заико

ЗАЙКО Наталья Александровна

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД  
К ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
В ЗАДАЧЕ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА  
ДААННЫХ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 05.11.2008. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № 500.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии УГАТУ  
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12