

На правах рукописи

Петров Алексей Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУННЫХ ДАТЧИКОВ

Специальность 05.11.16 – “Информационно-измерительные и управляющие  
системы (энергетика)”

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2004

Работа выполнена на кафедре “Измерительные информационные технологии” в ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Клементьев А.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Кондрашкова Г.А.

кандидат технических наук

Кубланов М.Я.

Ведущая организация: ОАО "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники (ВНИИГ) им. Б.Е.Веденеева"

Защита состоится “23” декабря 2004 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.10 в ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” (по адресу 194021, Политехническая 21, ауд. 535).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан

“23” ноября 2004 г.

Учёный секретарь совета

д.т.н., проф.

Малыхина Г.Ф.

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Технология измерений с помощью струнных датчиков весьма актуальна, когда речь идёт о контроле состояния различных гидротехнических и подземных сооружений, например, плотин ГЭС, тоннелей, мостов. Благодаря преимуществам частотного выходного сигнала, высокой чувствительности и долговечности датчики этого типа получили широкое распространение в нашей стране и за рубежом, а для преобразования их параметров многими производителями выпускается специализированная вторичная аппаратура.

Теория и практика использования струнных датчиков достаточно развиты, поскольку основные задачи в этой области решались, начиная с 20-30х годов XX века (работы академика Н.Н. Давиденкова). Но по мере накопления опыта эксплуатации возник ряд вопросов, связанных с точностью и надёжностью вторичного измерительного преобразования.

Для измерения частоты (периода) сигнала датчика, как правило, применяются хорошо известные цифровые счётные методы, надёжные и сравнительно простые в реализации. Однако на точность этих методов существенное влияние оказывают вызываемые старением датчиков уменьшение амплитуды сигнала и увеличение скорости затухания, а также неосновные гармоники колебаний струны и наведённые помехи.

Учитывая, что подавляющее большинство находящихся в эксплуатации струнных датчиков труднодоступны для замены, ремонта или периодической поверки, совершенствование методов вторичного преобразования их параметров является очевидным шагом на пути повышения точности и надёжности измерений, увеличения срока эксплуатации датчиков. Это касается как методов измерения частоты сигнала датчика, так и способов возбуждения колебаний и оценки состояния датчика по таким параметрам как спектральный состав колебаний струны, декремент их затухания и амплитуда сигнала отклика.

### **Цель работы.**

Целью работы является исследование и развитие методов вторичного преобразования параметров струнных датчиков, а также решение практических задач проектирования

универсальных измерительных систем для струнных датчиков. В связи с основным направлением исследований в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Определение путей совершенствования вторичной аппаратуры для струнных датчиков (ВАСД) на основе результатов изучения функциональных и конструктивных особенностей датчиков, анализа методов измерения частотно-временных параметров сигналов и сопоставления существующих образцов данной аппаратуры.
2. Анализ и развитие спектрального метода измерения частоты для повышения его точности и помехозащищённости применительно к многообразию реальных сигналов струнных датчиков.
3. Исследование и оптимизация частотно-временных характеристик импульса возбуждения колебаний струны с целью улучшения распределения энергии гармоник.
4. Исследование методов и создание алгоритмов для оценки параметров затухания сигнала датчика.
5. Разработка и совершенствование структурной реализации измерительных систем для струнных датчиков и соответствующего программного обеспечения.

#### **Методы исследований.**

В диссертационной работе применялись методы спектрального анализа, z-преобразования и теории фильтрации, а также теории погрешностей и математической статистики. Проводилось математическое моделирование рассматриваемых процессов и методов с использованием программного обеспечения MathCAD.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Усовершенствован спектральный метод измерения частоты сигнала с использованием интерполяции дискретного спектра, основанной на оконном взвешивании.
2. Предложены теоретически обоснованные методы оптимизации возбуждающего воздействия с целью усиления основной и подавления кратных гармоник колебаний струны.
3. На основании анализа погрешностей даны рекомендации по улучшению помехоустойчивости алгоритмов измерения параметров затухания.

**Практическая значимость:**

1. Разработаны алгоритмы и соответствующее программное обеспечение, реализующие предложенный вариант спектрального метода измерения частоты и оптимизированные для встраиваемых микропроцессорных устройств.
2. Предложены и реализованы на практике алгоритмы и программное обеспечение для измерения коэффициента затухания колебаний струны датчика на основе анализа средневыпрямленного значения сигнала отклика.
3. Созданы многоканальная автоматизированная система и автономный многофункциональный прибор, использующие предложенные методы вторичного измерительного преобразования параметров струнных датчиков.

**Результаты реализации и внедрения:**

При непосредственном участии автора созданы современные промышленные образцы измерительных систем и приборов, использующих струнные датчики, в том числе:

- на Бурейской и ряде других ГЭС внедрены в эксплуатацию в системах контроля состояния плотины восемь автономных приборов и специализированное программное обеспечение, разработанное автором;
- в Санкт-Петербургском Метрополитене на участке размыва с июня 2004 г в эксплуатации находится автоматизированная распределённая измерительная система, использующая более ста струнных датчиков для контроля деформации бетонной обделки тоннелей.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод измерения частоты сигнала на базе спектрального анализа с использованием интерполяции дискретного спектра, основанной на оконном взвешивании.
2. Алгоритм измерительного преобразования, реализующий разработанный вариант спектрального метода измерения частоты.
3. Методика оптимизации импульсного возбуждения датчика по критерию сосредоточения максимума энергии колебаний в области основной гармоники.
4. Алгоритмическое и программное обеспечение для использования в разработанных измерительных системах и приборах, реализующих вторичное преобразование параметров струнных датчиков.

**Апробация работы.** Основные практические и научные результаты диссертационной работы обсуждались на VII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права» (РФ, Сочи, октябрь 2004г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 3 статьи, из них – одна статья в научно-техническом журнале и две статьи в сборнике материалов международной научно-практической конференции.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Содержит 150 страниц основного текста, 65 рисунков, 7 таблиц.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность проблемы, определяется предмет, формулируются цель и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена исследованию конструктивных и функциональных особенностей струнных датчиков, обзору методов измерения частотно-временных параметров сигналов и анализу параметров, характеризующих затухание колебаний, а также обзору и сравнительному анализу современных измерительных систем и приборов, предназначенных для работы со струнными датчиками.

Вначале рассмотрены основные уравнения, связанные с функционированием струнных датчиков, отмечены различные варианты построения устройств возбуждения колебаний струны и их преобразования в электрический сигнал, а также импульсный и резонансный способы опроса датчиков. Выявлена тенденция к преимущественному использованию импульсного способа возбуждения и определён критерий оптимизации частотно-временных характеристик импульсов.

Особое внимание в главе уделено анализу методов измерения частотно-временных параметров сигналов. Выделены три основные группы этих методов: классические счётно-импульсные, спектральные и модельно-зависимые. Для указанных групп проведён сравнительный анализ достоинств и недостатков применительно к реальным сигналам струнных датчиков. Также рассмотрены характеристики затухания сигнала и их определение для систем, описываемых дифференциальными уравнениями второго порядка.

В конце главы приведен обзор ВАСД отечественных и зарубежных производителей и сравнительная таблица их характеристик. Предложена классификация по функциональному признаку, сделаны выводы о современных тенденциях развития этого направления измерительного приборостроения и сформулирован список требований к современным автоматизированным системам сбора данных.

На основании выполненного анализа определены задачи, решение которых повысит качество вторичного измерительного преобразования параметров струнных датчиков.

**Во второй главе** проведён углублённый анализ теоретических положений, связанных с решением поставленных задач.

Путём изучения колебательных процессов струнной системы датчика, описываемых дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных, было выведено выражение для импульсного воздействия на струну, оптимального с точки зрения сосредоточения энергии колебаний в частотной области основной гармонике при одновременном подавлении высокочастотных:

$$\hat{g}(x, t) = g_x(x) \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t) \cdot w_T(t), \quad (1)$$

где  $g_x(x)$  – функция распределения ускорения вдоль струны ( $x$ );  $f_1 \in [f_{\min}; f_{\max}]$  – некоторая частота из диапазона ожидаемых частот отклика;  $w_T(t)$  – окно, ограничивающее импульс во времени, причём длительность воздействия  $T$ , связана с диапазоном ожидаемых частот отклика.

Оценка эффективности такого воздействия проводилась путём спектрального анализа линейной системы, описывающей процесс колебаний струны, в которой в качестве входного воздействия принята внешняя сила  $G(p, x)$ , а выходного – поперечное смещение струны  $Y(p, x)$ . Получение выражения для функции  $Y(p, x)$  связано с необходимостью рассматривать входное воздействие как линейную комбинацию фундаментальных функций струны –  $\sin(\pi \cdot n \cdot x/L)$ , где  $L$  – длина струны,  $n$  – номер моды. В таком случае результат воздействия представляет собой сумму

$$Y(p, x) = \sum_n K_n(p) \cdot g_n(p) \cdot \sin(\pi \cdot n \cdot x/L), \quad (2)$$

где  $g_n(p) = \frac{2}{L} \cdot \int_0^L G(p, x) \cdot \sin(\pi \cdot n \cdot x/L) \cdot dx$ ;  $K_n(p) = (p^2 + 2\delta p + \omega_n)^{-1}$  – передаточная

характеристика линейной системы со струной, причём  $\omega_n$  – частоты колебательных мод струны.

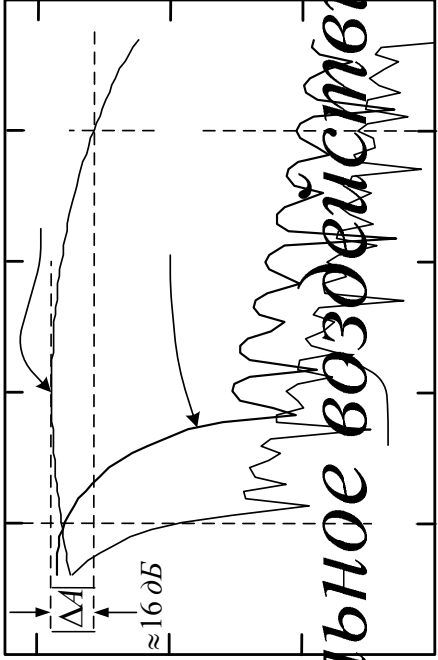
При анализе оптимальных воздействий (1) были рассмотрены различные оконные функции  $w_T(t)$ , а также часто используемые на практике формы импульсов возбуждения: прямоугольные и экспоненциальные. Основным критерием для оценки оптимальности импульсов в работе принято отношение амплитуд основной и высших гармоник в зависимости от частоты основной. В реальных конструкциях датчиков главный негативный вклад вносят нечётные колебательные моды струны, в частности третья и пятая.

На рис. 1 приведены диаграммы распределения амплитуд первой, третьей и пятой гармоник колебаний струны в зависимости от частоты первой гармоники для традиционных и оптимальных воздействий. Параметры импульсов выбраны с учетом условия  $f_1 \in [500; 2000]$  Гц.

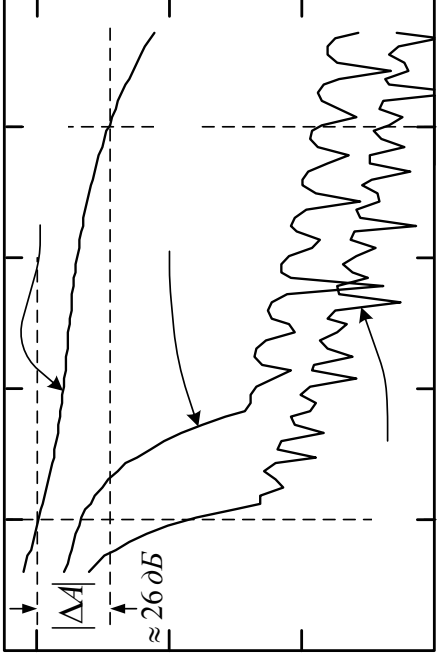
По результатам анализа сделаны выводы о преимуществе оптимальных воздействий в плане подавления высших гармоник: отношение амплитуд  $A_1/A_3$  и  $A_1/A_5$  составляет около 70 дБ и 90 дБ для оптимальных воздействий и около 20 дБ и 35 дБ для традиционных воздействий. Неравномерность характеристики  $\Delta A$  сравнительно велика для всех рассмотренных случаев: от 15 до 25 дБ, что говорит о необходимости настройки параметров воздействия в зависимости от типа датчика. В связи с этим предложены основные способы, позволяющие решить задачу автоматического выбора параметров возбуждающего воздействия для датчиков с различными характеристиками.

Важной задачей диссертационного исследования является развитие спектрального метода измерения частоты для сигнала струнного датчика. Эта задача обусловлена тем, что при уменьшении длительности анализируемого сигнала возрастает шаг дискретизации отсчётов спектра  $\Delta F$  и, соответственно, погрешность измерения. Известные методы устранения данной проблемы в случае затухающего сигнала струнного датчика недостаточно эффективны, поэтому в работе исследуются альтернативные пути повышения точности измерения в условиях ограниченного времени наблюдения.

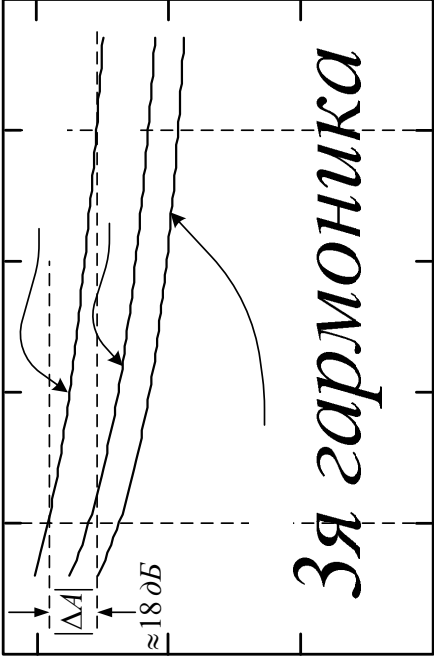




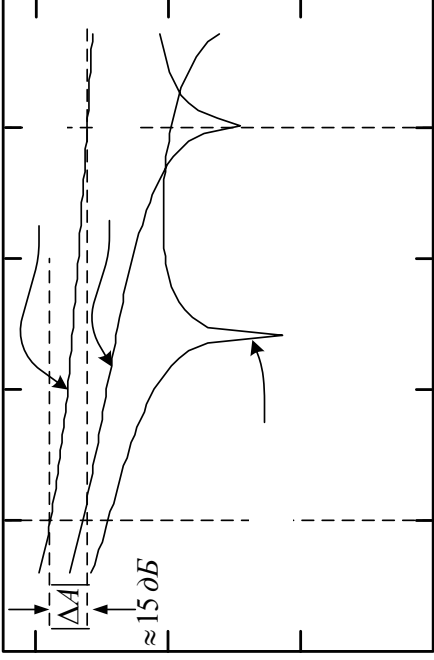
*оптимальное воздействие*



*1я гармоника*



*3я гармоника*



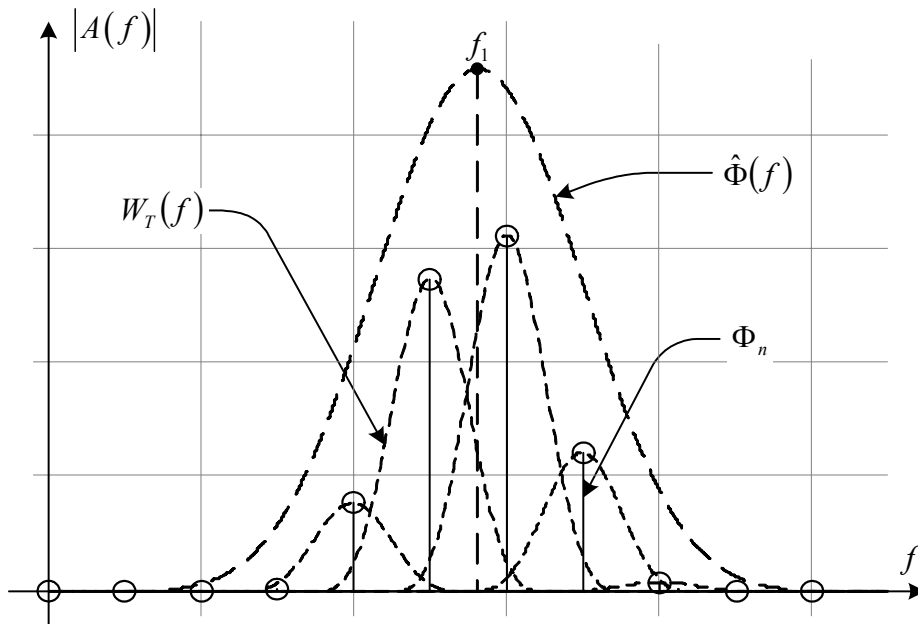
*f max*

Рис. 1. Диаграммы распределения амплитуд гармоник в зависимости от частоты основной гармоники

Автором предложено использовать интерполяцию дискретной функции распределения спектральной плотности амплитуд, основанную на оконном взвешивании ("оконная" интерполяция). Под такой интерполяцией в данной работе подразумевается использование преобразования вида (3) для непрерывного спектра  $\hat{\Phi}(f)$  дискретного и ограниченного во времени сигнала:

$$\hat{\Phi}(m \cdot \Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} \Phi_n \cdot W_T(m \cdot \Delta f - n \cdot \Delta F), \quad (3)$$

где  $\Phi_n$  – отсчёты дискретного спектра;  $W_T(f)$  – спектральная функция окна  $w_T(t)$ , ограничивающего исходный сигнал во времени;  $\Delta F/\Delta f \equiv r$  – коэффициент интерполяции;  $N$  – объём рассматриваемой выборки. Рис. 2 иллюстрирует этот процесс.



**Рис. 2. Диаграмма формирования непрерывного спектра дискретного сигнала**

С целью выбора оптимальной для рассматриваемого класса сигналов функции  $W_T(f)$  был выполнен сравнительный анализ ряда известных оконных функций, а для нескольких, обладающих наилучшим соотношением ширины основного и энергии боковых "лепестков", произведена оценка погрешности метода измерения частоты. По результатам данного анализа в дальнейших исследованиях применялось окно Блэкмана, как отвечающее указанному требованию и относительно простое для вычислений.

Оценка эффективности предложенного решения производилась по методу Монте-Карло при  $f_1 \in \{\tilde{f}_u, u = 1 \dots M\}$ , где  $\tilde{f}_u$  – случайные величины, равномерно распределённые в диапазоне [500;2000] Гц. Для этого было выполнено моделирование и анализ погрешности спектральных методов измерения частоты, использующих цифровую, сплайновую и оконную интерполяции. Условия и результаты исследования приведены в табл. 1.

Табл. 1.

Интерполяция	Цифровая	Сплайновая	Оконная
Параметры интерполяции	Сглаживающий фильтр: $Z(z^{-1}) = \left[ \frac{1(z^{-n} - 1)}{n(z^{-1} - 1)} \right]^p$ $p = 5, n = 2r$	Кубические сплайны	Окно Блэкмана
Коэффициент интерполяции $r$	256	– (аналитическая)	256
Количество выборок $M$	300	300	300
Погрешность $\Theta_{0,95}$ , Гц	0,02	0,2	0,01
Распределение погрешности	Нормальное	Arctsin	Равномерное
Оценочное время вычисления <sup>1</sup> , с	110	25	40

По представленным данным сделан вывод о том, что предложенный вариант интерполяции с окном Блэкмана позволяет эффективно измерять частоту сигнала в плане производительности и вычислительной сложности. Дополнительно были оценены законы распределения погрешностей для рассмотренных вариантов. При “оконной” интерполяции распределение равномерное, что позволяет предположить отсутствие какой-либо методической погрешности.

Далее в данной главе анализируются методы измерения параметров затухания сигнала, в первую очередь их погрешность и помехоустойчивость. Сравниваются методы измерения коэффициента затухания  $\delta$  по амплитудным, среднеквадратическим

<sup>1</sup> Среда – MathCAD v.11

(СКЗ) и средневыпрямленным (СВЗ) значениям. В табл. 2 приведены результаты анализа для идеализированной математической модели затухающего сигнала  $A(\tau)$ . Погрешность представления мгновенных значений реального сигнала  $\gamma A$  определяется в основном соотношением сигнал/шум и, таким образом, коэффициент  $\gamma A/\gamma\delta$ , где  $\gamma\delta$  – погрешность результата измерения, определяет помехоустойчивость метода.

Табл. 2.

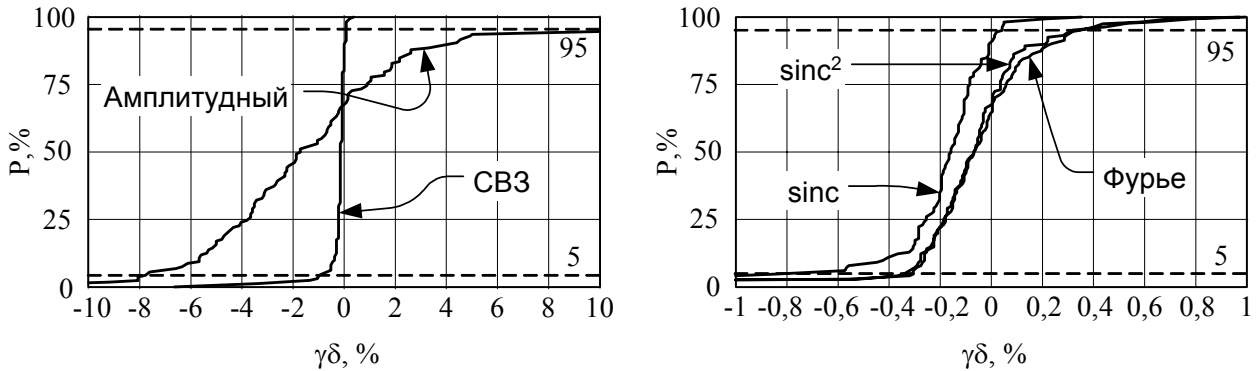
Метод	Амплитудный	СКЗ	СВЗ
Исходная величина	$R_i = \max A(\tau) - \min A(\tau),$ $\tau \in [t_i; t_i + T_1]$ (размах колебаний)	$W(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} A(\tau)^2 d\tau$ (квадрат средне- квадратического значения)	$\Omega(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T}  A(\tau)  \cdot d\tau$ (средневыпрямлен- ное значение)
Коэффициент затухания $\delta$	$-\frac{\ln R_1 - \ln R_0}{t_1 - t_0}$	$-\frac{1}{2} \frac{\ln W(t_1) - \ln W(t_0)}{t_1 - t_0}$	$-\frac{\ln \Omega(t_1) - \ln \Omega(t_0)}{t_1 - t_0}$
Относительная погрешность измерения $\gamma\delta$	$\gamma A \frac{1}{\Gamma}, \Gamma = \left  \ln \frac{R_1}{R_0} \right $	$\frac{\sqrt{2}}{2\Gamma} \left[ \left( \frac{\gamma A}{k_1} \right)^2 \pm 2 \frac{\gamma A}{m} \right],$ $m = \sqrt{t \cdot \Delta F^*}$	$\frac{\pi}{\sqrt{2} \cdot \Gamma \cdot m} \gamma A$
$\gamma\delta$ при $\Gamma \approx 2,3,$ $m \approx 45$ и $\gamma A \approx 10\%$	4,5%	0,3%	0,2%

\*  $\Delta F$  – рассматриваемый частотный диапазон.

Отмечается, что с практической точки зрения, то есть в плане вычислительной сложности и методической погрешности, определённым преимуществом обладает метод измерения по СВЗ.

Дополнительно проведено исследование влияния на погрешность результата измерения характеристик усредняющего фильтра, используемого для получения СВЗ. Рассмотрен ряд фильтров, выбранных по критериям минимальной вычислительной сложности или максимальной крутизны амплитудно-частотной характеристики. На рис. 3 представлены диаграммы распределения погрешностей, полученные путём моделирования методов измерения коэффициента затухания по амплитудным и средневыпрямленным значениям при условиях, соответствующих указанным в табл. 2, и  $\delta \in [1;90]$  дБ/с. В целом, полученные результаты соответствуют численным данным, приведённым в табл. 2. Отмечено также, что использование более сложных в реали-

зации фильтров (например,  $\text{sinc}^2$  и синтезированный методом Фурье) даёт относительно невысокий эффект в подавлении случайных и аддитивных помех по сравнению с простым усреднением ( $\text{sinc}$ ).



**Рис. 3. Диаграммы интегральных функций распределения погрешностей, полученные по результатам моделирования метода измерения по СВЗ**

**Третья глава** посвящена разработке и анализу программно-аппаратных структур современных измерительных систем для струнных датчиков.

В работе предложена обобщённая структурная схема данного класса устройств и более детально рассмотрены наиболее важные её компоненты. Выделено четыре измерительных канала: основной – частотный и дополнительные – каналы измерения активного сопротивления, коэффициента затухания и осциллографический. Наличие канала измерения сопротивления позволяет осуществлять диагностику цепей датчика, а также получать дополнительную информацию о его температуре и при необходимости выполнять температурную коррекцию результатов измерения. Также в структуре присутствуют внутренний коммутатор каналов, блоки обработки данных и управления процессом измерения.

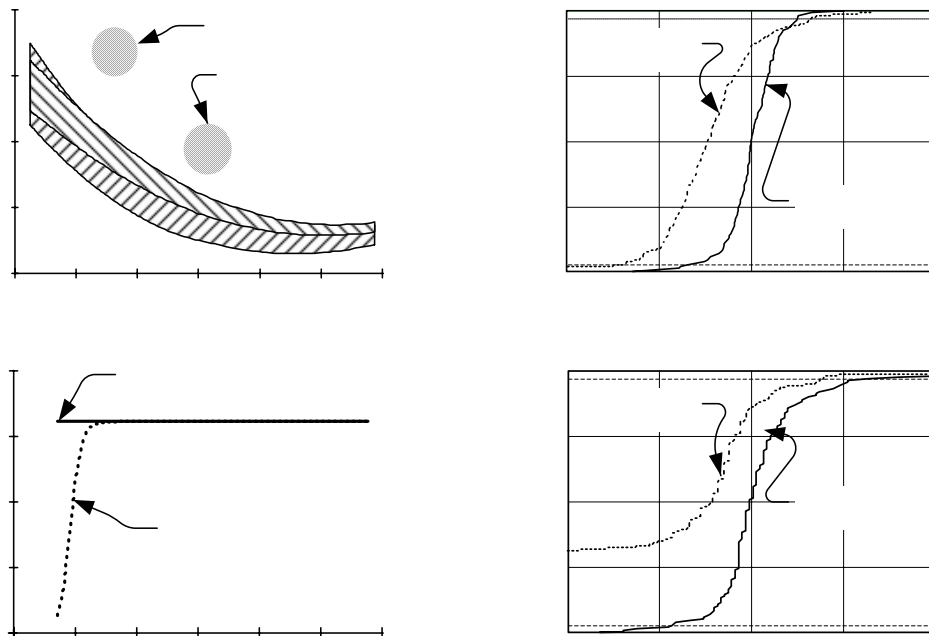
Далее представлены результаты разработки и исследования программных технологий обработки сигналов струнных датчиков для микроконтроллерных устройств (МК). С учётом структур современных микроконтроллерных платформ предложены и исследованы алгоритмы для решения следующих задач:

- измерение периода сигнала счётно-импульсными методами; при этом основной акцент сделан на оптимизацию использования периферийных компонент МК семейства MCS-51;
- измерение частоты сигнала спектральным методом с использованием “оконной” интерполяции спектра;

- измерение коэффициента затухания сигнала по его средневыпрямленным значениям.

Алгоритм измерения частоты сигнала спектральным методом рассмотрен как последовательность таких этапов измерительного преобразования, как дискретизация и квантование, предварительная фильтрация и децимация, преобразование Фурье, интерполяция и поиск максимума.

Для сравнительной оценки эффективности методов выполнены экспериментальные исследования разработанных реализаций алгоритмов измерения периода и частоты. На основании анализа зависимости результатов измерения частоты от начальной амплитуды сигнала (рис. 4а и в) можно говорить об эффективности разработанного спектрального алгоритма при широком амплитудном диапазоне сигналов струнных датчиков – до 40 дБ, что соответствует реальному разбросу данного параметра. Кроме того, установлено, что, согласно полученным интегральным функциям распределения погрешностей (рис. 4б и г), спектральный метод обеспечивает существенно меньшее (до двух раз) значение абсолютной погрешности результатов измерения частоты по сравнению со счётно-импульсным.



**Рис. 4. Диаграммы распределения результатов измерения частоты и их погрешности**

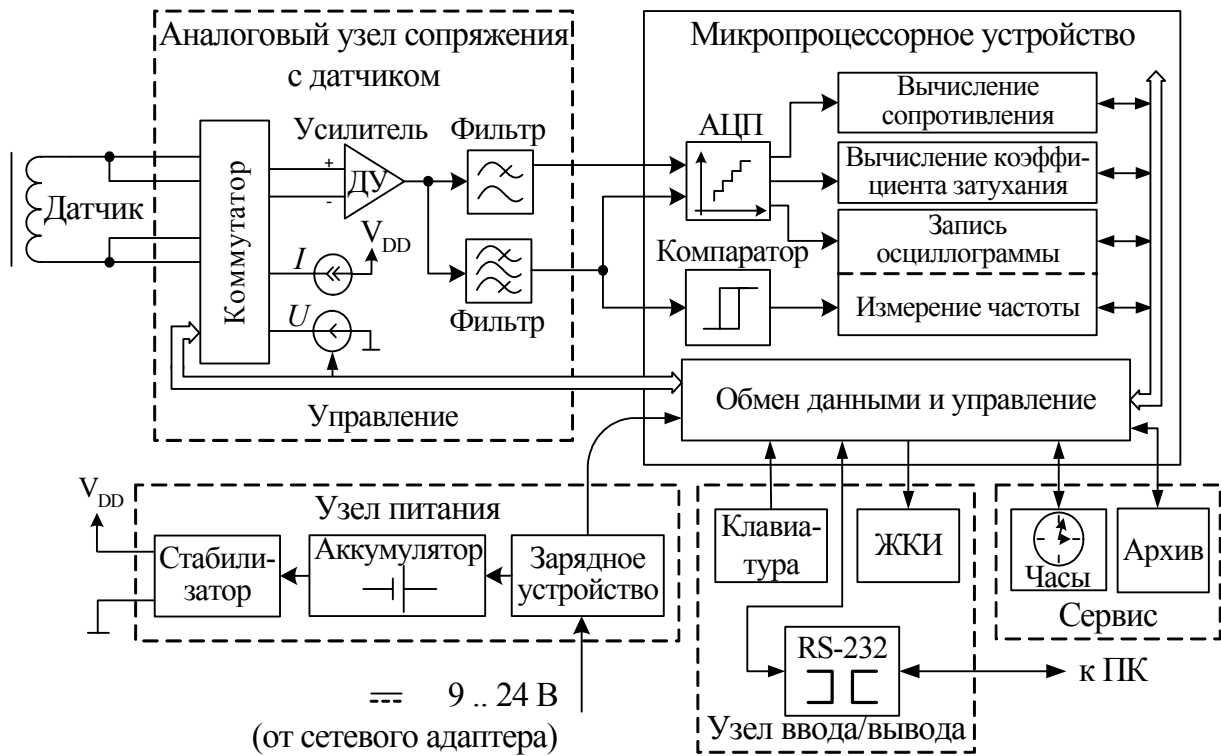
В заключительной части главы обобщены рекомендации по проектированию аппаратной части ВАСД. Рассмотрены каскады предварительного усиления и фильтрации, формирователь импульса возбуждения, источник опорного тока для измерения сопротивления. Отмечена возможность повышения качества преобразования при использовании операций автоматической и полуавтоматической калибровок измерительных каналов. Приведены требования к параметрам аналого-цифрового преобразования для каждого из каналов, рассмотрены варианты и приведены структуры цифровой части ВАСД, оптимальные с точки зрения распределения ресурсов ядра и периферийных компонентов современных микроконтроллерных устройств.

**В четвёртой главе** рассмотрены практические реализации систем, в процессе создания которых автором были выполнены описанные в предыдущих главах диссертационной работы обзоры, исследования и разработки. Глава посвящена рассмотрению двух систем и предварительных результатов их эксплуатации.

Во-первых, это система оперативного контроля деформаций плотины Бурейской ГЭС на базе разработанного при участии автора автономного вторичного преобразователя для струнных датчиков (ВПСД). Система предназначена для эксплуатации в качестве средства оперативного контроля деформаций плотин Бурейской и других ГЭС.

Инфраструктура подобных объектов на этапе строительства не позволяет осуществлять полностью автоматический сбор данных, поэтому система базируется на портативных приборах серии ВПСД и персональном или любом другом компьютере в качестве средства обработки и долговременного хранения полученной информации. Ниже приведены структурная схема ВПСД (рис. 5) и его основные характеристики:

- Диапазон измерения периода, мкс: 400.0 ... 2000.0
- Предел допустимой относительной погрешности измерения периода: 0.02 %
- Диапазон измерения сопротивления, Ом: 100.0 ... 1500.0
- Относительная погрешность измерения сопротивления:  $\pm 0.2$  %
- Диапазон измерения степени затухания за 0,1 с., дБ: 0 ... 60.0
- Амплитудная чувствительность: 1 мВ



**Рис. 5. Структурная схема ВПСД**

В приборе реализованы функции измерения периода/частоты, коэффициента затухания по СВЗ, а также активного сопротивления обмотки датчика. ВПСД допускает подключение одновременно до 128 датчиков при использовании соответствующих специализированных коммутаторов.

В настоящее время в эксплуатации находятся восемь приборов данной серии, что подтверждается актом внедрения.

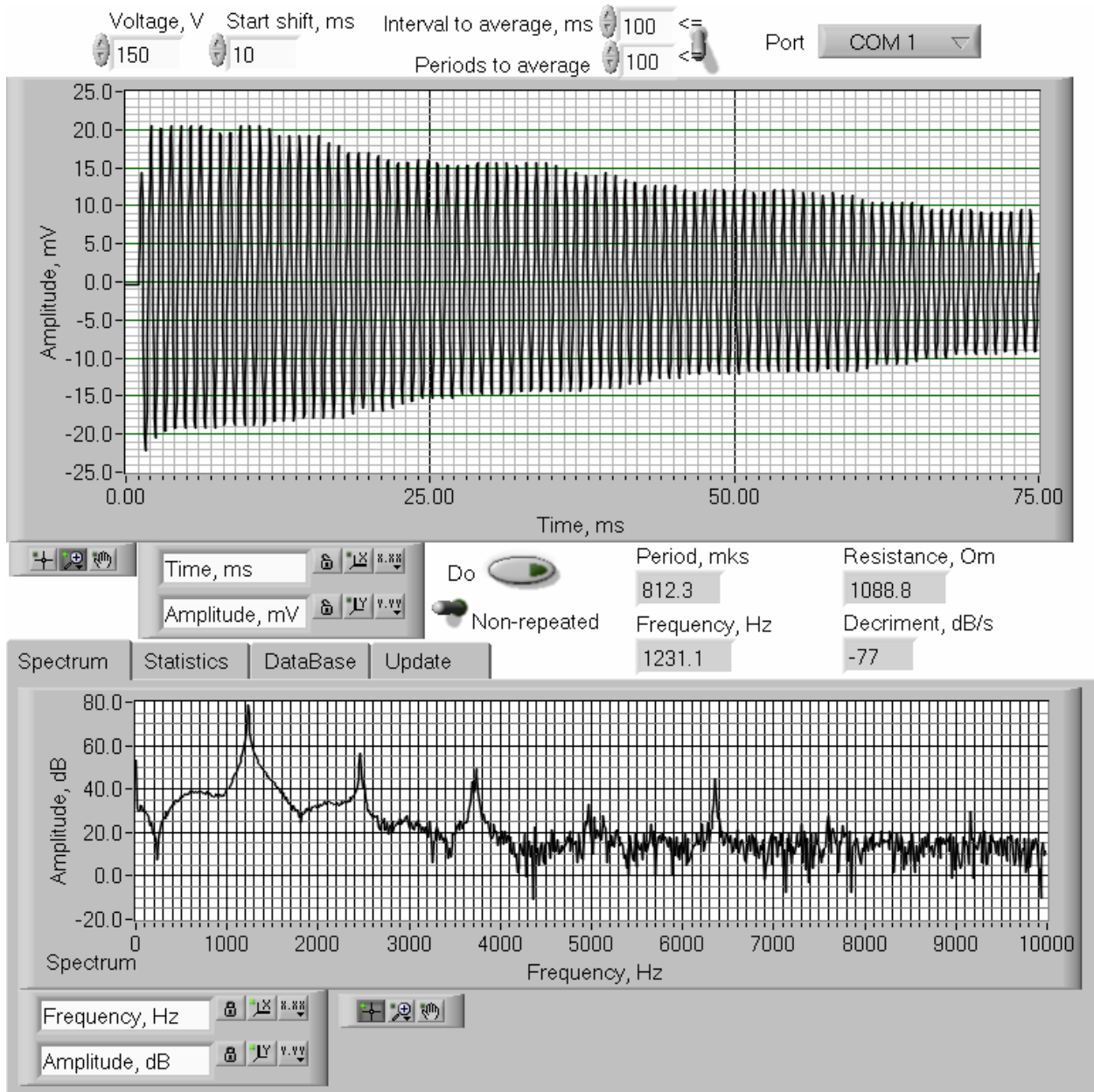
Опыт проектирования ВПСД получил дальнейшее развитие при реализации разработанной по заказу Петербургского Метрополитена автоматизированной распределённой системы оперативного контроля деформаций бетонной обделки тоннелей на участке “Размыва” Кировско-Выборгской линии.

Система использует 110 струнных датчиков в двух тоннелях на участке размыва длиной около 400 м. Данные автоматически собираются на диспетчерском пункте на станции “Пл. Мужества”.

Подключение датчиков осуществляется посредством многоканальных коммутаторов, управляемых автоматически по интерфейсу I<sup>2</sup>C. В качестве магистрального канала связи в системе применён интерфейс RS-485, что в целом обеспечило гибкие возможности для её расширения.



При подключении к компьютеру разработанные системы могут работать в штатном или расширенном режимах. Во втором случае в дополнение к функции дистанционного измерения параметров датчика, появляется возможность производить настройку процесса преобразования, а также по получаемым осциллограммам и спектрограммам отклика выполнять экспертную оценку состояния датчика, что иллюстрирует рис. 6.



**Рис. 6. Диаграммы и данные, представляемые измерительной системой в расширенном режиме работы**

## Основные результаты работы

1. На основании изучения функциональных особенностей струнных датчиков, анализа методов измерения частотно-временных параметров сигналов и обзора представленной на рынке вторичной аппаратуры для струнных датчиков определены направления совершенствования данной аппаратуры.
2. Разработан спектральный метод измерения частоты с использованием “оконной” интерполяции для сигналов струнных датчиков. Проведены модельные и физические исследования погрешности данного метода, подтверждающие его эффективность по сравнению с классическими счётно-импульсными методами.
3. Предложена методика оптимизации частотно-временных характеристик импульса возбуждения струнных датчиков с целью усиления основной и подавления кратных гармоник колебаний струны. Эффективность данной методики подтверждена результатами модельных исследований распределения амплитуд гармоник для разных типов воздействия.
4. Исследованы и модифицированы применительно к реальным сигналам струнных датчиков измерительные алгоритмы для оценки затухания колебаний струны.
5. На основании выполненных в диссертационной работе исследований методов измерения и проектирования вторичной аппаратуры для измерительных систем, использующих струнные датчики, были созданы и внедрены на Бурейской ГЭС и в Санкт-Петербургском Метрополитене промышленные образцы таких систем.

### **Публикации по теме диссертации:**

1. Клементьев А.В., Петров А.Ю., Дурчева В.Н., Загрядский И.И. Вторичный прибор для струнных датчиков // Датчики и системы. – 2004 – № 6 – С. 8-10.
2. Петров А.Ю., Ильяшев А.В. Повышение разрешающей способности дискретного преобразования Фурье для точного измерения частоты сигнала струнного датчика // VII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права»: сборник статей конференции. – 2004 – С. 205-210.
3. Петров А.Ю. Метод измерения частоты сигнала струнного датчика с помощью спектрального анализа // VII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права»: сборник статей конференции. – 2004 – С. 200-204.