

На правах рукописи

Цуриков Виталий Сергеевич

**Разработка алгоритмов обработки
измерительной информации в оптико-электронной
системе производственного контроля
физических параметров пьезоэлементов**

05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2007

Работа выполнена на кафедре информационных технологий
ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пронин Сергей Петрович
зав. кафедрой информационных технологий

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Тищенко Андрей Иванович
ГОУ ВПО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»

кандидат технических наук, доцент
Шатохин Александр Семенович
ГОУ ВПО «Алтайский государственный
университет»

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»,
г. Томск

Защита состоится 13 ноября 2007 г. в 10-00 часов на заседании регионального диссертационного совета КМ 212.004.01 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, Барнаул, пр. Ленина 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан 12 октября 2007 г.

Ученый секретарь регионального
диссертационного совета
кандидат экономических наук, доцент

А.Г. Блем

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день пьезоэлементы используются во многих областях науки и техники: промышленные и медицинские датчики, двигатели наноперемещений, биморфные зеркала, генераторы, линии задержки и т.д. Требования к качеству изготовления пьезоэлементов возрастают с каждым днём. Следовательно, возрастают требования и к качеству систем контроля физических параметров пьезоэлементов. Наиболее информативным параметром, используемым для контроля, является комплексный коэффициент передачи пьезоэлемента. Этот параметр представляет собой полную динамическую характеристику и устанавливает однозначную зависимость между электрическим сигналом, поданным на пьезоэлемент, и колебанием его поверхности. Поскольку амплитуда колебаний поверхности пьезоэлемента находится в микро- и нано-метровом диапазоне, определение его комплексного коэффициента передачи является нетривиальной задачей. Для регистрации столь малых перемещений перспективными являются оптико-электронные системы. Среди них особенно выделяются триангуляционные оптико-электронные системы, однако влияние различных факторов, таких как вибрация, фоновая засветка, электрические наводки и т.д., снижает точность измерений. Это влияние может быть уменьшено конструктивно за счет, например, многоуровневой сейсмоизоляции, оптической изоляции, экранировки, однако этих мер недостаточно. Дальнейшее увеличение качества контроля возможно только алгоритмически. Следовательно, разработка и внедрение новых алгоритмов, предназначенных для оптимизации и повышения точности процесса обработки первичной измерительной информации с фотоэлектрических устройств, является актуальной задачей в повышении качества оптико-электронных систем контроля.

Цель работы. Создание эффективных алгоритмов обработки измерительной информации для повышения качества автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов в режиме реального времени и разработка на их основе специализированного программного обеспечения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие исследовательские задачи.

1. Анализ общих принципов построения алгоритмов, предназначенных для обработки измерительной информации в триангуляционной оптико-электронной системе автоматизированного контроля физических параметров пьезоэлементов и факторов, влияющих на точность контроля.

2. Разработка и анализ алгоритмов повышения точности автоматизированной системы контроля физических параметров пьезоэлементов.

3. Разработка и анализ модели измерительного процесса с учетом предложенных алгоритмов и факторов, влияющих на точность контроля.

4. Создание специализированного программного обеспечения для обработки измерительной информации в автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системе производственного контроля физических параметров пьезоэлементов.

Объект исследования. Процесс формирования и трансформации измерительной информации в автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системе производственного контроля физических параметров пьезоэлементов.

Теоретическая и методологическая база исследования. Для решения поставленных задач при выполнении работы использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Экспериментальные исследования проводились с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса. Для обработки результатов экспериментов применялись методы цифровой обработки сигналов. При исследовании процессов, происходящих в измерительной системе, были использованы математическое и компьютерное моделирование, методы математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработан алгоритм первичной обработки измерительной информации для триангуляционной оптико-электронной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов, основанный на использовании полиномиальной интерполяции, позволяющий повысить точность измерений при минимальных вычислительных затратах.

2. Разработан алгоритм восстановления фазо-частотной характеристики пьезоэлемента при наличии разрывов в сигнале на основе набора дискретных резонаторов второго порядка.

3. Разработан корреляционный критерий сходимости RLS и LMS алгоритмов адаптивной фильтрации, позволяющий определить их применимость в оптико-электронной системе контроля физических параметров пьезоэлементов.

4. Разработана и исследована компьютерная модель процесса формирования и трансформации измерительной информации в триангуляционной оптико-электронной системе, позволяющая выявить взаимосвязь параметров сигнала фотоприемного устройства с положением поверхности пьезоэлемента с учетом влияющих факторов.

Практическая и теоретическая значимость. Разработанные алгоритмы позволяют повысить качество триангуляционной оптико-электронной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов. Алгоритм полиномиальной аппроксимации первичной измерительной информации, получаемой с оптико-электронного преобразователя, обеспечивает повышение точности измерений. Алгоритм обработки измерительной ин-

формации, построенный на базе дискретных резонаторов второго порядка, позволяет корректно восстанавливать фазо-частотную характеристику пьезоэлемента при наличии разрывов в сигнале. Разработанный корреляционный критерий позволяет оценивать применимость алгоритмов адаптивной фильтрации LMS и RLS для обработки измерительной информации. Разработанная компьютерная модель процесса формирования и трансформации измерительной информации в триангуляционной оптико-электронной системе контроля физических параметров пьезоэлементов позволяет исследовать влияние различных факторов на результат работы системы. В качестве влияющих факторов выступают: шум, нелинейность, разрывы в сигнале и квантование. Разработанное программное обеспечение позволяет производить контроль физических параметров пьезоэлементов и классифицировать анализируемые изделия в соответствии с предложенными критериями оценки качества. Разработанные алгоритмы обработки измерительной информации повышают точность определения спектральных характеристик сигнала и могут быть использованы в научных и производственных целях в составе автоматизированных компьютерных систем контроля и управления самого различного назначения.

Выносимые на защиту результаты работы:

1. Алгоритм повышения точности преобразования колебаний поверхности пьезоэлемента в цифровой сигнал с использованием полиномиальной интерполяции.
2. Алгоритм восстановления фазо-частотной характеристики пьезоэлемента на основе набора дискретных резонаторов второго порядка.
3. Алгоритм компенсации влияния электрических помех и фоновой засветки с использованием адаптивной фильтрации и корреляционный критерий его применимости.
4. Компьютерная модель процесса формирования и трансформации измерительной информации.
5. Специализированное программное обеспечение для автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов.

Достоверность исследований. Все полученные в ходе работы выводы и результаты доказаны теоретически, проверены экспериментально, подтверждены опытом практической эксплуатации.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на Международных научно-технических конференциях «Виртуальные и интеллектуальные системы ВИС-2006», «Измерения, контроль, информатизация ИКИ-2007», на научно-технических семинарах кафедры «Автоматика и вычислительные системы» и кафедры «Информационные технологии» в АлтГТУ.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в проектно-конструкторской деятельности на предприятиях «Сибпромприбор-Аналит» и «НТП Специальная электроника» при разработке приборов на основе пьезоэлементов в виде методических рекомендаций и программного обеспечения, предназначенного для контроля качества пьезоэлементов. Использование указанных результатов позволяет: повысить качество проектирования и эффективность разрабатываемых приборов на основе пьезоэлементов; сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний.

Публикации. По результатам диссертационной работы имеется 10 работ, в том числе 7 статей, из них одна статья в ведущем рецензируемом научном журнале, рекомендованном ВАК, 3 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Автором выполнена разработка алгоритмов обработки измерительной информации в автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системе производственного контроля физических параметров пьезоэлементов. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана компьютерная модель процесса формирования и трансформации измерительной информации. Получены все теоретические и экспериментальные результаты, изложенные в диссертационной работе, разработано программное обеспечение.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами и заключения, 3 приложений. Содержание изложено на 122 страницах, иллюстрировано 52 рисунками, 2 таблицами. Список литературы включает 88 наименований.

Содержание работы

Во введении к диссертации обоснована ее актуальность, сформулированы цели, задачи и методы исследований, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы, отражены вопросы апробации и реализации полученных научных результатов. Приводится краткое содержание каждой из глав.

В первой главе «Аналитический обзор методов, средств и алгоритмов получения и обработки измерительной информации в автоматизированных оптико-электронных системах контроля физических параметров пьезоэлементов» приведен аналитический обзор параметров, используемых для контроля качества пьезоэлементов, способов их определения и факторов, снижающих точность

контроля. Рассмотрены методы и алгоритмы уменьшения влияния этих факторов.

В качестве основного контролируемого физического параметра пьезоэлемента принят комплексный коэффициент передачи пьезоэлемента (ККПП), как наиболее информативный и дающий однозначное представление о качестве изделия. Комплексный коэффициент передачи пьезоэлемента может быть найден

как: $G(\omega) = \frac{H(\omega)}{U(\omega)}$, где $H(\omega)$ – спектральная функция колебаний пьезоэлемента;

$U(\omega)$ – спектральная функция напряжения поданного на пьезоэлемент. Установлено, что для измерения этого параметра перспективным является триангуляционный оптический метод с использованием одного интегрального фотоприемного устройства (рисунок 1).

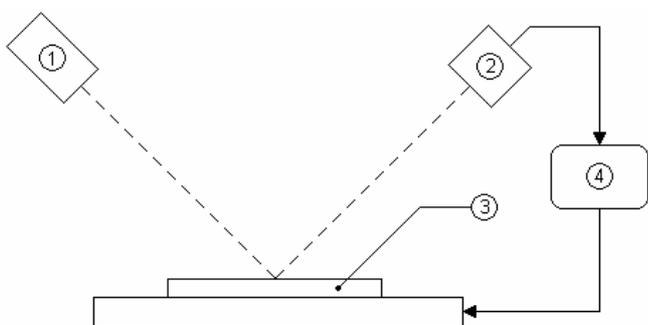


Рисунок 1 – Структурная схема триангуляционной оптико-электронной системы на основе одного интегрального фотоприемного устройства

На рисунке 1 изображены: 1 – лазер; 2 – фотоприёмное устройство (ФПУ); 3 – пьезоэлемент с зеркальной поверхностью; 4 – измерительный блок, включающий ЭВМ. Выявлено, что при малых перемещениях поверхности пьезоэлемента, первичных мер устранения помех, таких как: сейсмоизоляция, оптическая изоляция, экранировка и т.д., недостаточно. Дальнейшее повышение качества оптико-электронной системы контроля возможно только алгоритмически. Установлено, что остаточное суммарное влияние помех имеет гауссово распределение, что позволяет применять для обработки измерительной информации алгоритмы, основанные на усреднении, фильтрации, адаптивной обработке данных. Сформулированы задачи диссертационного исследования перечисленные на стр. 3.

Во второй главе «Разработка и анализ алгоритмов обработки измерительной информации для повышения качества автоматизированной триангуляционной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов» выполнен анализ алгоритмов на основе дискретного преобразования Фурье и набора дискретных резонаторов второго порядка. Предложен алгоритм использования адаптивного фильтра для первичной обработки измерительной информации. Произведен анализ процесса измерения разности фаз сигналов и

разработан алгоритм восстановления фазо-частотной характеристики пьезоэлемента.

По структурной схеме (рисунок 1) разработана функциональная схема измерительной установки, представленная на рисунке 2. На рисунке отражены следующие характеристики: $S_{\text{вых1}}(\omega)$ – спектр сигнала на выходе ЦАП1; $S_{\text{ex1}}(\omega)$, $S_{\text{ex2}}(\omega)$ – спектры сигналов на входе АЦП1 и АЦП2; $\Phi_{\text{вых1}}(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фильтра на выходе ЦАП1; $\Phi_{\text{ex1}}(\omega)$, $\Phi_{\text{ex2}}(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи фильтров на входе АЦП1 и АЦП2; $G(\omega)$ – ККПП; $O(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи оптико-электронного преобразователя.

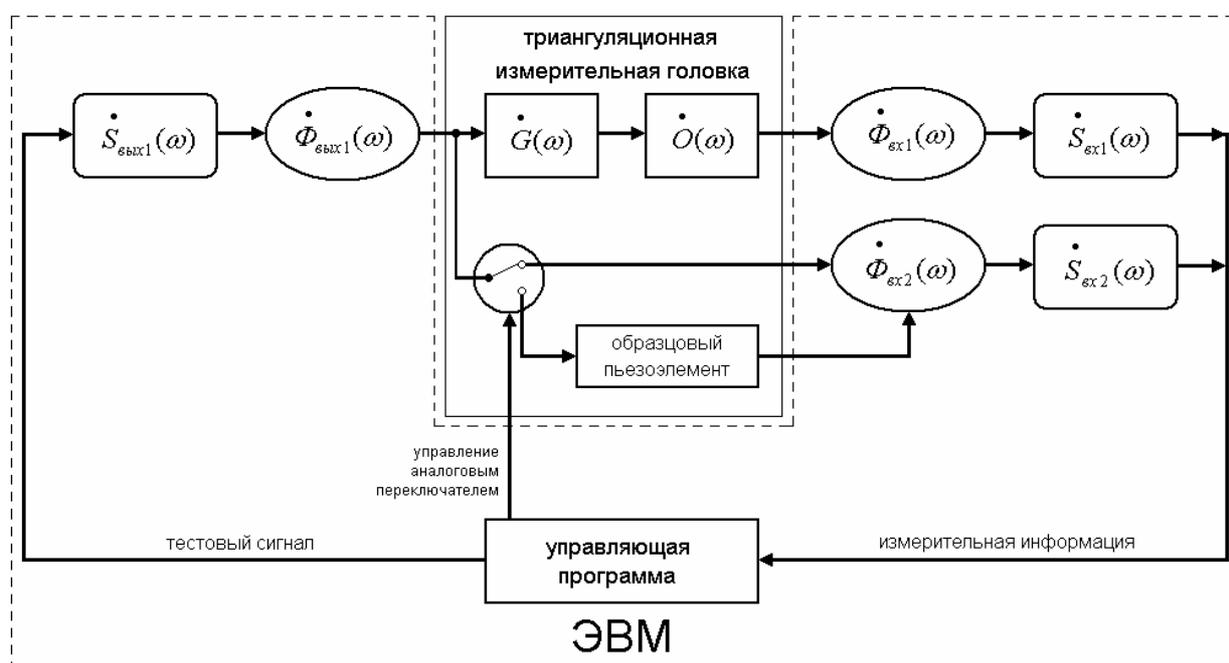


Рисунок 2 – Функциональная схема оптико-электронной системы

Такая система удобна при использовании АЦП с фильтром на входе и ЦАП с фильтром на выходе. Два идентичных канала позволяют избежать дополнительных вычислений за счет компенсации характеристик АЦП, ЦАП и соответствующих фильтров. Также следует отметить, что в тракт образцового канала при помощи управляемого аналогового ключа может быть подключен образцовый пьезоэлемент. В этом случае появляется возможность напрямую оценить степень отклонения параметров исследуемого пьезоэлемента от эталонных. Согласно рисунку 2 вычисление ККПП выглядит следующим образом:

$$G(\omega) = \frac{S_{\text{ex1}}(\omega)}{S_{\text{ex2}}(\omega) \cdot O(\omega)}. \quad (1)$$

Оптическая составляющая $O(\omega)$ в формуле (1) характеризует инертность оптико-электронного преобразователя. На интересующем нас диапазоне частот $O(\omega) \approx 1$, следовательно:

$$G(\omega) = \frac{S_{\text{ex1}}(\omega)}{S_{\text{ex2}}(\omega)}. \quad (2)$$

Формула (2) является базовой формулой для вычисления ККПП с использованием предложенной измерительной системы.

На рисунке 3 приведена структурная схема разработанного алгоритма вычисления ККПП с использованием формулы (2).

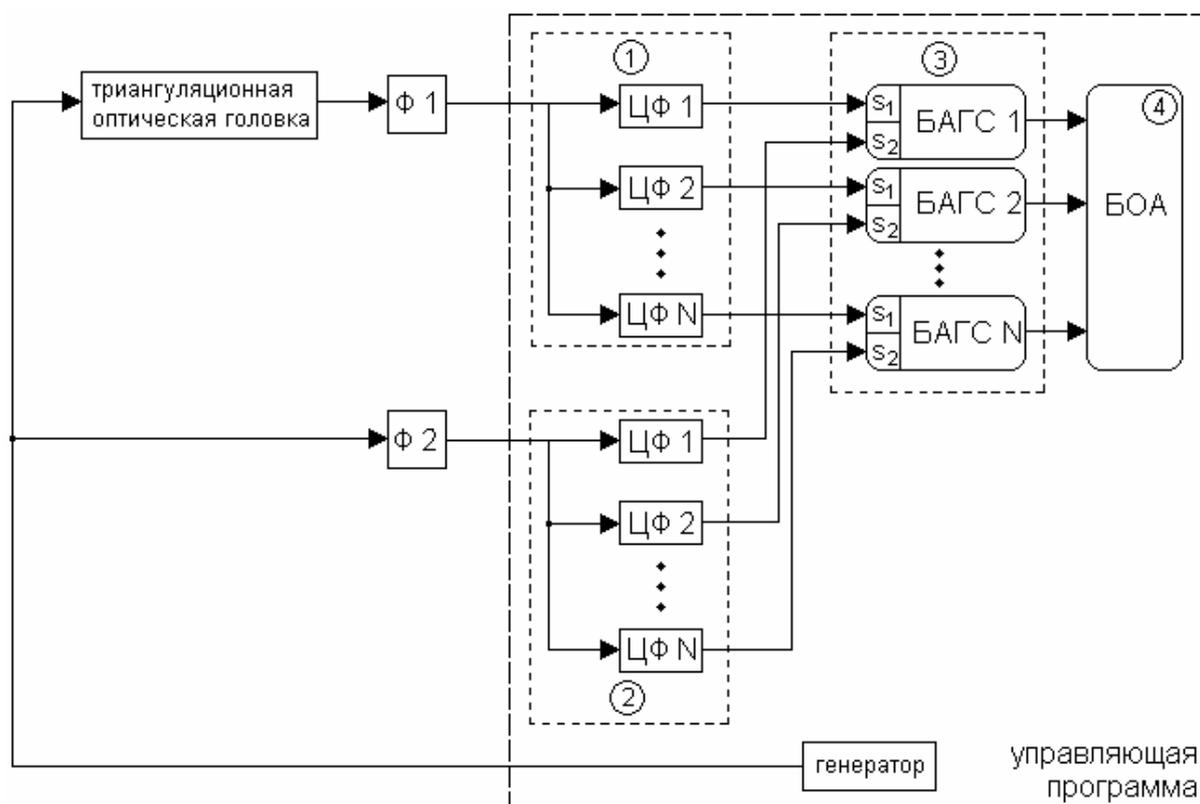


Рисунок 3 – Структурная схема алгоритма определения ККПП с использованием набора дискретных резонаторов второго порядка

На рисунке 3 показаны: $\Phi 1$ и $\Phi 2$ – идентичный входные фильтры АЦП; блоки 1 и 2 – идентичные наборы цифровых фильтров (ДРВП) настроенных каждый на определенную частоту; 3 – набор блоков анализа гармонических составляющих (БАГС); 4 – блок окончательного анализа (БОА).

В каждом из набора (БАГС) вычисляется амплитудная и фазовая составляющие для частоты выделяемой связанным с ним ЦФ. Функциональная схема БАГС приведена на рисунке 4. В блоке (БОА) по формуле (3) вычисляется искомый ККПП.

$$G(\omega) = A(\omega) \cdot \cos \varphi'(\omega) + jA(\omega) \cdot \sin \varphi'(\omega), \quad (3)$$

где $\varphi'(\omega) = \text{unwrap}(\varphi(\omega))$

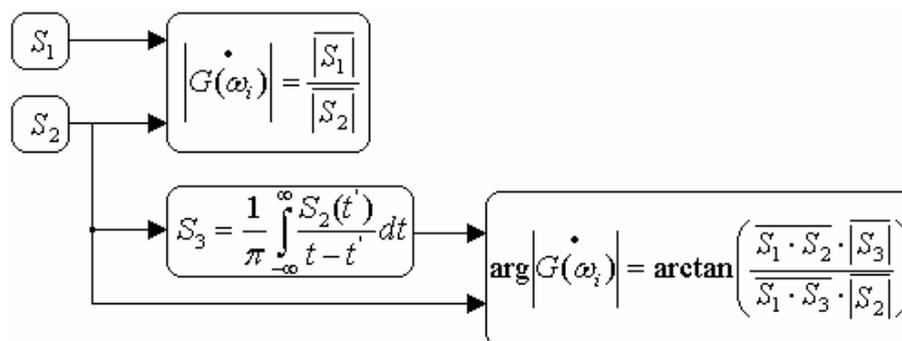


Рисунок 4 – Функциональная схема блока анализа гармонических составляющих

Анализ показал, что в сравнении с традиционно используемым для определения спектра дискретным преобразованием Фурье, разработанный алгоритм при тех же вычислительных затратах позволяет повысить точность определения ККПП в области резонансных частот. Недостатком ДРВП является обратная зависимость между шириной полосы пропускания фильтра и временем установления сигнала, что заставляет искать разумный компромисс между качеством фильтрации и временем ее выполнения (рисунок 5).

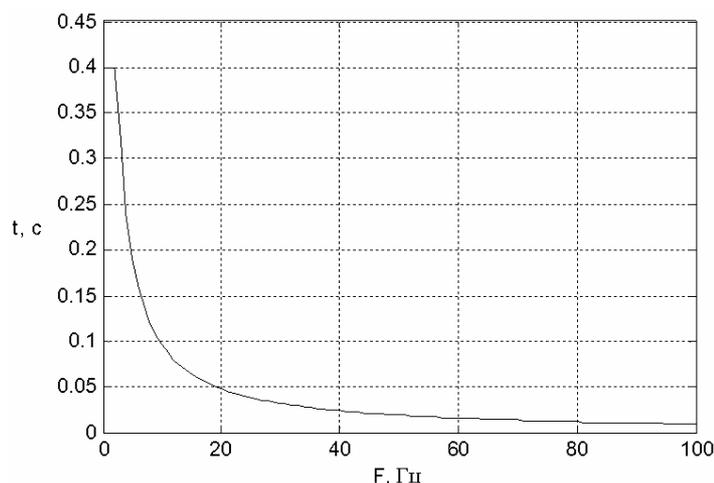


Рисунок 5 – Зависимость времени установления от ширины полосы пропускания фильтра

При достижении определенного порога соотношения сигнал/шум обработка измерительной информации в режиме реального времени становится невозможной, так как применение ДПФ не дает приемлемого качества обработки информации, а применение набора ДРВП необходимой производительности. В такой ситуации для дальнейшей обработки данных вышеуказанными алгоритмами необходима предварительная высокопроизводительная обработка измерительной информации с целью выделения полезной составляющей сигнала на фоне помех. На рисунке 6 изображена схема измерительной системы с исполь-

зованием адаптивной фильтрации. Для применения алгоритмов адаптивной фильтрации необходима модернизация измерительного оптического канала в соответствии с рисунком.

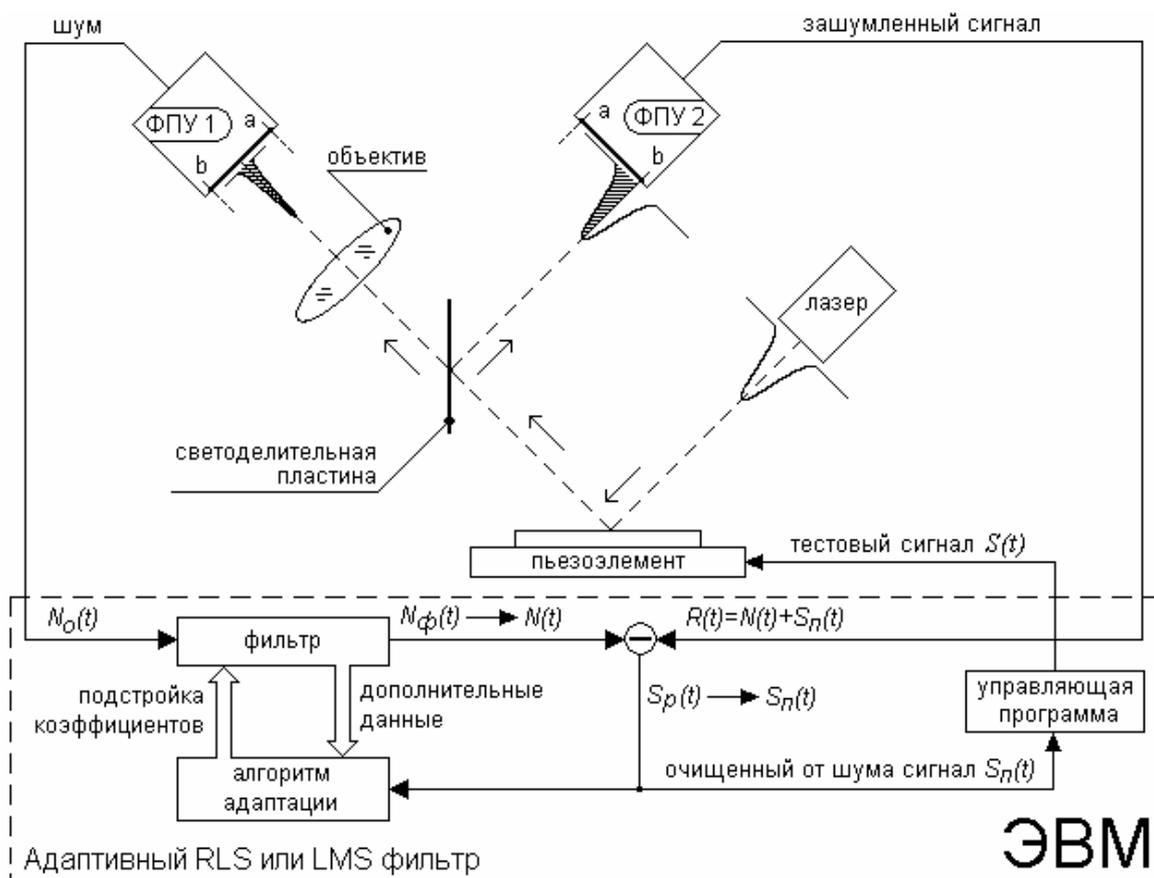


Рисунок 6 – Схема измерительной системы с использованием адаптивной фильтрации

Оптический сигнал при помощи светоделительной пластины делится на две составляющие. Первая попадает через объектив на фотоприемное устройство ФПУ1, размеры окна которого позволяют регистрировать весь отраженный от пьезоэлемента поток излучения, включая его колебания. Вторая часть оптического сигнала попадает на фотоприемное устройство ФПУ2, окно которого имеет оптимальные геометрические размеры для выделения переменной составляющей излучения. Таким образом на выходе ФПУ1 присутствует только шумовая составляющая сигнала (оценка шума) $N_o(t)$, в то время как на выходе ФПУ2 будет присутствовать шум совместно с полезным сигналом $R(t)$. Шумовая составляющая сигнала $N(t)$ и оценка шума $N_o(t)$ коррелированы, так как электрическая наводка и шумы оказывают одинаковое воздействие на оба канала. Различие между $N_o(t)$ и $N(t)$ обусловлено только неодинаковостью реакции фотодиодов на помехи и разбросом номиналов элементов электрических схем ФПУ1 и ФПУ2. Оценка шума $N_o(t)$ используется как входной сигнал адаптивного фильтра. Зашумленный сигнал $R(t)$ играет роль образцового сигнала. Поскольку в процессе фильтрации коэффициенты фильтра будут подстраиваться

таким образом, чтобы фильтрованная оценка шума $N_{\phi}(t)$ максимально близко повторяла сигнал помехи $N(t)$, то сигнал ошибки $S_p(t)$ будет приближаться к искомому полезному сигналу $S_{\Pi}(t)$.

Анализ показал, что в результате применения адаптивной фильтрации качество исследуемой системы возрастает. Даже в случае многократного превышения уровня шума в исследуемом сигнале качество и скорость фильтрации превышает те же показатели при использовании линейных алгоритмов обработки измерительной информации. Недостатком использования адаптивных фильтров является необходимость получения оценки шума, что заставляет модернизировать и усложнять систему контроля.

В третьей главе «Разработка и анализ модели измерительного процесса» разработан ряд компьютерных моделей измерительного процесса в триангуляционной оптико-электронной системе контроля физических параметров пьезоэлементов с учетом предложенных алгоритмов и влияющих факторов. Первая часть третьей главы посвящена исследованию и моделированию влияния соотношения геометрических размеров окна фотоприемного устройства и пространственного распределения интенсивности лазерного луча на выходной сигнал триангуляционной измерительной головки. Во второй части моделируется влияние различных факторов на процесс трансформации измерительной информации. В качестве факторов выступают: электрические наводки, шумы, эффекты нелинейности и квантования, разрывы в сигнале. Произведено сравнение разработанных алгоритмов с алгоритмами, основанными на дискретном преобразовании Фурье. Третья часть посвящена моделированию процесса фильтрации сигнала от шума с применением адаптивных алгоритмов RLS и LMS.

Функциональная схема исследуемой системы приведена на рисунке 7.

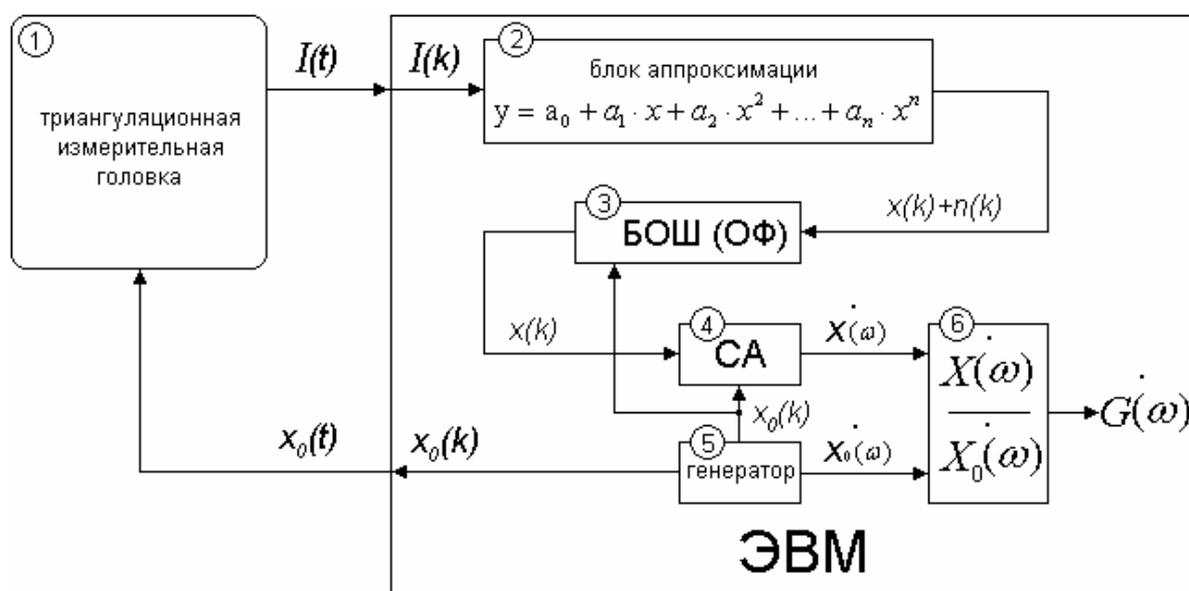


Рисунок 7 – Функциональная схема исследуемой системы

Функциональная схема включает следующие блоки: 1 – триангуляционная измерительная головка; 2 – блок аппроксимации входного дискретного сигнала $I(k)$ полиномом степени n ; 3 – блок очистки от шума (оптимальной фильтрации БОШ (ОФ)); 4 – спектральный анализатор (СА); 5 – генератор полигармонического тестового сигнала вида: $S(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$; 6 – блок вычисления ККПП $G(\omega)$.

Разработана математическая модель блока 2 функциональной схемы (рисунок 7). Сигнал на выходе ФПУ описывается математическим выражением:

$$I = \int_a^b \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}} + k \cdot n(x) \right) dx, \quad (4)$$

где σ – пространственный размер лазерного луча по уровню 0,606 от максимальной интенсивности; x – пространственная координата; m – центр лазерного луча; k – амплитуда шума (коэффициент шума обратный соотношению сигнал/шум); пределы интегрирования a и b представляют собой физические размеры окна ФПУ по оси x ; $n(x)$ – гауссова функция шума.

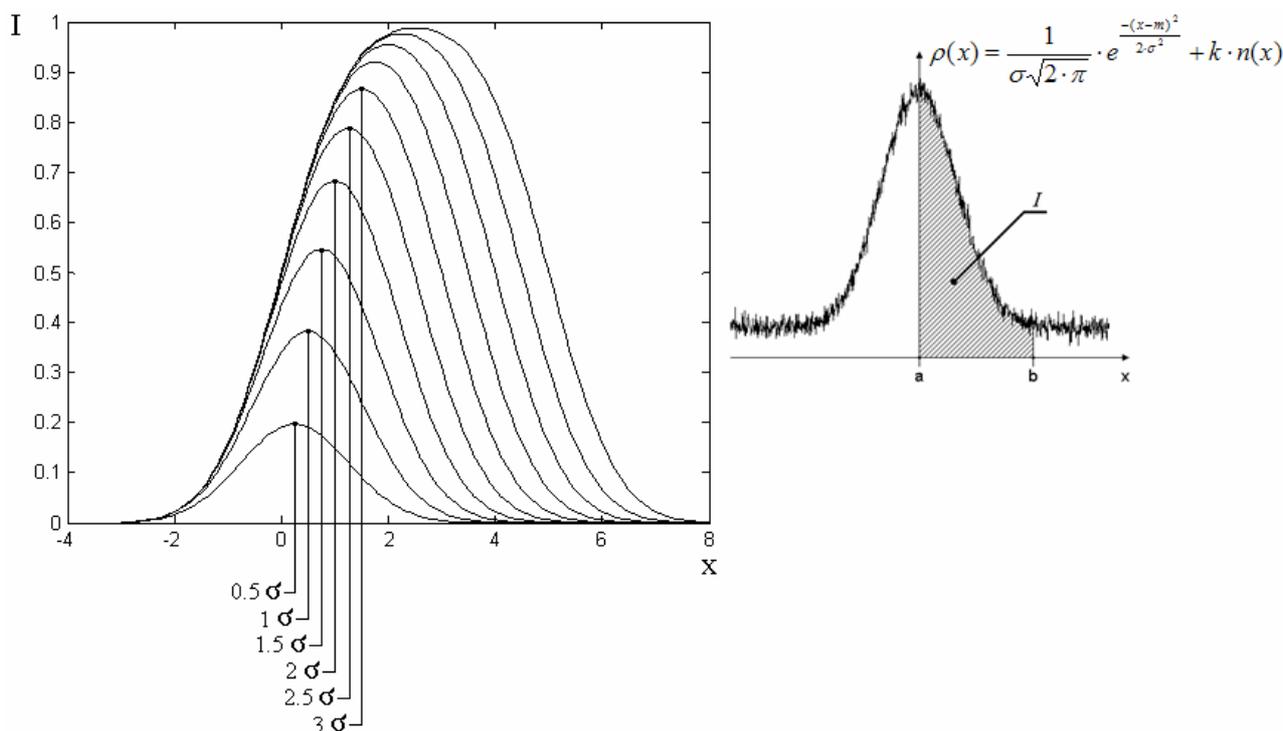


Рисунок 8 – Серия зависимостей интенсивности излучения (I) от перемещения (x)

По формуле (4) построены зависимости изображенные на рисунке 8. Видно, что при увеличении размеров окна ФПУ расширяется диапазон регистрируемых колебаний, лежащий от нуля до точки перегиба. Точка перегиба является ограничением диапазона измерений, так как правее точки перегиба зависимость выходной координаты x от I носит неоднозначный характер. Для значения $0,5\sigma$

значение x равно $0,1$, следовательно, диапазон регистрируемых колебаний составит $\pm 0,1\sigma$. В то время как для 3σ уже $\pm 1,5\sigma$. Если ограничиться использованием линейного участка этого графика, необходимо сузить рабочий диапазон (пределы колебаний). Помимо этого видно, что чувствительность также зависит от размеров окна ФПУ, хотя выше значения 3σ существенного изменения чувствительности не происходит.

Разработаны таблицы ошибок преобразования искомого колебания поверхности пьезоэлемента в цифровой сигнал. Каждая таблица рассчитана для фиксированного значения погрешности начальной установки окна фотоприемного устройства. В качестве примера приведена таблица 1.

Таблица 1 – $\Delta x = \pm 0,5\sigma$

b-a	n	1	2	3	4	5
0,5		69,618	71,970	70,606	62,558	58,153
1		30,295	18,111	11,983	8,495	6,202
1,5		14,792	6,051	2,128	0,962	0,509
2		7,241	2,817	0,546	0,226	0,069
2,5		3,534	1,758	0,182	0,078	0,014
3		1,936	1,373	0,077	0,042	0,004
3,5		1,380	1,237	0,041	0,032	0,001

В зависимости от технического задания, руководствуясь полученными табличными соотношениями, можно определить степень полинома и геометрические размеры окна фотоприемного устройства в зависимости от величины допускаемой погрешности. Например, при погрешности позиционирования окна ФПУ в 1 мм, достаточно использовать полином 3 степени. Погрешность аппроксимации, при размерах окна 3σ , в этом случае не превысит $\approx 0,08\%$.

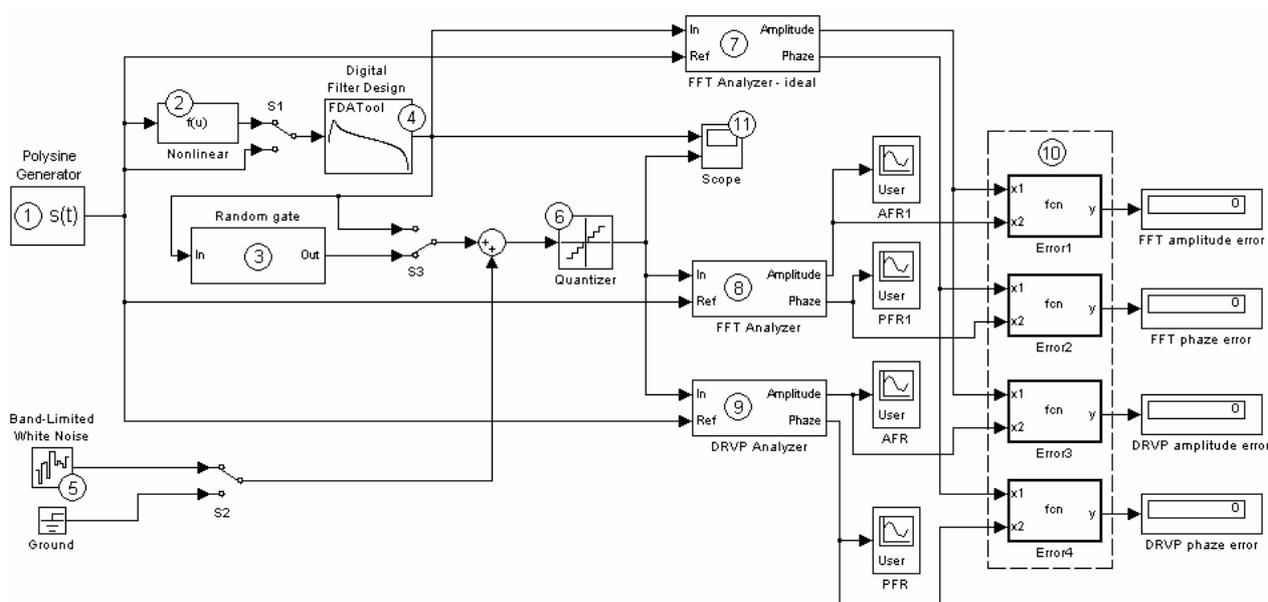


Рисунок 9 – Структурная схема модели измерительного процесса

Разработана модель измерительного процесса в автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системе контроля физических параметров пьезоэлементов с учетом влияющих факторов (рисунок 9). Модель состоит из следующих блоков: 1 – блок генерации полигармонического сигнала:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i);$$

2 – блок нелинейности вида: $y(x) = \operatorname{tg}\left(\frac{\operatorname{tg}(x/10) \cdot 7}{10} \cdot 50\right)$;

3 – блок имитации разрывов в сигнале; 4 – резонансный фильтр имитирующий пьезоэлемент; 5 – блок генерации гауссова шума; 6 – блок имитации эффекта квантования; 7 – блок формирования искомого АЧХ, ФЧХ (идентичен блоку (8)); 8 – блок Фурье анализа; 9 – блок анализа с применением набора ДРВП;

10 – блок сравнения полученных результатов с искомыми: $y(x_1, x_2) = \sqrt{\frac{\sum (x_1 - x_2)^2}{N}}$;

11 – осциллограф.

Результаты сравнения разработанных алгоритмов с алгоритмами, основанными на дискретном преобразовании Фурье, приведены на рисунке 10.

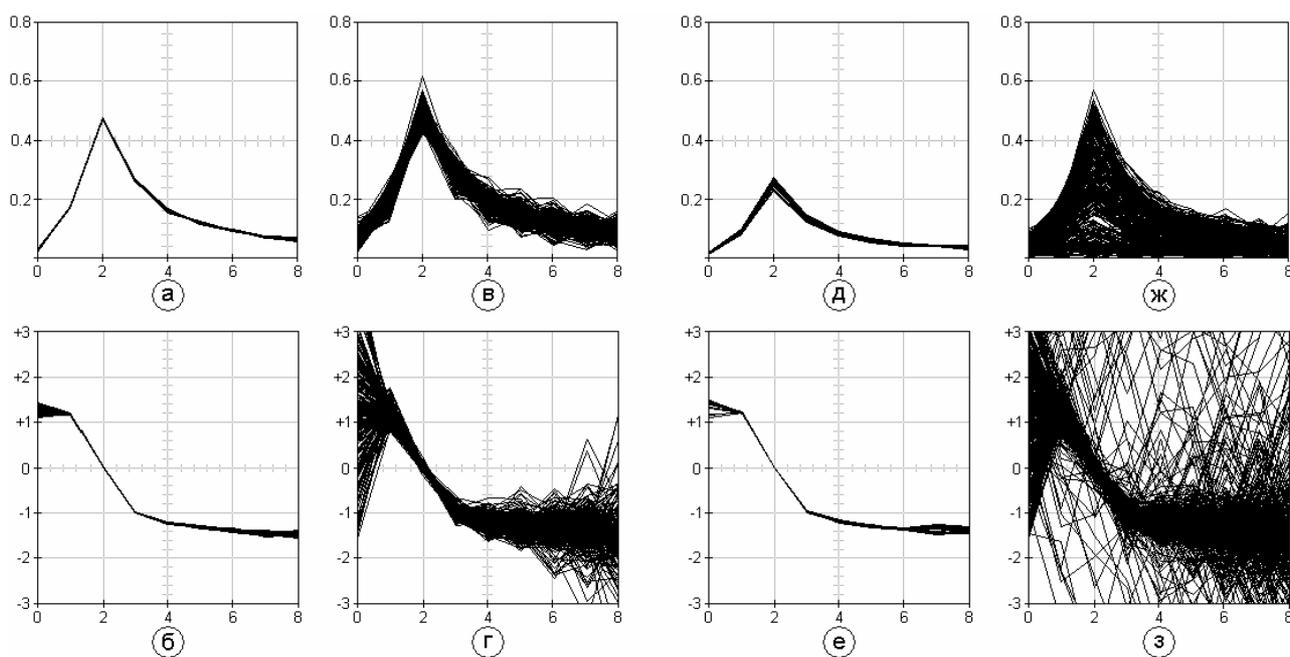


Рисунок 10 – Результаты моделирования: а,б,в,г – без разрывов в сигнале; д,е,ж,з – с разрывами в сигнале

Оба алгоритма способны корректно восстановить АЧХ сигнала даже при низком соотношении сигнал/шум (рисунок 10.а,в,д,ж). Следует отметить, что в случае применения ДПФ, необходимы также дополнительные операции многократного усреднения результатов, в то время как разброс показаний с применением ДРВП минимален. Из результатов восстановления ФЧХ видно, что с применением набора ДРВП и разработанного алгоритма восстановления ФЧХ удалось корректно определить фазовую составляющую сигнала (рисунок 10.б), в

то время как применение ДПФ позволило корректно восстановить фазу сигнала только в области максимальной амплитуды (рисунок 10.2). Очевидно, что при ослаблении сигнала даже многократное усреднение данных не позволит правильно определить фазовую составляющую. Обычно при построении моделей измерительных систем или систем контроля принимают условие непрерывности исследуемой величины. На практике же это условие часто не выполняется. Разрывы в сигналах происходят в силу особенностей измерительных систем либо несовершенства реальных аппаратных блоков. Этот факт неизбежно сказывается на качестве работы алгоритмов в таких системах, а, следовательно, и на качестве самих систем. Для исследования работы предложенных алгоритмов вычисления ККПП при наличии разрывов в сигнале в модель введен соответствующий блок (3). При включенном блоке имитации разрывов в сигнале с задачей восстановления ФЧХ справился только алгоритм с применением набора ДРВП (рисунок 10.е). Усреднение результатов ДПФ, в данном случае, не имеет смысла (рисунок 10.з).

На рисунке 11 приведена модель процесса фильтрации сигнала от шума с применением адаптивных алгоритмов RLS и LMS.

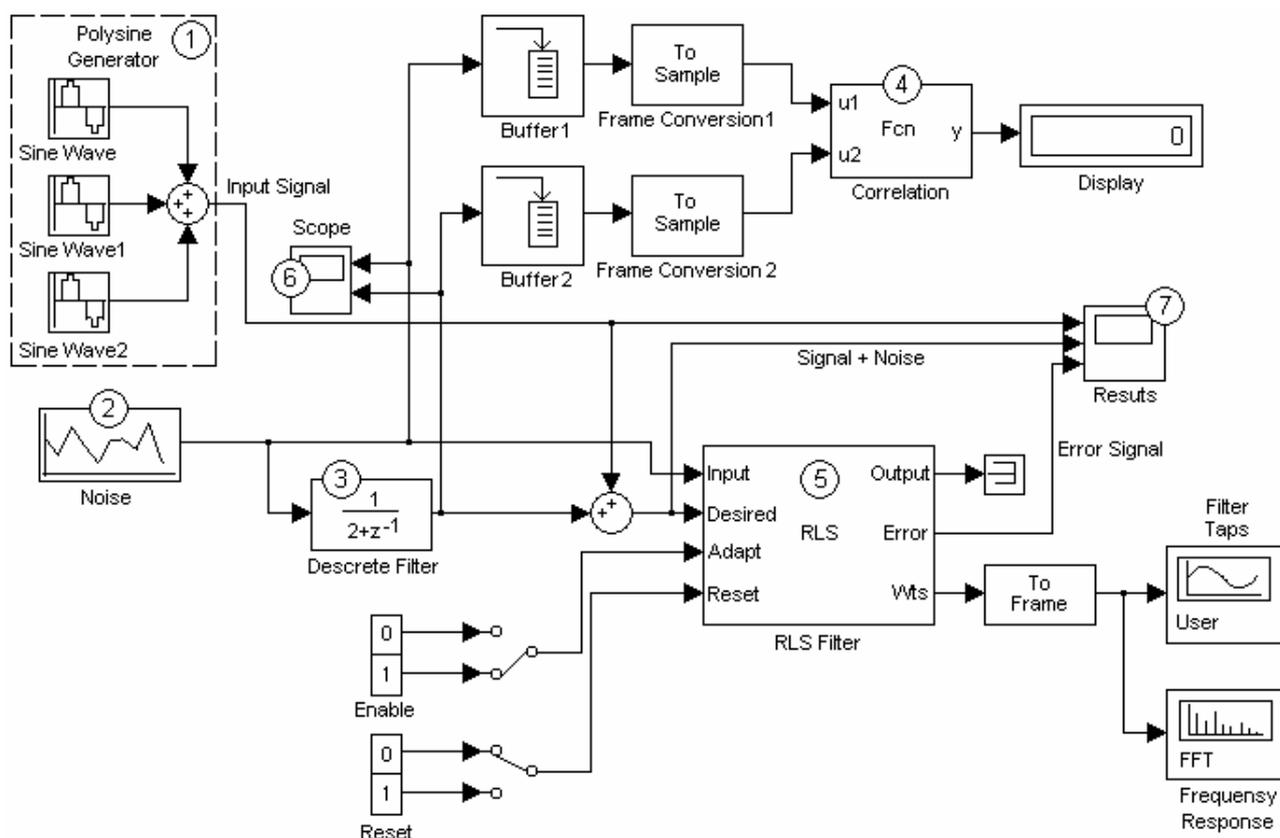


Рисунок 11 – Структурная схема модели измерительного процесса с использованием адаптивного LMS или RLS фильтра

Модель состоит из следующих блоков: 1 – блок генерации полигармонического сигнала $S(t)$; 2 – источник шума (белый гауссов шум); 3 – дискретный фильтр второго порядка (формирует отличие оценки шума от шума в сигнале); 4 – блок вычисления коэффициента корреляции по формуле: $\rho = \frac{\text{cov}(x_1, x_2)}{\sigma_{x_1} \cdot \sigma_{x_2}}$; 5 – адаптивный LMS или RLS фильтр; 6 – осциллограф; 7 – монитор итоговых результатов.

Для подбора коэффициентов фильтру при различных условиях требуется в среднем 150 отсчетов сигнала. В случае применения тест-сигнала с бесконечным спектром качество фильтрации снижается. Следовательно, для большей стабильности коэффициентов фильтра рекомендуется применять полигармонические сигналы с конечным спектром. Рисунок 12 отражает зависимость между коэффициентом корреляции и суммой квадратов отклонений сигнала, полученного в результате фильтрации, от искомого полезного сигнала для трех значений размера адаптивного фильтра: 32, 64 и 128. Выяснено, что для качественной фильтрации RLS фильтром необходимо, чтобы коэффициент корреляции между оценкой шума и шумовой составляющей сигнала составлял не менее 0,71 при размере фильтра – 128 (рисунок 12.а). Алгоритм LMS не дает преимуществ перед другими алгоритмами и, следовательно, не может быть рекомендован к использованию (рисунок 12.б). Результат фильтрации набором ДРВП обозначен пунктирной линией, параллельной оси абсцисс (ширина полосы пропускания фильтров – 100 Гц, спад вне полосы пропускания – 10 дБ).

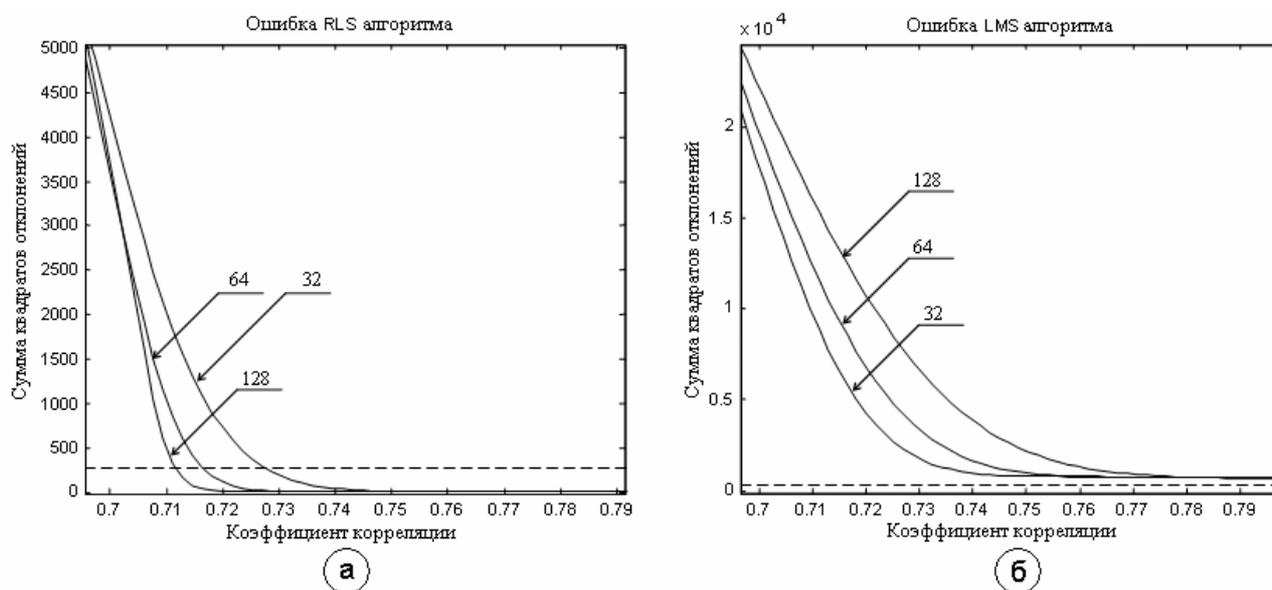


Рисунок 12 – Зависимость ошибки адаптивного алгоритма от коэффициента корреляции: а – RLS алгоритм; б – LMS алгоритм

На рисунке 13 приведены результаты экспериментальной проверки триангуляционной оптико-электронной системы контроля физических параметров

пьезоэлементов с применением адаптивной фильтрации. На практике оптико-электронная система позволяет получить коэффициент корреляции $\approx 0,9$.

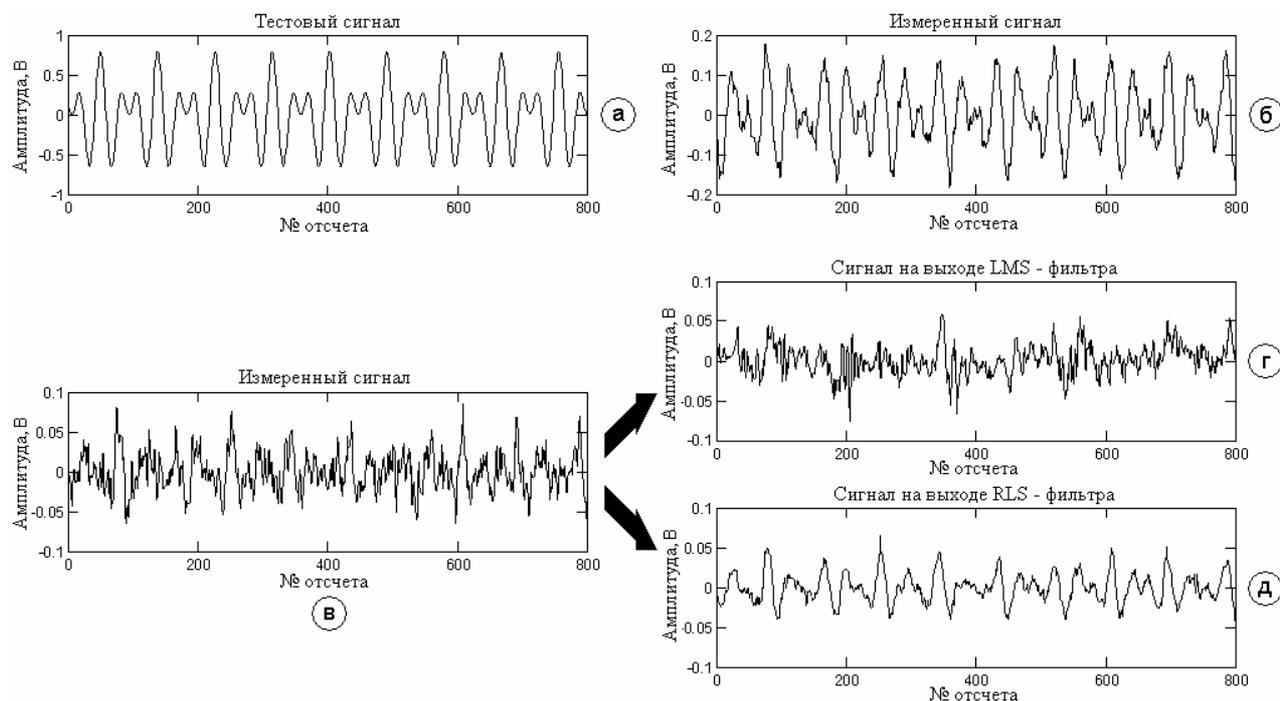


Рисунок 13 – Экспериментальная проверка эффективности адаптивной фильтрации

Исследуемый образец – пьезоэлемент «ЗП-3». Тестовый сигнал, состоит из суммы двух гармоник 1кГц и 1,5кГц, что позволяет контролировать сохранение формы сигнала после фильтрации (Рисунок 13.а). Размер адаптивных фильтров – 32. Рисунок 13.б – сигнал, зарегистрированный с оптико-электронной измерительной системы при амплитуде гармоник, подаваемых на пьезоэлемент, $U=0,4В$, что соответствует амплитуде колебания поверхности $A \approx 0,95$ мкм. Видно, что регистрируемый сигнал визуально различим на фоне помех. Рисунок 13.в – результат измерений для амплитуды гармоник, подаваемых на пьезоэлемент, $U=0,07В$ ($A \approx 0,166$ мкм). Соотношение сигнал/шум в этом случае ниже, что снижает точность измерений. На рисунках 13.г,д приведены результаты адаптивной фильтрации сигнала. Из графиков видно, что качество фильтрации RLS алгоритма значительно выше, чем алгоритма LMS. При частоте дискретизации 44100 Гц, время установления сигнала на выходе RLS фильтра (время подбора коэффициентов) $\approx 0,02$ с, что позволяет использовать предлагаемую методику в режиме реального времени.

В четвертой главе «Разработка специализированного программного обеспечения для автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов» дано описание разработанного программного обеспечения для автоматизиро-

ванного производственного контроля физических параметров пьезоэлементов. Предложены критерии контроля качества пьезоэлементов.

В задачи разработанного ПО входят:

- управление конвейерной линией и оптико-электронным преобразователем посредством последовательного порта (RS-232C) и устройства ввода/вывода (аудио-карта C-Media CMI8738);
- обработка измерительной информации, вычисление критериев контроля;
- принятие решений о классификации исследуемых пьезоэлементов на основании сравнения вычисленных критериев контроля с заданными;
- ведение базы данных о контролируемых изделиях;
- предоставление простого и интуитивно понятного пользовательского интерфейса;
- предоставление отчетности на основании БД.

На рисунке 14 изображена структурная схема автоматизированной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов. Цифрами 1 и 2 показаны оптический и электрический каналы соответственно. После запуска программа загружает ini-файл с настройками и переходит в режим ожидания управляющих команд от блока управления конвейером. При поступлении команды «готов» производится контроль качества пьезоэлемента, его классификация и занесение в базу данных. Следующим шагом генерируется управляющая команда «следующий» и программа вновь переходит в режим ожидания.

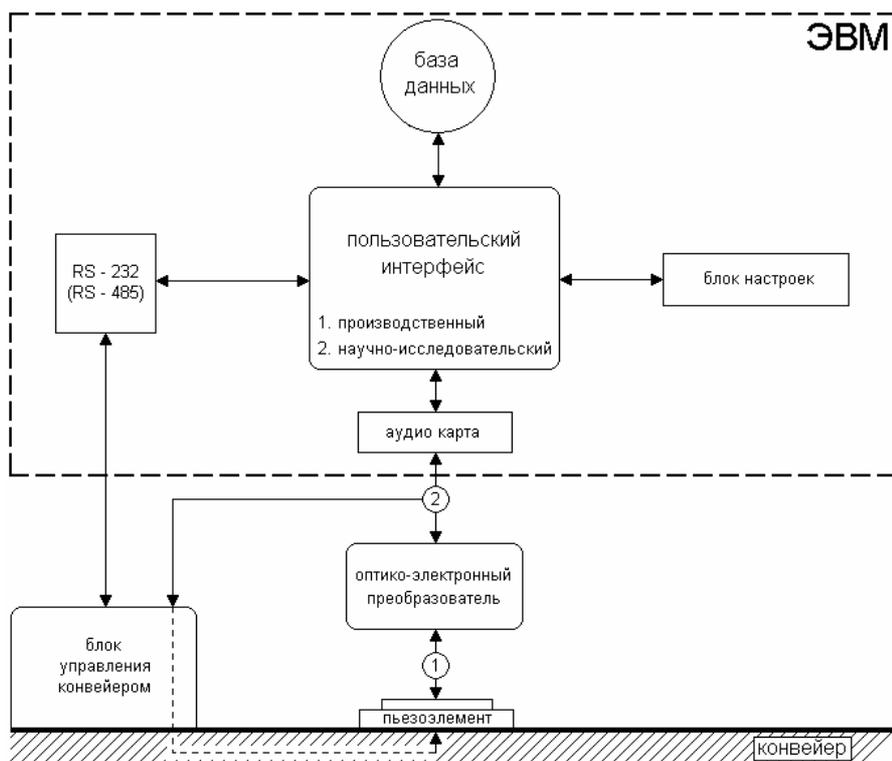


Рисунок 14 – Структурная схема автоматизированной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов

Для оценки качества пьезоэлементов предложены критерии различия физических параметров пьезоэлементов (рисунок 15).

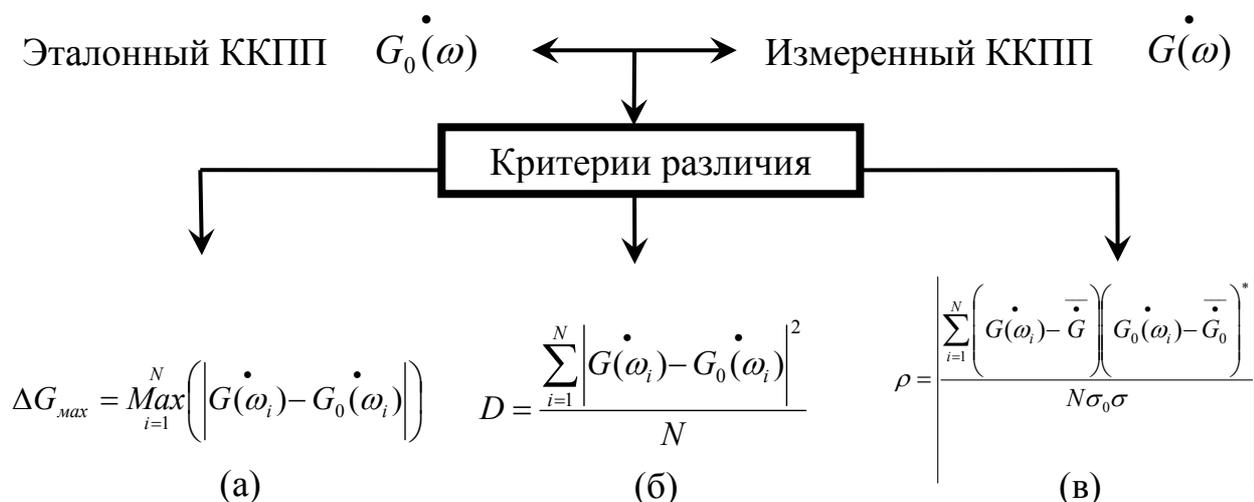


Рисунок 15 – Критерии различия физических параметров пьезоэлементов: а – допуск на максимальный модуль отклонения (главный критерий для грубой отбраковки); б – максимальная дисперсия, характеризующая максимально допустимое усредненное отклонение измеренного $G(\omega)$ от $G_0(\omega)$; в – минимальный коэффициент корреляции, определяющий максимально допустимое отклонение резонансных частот.

Предложенные критерии различия ККПП просты для программной реализации и, следовательно, могут быть использованы для автоматизированных систем производственного контроля физических параметров пьезоэлементов в реальном масштабе времени. Главное окно программы представлено на рисунке 16.

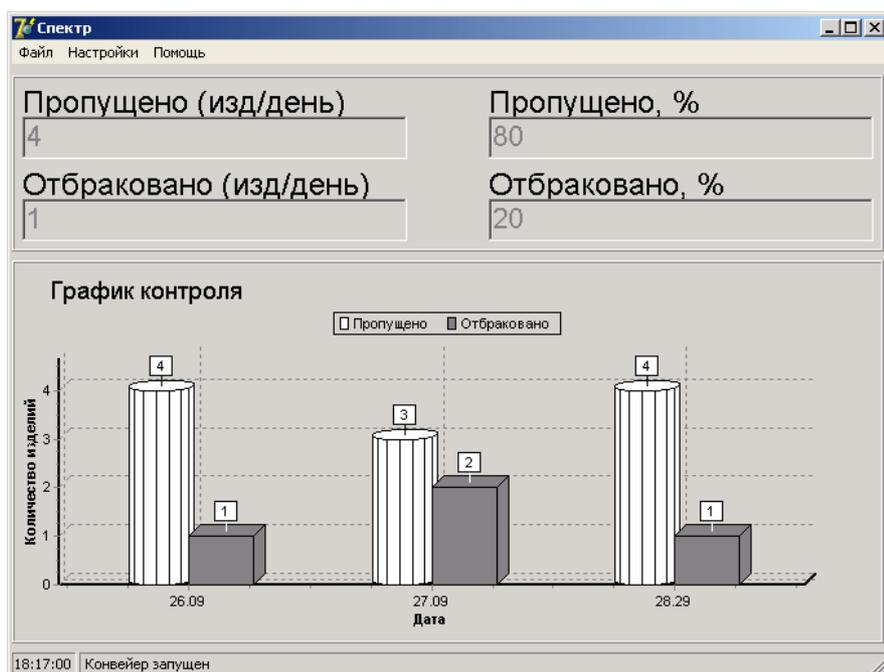


Рисунок 16 – Главное окно программы

В счетчиках главного окна программы отображаются пропущенные и отбракованные изделия в количественных и процентных соотношениях на текущий день. Временная ось графика может быть представлена в днях/часах. Подробную информацию можно получить, экспортировав данные за определенный промежуток времени (или всю БД целиком) в «MS Excel» для дальнейшего статистического анализа. В меню «настройки» задаются коэффициенты фильтров, допустимые значения отклонений от критериев оценки качества в процентах и допустимый порог отбракованных изделий в процентах от общего количества, при превышении которого генерируется аварийный сигнал остановки конвейера. Программно-аппаратный комплекс, основанный на разработанном программном обеспечении, использован в проектно-конструкторской деятельности на предприятиях г. Барнаула при разработке приборов на основе пьезоэлементов.

Заключение

В настоящей работе были разработаны алгоритмы обработки измерительной информации для повышения качества автоматизированной триангуляционной оптико-электронной системы производственного контроля физических параметров пьезоэлементов. На основе анализа результатов диссертационной работы получены следующие выводы и рекомендации.

1. На основе анализа существующих физических параметров, характеризующих качество пьезоэлемента, предложено использовать комплексный коэффициент передачи. Этот параметр является наиболее информативным для целей контроля и дает однозначное представление о качестве изделия.

2. Разработан алгоритм определения комплексного коэффициента передачи пьезоэлемента по акустическим колебаниям его поверхности. В основу алгоритма положено использование набора дискретных резонаторов второго порядка, которые способны выделять из сигнала гармоники с частотой, равной резонансной частоте. Произведен сравнительный анализ разработанного алгоритма с традиционно применяемым для этих целей дискретным преобразованием Фурье. Анализ показал, что алгоритм, в основу которого положено дискретное преобразование Фурье, применим для определения модуля комплексного коэффициента передачи пьезоэлемента в широком диапазоне частот с фиксированным шагом по частоте. Этот алгоритм целесообразно применять для экспресс-анализа физических параметров пьезоэлементов. Для высокоточного определения комплексного коэффициента передачи пьезоэлемента в узком частотном диапазоне рекомендуется алгоритм, использующий дискретные резонаторы второго порядка.

3. Разработан алгоритм точного определения фазовой составляющей комплексного коэффициента передачи пьезоэлемента с использованием двух опорных сигналов, отличающейся низкими вычислительными затратами и высокой помехозащищенностью.

4. Компьютерное моделирование оптико-электронной системы контроля показало, что качество первичной измерительной информации зависит от геометрических размеров и погрешности позиционирования окна фотоприемного устройства. Влияние этих факторов на результат измерения устраняется алгоритмически при помощи полиномиальной аппроксимации. Разработаны таблицы ошибок преобразования искомого колебания поверхности пьезоэлемента в цифровой сигнал. Каждая таблица рассчитана для фиксированного значения погрешности начальной установки окна фотоприемного устройства. Таблицы позволяют определить необходимые размеры окна и степень аппроксимирующего полинома исходя из максимально допускаемой ошибки измерения.

5. Предложен алгоритм использования адаптивного RLS фильтра и разработан корреляционный критерий его применимости для уменьшения влияния электрических наводок и фоновой засветки на сигнал, поступающий с оптико-электронного измерительного преобразователя, что повышает качество системы контроля физических параметров пьезоэлементов.

6. Предложены критерии различия изделий для автоматизированного контроля: допуск на максимальный модуль отклонения, максимальную дисперсию и минимальный коэффициент корреляции между измеренным комплексным коэффициентом передачи пьезоэлемента и образцовым. Разработано программное обеспечение, позволяющее на основе предложенных алгоритмов производить контроль физических параметров пьезоэлементов и классифицировать изделия в соответствии с выбранными критериями оценки качества в реальном масштабе времени.

7. Результаты диссертационной работы использованы в проектно-конструкторской деятельности на предприятиях «Сибпромприбор-Аналит» и «НТП Специальная электроника» при разработке приборов на основе пьезоэлементов в виде методических рекомендаций и программного обеспечения, предназначенного для контроля качества пьезоэлементов. Использование указанных результатов позволяет: повысить качество проектирования и эффективность разрабатываемых приборов на основе пьезоэлементов; сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Цуриков В.С. Алгоритмы определения комплексного коэффициента передачи в системах автоматизированного контроля качества пьезоэлементов

/ В.С. Цуриков, А.С. Воронов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2007. – №7. – С.106–109.

2. Цуриков В.С. Анализ процесса измерения фазо-частотной характеристики / В.С. Цуриков, А.С. Воронов // Измерение, контроль, информатизация-2007 : материалы VIII международной научной конференции «ИКИ-2007». – Барнаул, 2007. – С. 23-30.

3. Цуриков В.С. Корреляционный критерий сходимости адаптивных RLS и LMS алгоритмов для выделения на фоне помех сигналов с конечным спектром // Электронный физико-технический журнал [Электронный ресурс] / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Электронный журнал. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. – Режим доступа: <http://eftj.secna.ru/vol2.htm/> – Загл. с экрана. – № гос. регистрации 0420700047. – 2007. – Т. 2. – С. 71-78.

4. Цуриков В.С. Программа для ЭВМ Программный анализатор (Анализатор) / В.С. Цуриков, А.С. Воронов, С.П. Пронин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, №2006610724. Дата регистр. 22.02.2006.

5. Цуриков В.С. Программа для ЭВМ Волна (ВЛ) / В.С. Цуриков, А.С. Воронов, С.П. Пронин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, №2007613982. Дата регистр. 18.09.2007.

6. Цуриков В.С. Программа для ЭВМ Спектр (СП) / В.С. Цуриков, А.С. Воронов, С.П. Пронин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, №2007613983. Дата регистр. 18.09.2007.

7. Цуриков В.С. Разработка и анализ компьютерной модели цифрового спектрального анализатора с учетом влияния шумов, разрывов в сигнале, эффектов квантования и нелинейности / В.С. Цуриков, А.С. Воронов // Электронный физико-технический журнал [Электронный ресурс] / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Электронный журнал. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. – Режим доступа: <http://eftj.secna.ru/vol2.htm/> – Загл. с экрана. – № гос. регистрации 0420700047. – 2007. – Т. 2. – С. 79-88.

8. Цуриков В.С. Реакция неселективного датчика на многочастотный гармонический тестовый сигнал / В.С. Цуриков, А.С. Воронов, С.П. Пронин // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2006. – №4. – С. 18-20.

9. Цуриков В.С. Сравнение методов и алгоритмов адаптивной и линейной фильтрации для обработки данных, получаемых с оптико-электронного измерительного преобразователя / В.С. Цуриков, А.С. Воронов, С.П. Пронин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – №11. – С.53–57.

10. Цуриков В.С. Теоретическое и экспериментальное исследование амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик пьезоэлементов / В.С. Цуриков, А.С. Воронов, С.П. Пронин // Вестник АлтГТУ. – Барнаул, 2006. – № 2. – С. 73-74.

