

На правах рукописи

Абрамов Алексей Михайлович

**МЕТОД СКОЛЬЗЯЩЕЙ ГИСТОГРАММЫ
ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ
ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.11.16
«Информационно-измерительные и управляющие системы
(в технических системах)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» на кафедре «Информационно-измерительная и биомедицинская техника».

Научный руководитель:

Прошин Евгений Михайлович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ермолкин Олег Викторович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-измерительных систем «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина», г. Москва

Жильников Тимур Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры математики и информационных технологий управления «Академия права и управления ФСИН России», г. Рязань

Ведущая организация:

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр "ЦСКБ-ПРОГРЕСС" - "Особое конструкторское бюро "СПЕКТР", филиал Федерального государственного унитарного предприятия, г. Рязань

Защита состоится 22 ноября 2013 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ.
Автореферат разослан «___» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Раздел метрологии, связанный с обеспечением единства измерений, на сегодня является одним из достаточно консервативных разделов в технической области. С одной стороны, это и понятно, ибо задача поддержания точности и единства измерения требует большой тщательности, а с другой – это приводит порой к увеличению трудоемкости и дороговизны метрологических испытаний. К этому следует добавить, что сами испытываемые средства стали настолько сложными, что традиционные способы метрологического испытания к ним применить зачастую невозможно. К таким объектам повышенной сложности, несомненно, можно отнести информационно-измерительные системы (ИИС), построенные на базе ансамбля цифровых измерительных модулей (ЦИМ).

На сегодняшний день проведение отдельных видов метрологических испытаний ЦИМ ИИС производится путем создания специализированных комплексов, оснащенных автономными, разнотипными измерительными и вспомогательными устройствами, объединенных различными каналами связи. Данные обстоятельства способствуют возникновению неучтенных методических погрешностей измерений и в целом снижению точности и достоверности полученных результатов измерений. Способ управления процессом испытаний, как правило, ручной, что может быть причиной появления грубых погрешностей (промахов), вызванных в том числе «человеческим фактором». Поэтому автоматизация метрологического контроля и испытания данных средств измерений (СИ) стала важной составляющей их использования.

К наиболее важным метрологическим характеристикам относят точность и быстродействие. Первую из них обычно определяют через статическую погрешность, а вторую – через динамическую.

Основные характеристики ЦИМ ИИС, представляющие интерес при метрологическом испытании, это: функция преобразования (ФП), напряжение межкодового перехода, интервал квантования, дифференциальная нелинейность (DNL), интегральная нелинейность (INL), зона неопределенности напряжений межкодовых переходов, монотонность ФП, аддитивная и мультипликативная погрешность.

Существуют различные подходы к измерению этих характеристик, изложенные в работах Цветкова Э.И., Новицкого П.В., Шлыкова Г.П., Брагина А.А., Семенюка А.Л., Вострокнутова Н.Н., Прошина Е.М., Садовского Г.А., Бернарда М. Гордона, Уолта Кестера и др.

В большинстве общепринятых методов в качестве образцового испытательного сигнала (ОИС) используются либо линейно изменяющееся во времени напряжение (треугольные или пилообразные импульсы), либо синусоидальные колебания, охватывающие весь рабочий диапазон ЦИМ с последующей обработкой и вычислением спектра преобразованного сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье.

Недостатки этих методов известны. В первом случае возникает проблема получения «хорошего» линейно нарастающего или спадающего напряжения.

Во втором – проблема хорошей фильтрации синусоидального сигнала. Большинство методик не ориентированы на получение полной ФП ЦИМ из-за большого количества времени, уходящего на прохождение всей характеристики преобразования при испытании многоуровневых ЦИМ. Такие методы используют, например, контроль напряжений, соответствующих отдельным переходам 2^K-1 (K – число разрядов ЦИМ).

По способу выделения погрешностей (в цифровом или аналоговом виде) методы метрологического испытания ЦИМ можно разделить на прямого и обратного преобразования. Здесь особого внимания заслуживает метод образцовой меры, для формирования которой чаще всего используется образцовый цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с допускаемыми погрешностями в пределах (0,1-0,5) от предела допустимой контролируемой погрешности ЦИМ.

Такие требования к точности образцовых СИ становятся порой реально невыполнимыми при метрологической аттестации высокоточных многоуровневых ЦИМ, кроме того, возможность испытать ЦИМ с большим числом разрядов ограничивается разрядностью самого образцового ЦАП.

Решение существующих проблем возможно путем разработки и исследования методов компьютерной автоматизации метрологических испытаний, прецизионных методик испытаний статических характеристик ЦИМ и методик оценивания погрешностей, преодолевающих ограничения по точности образцовых СИ. Особое место занимают вопросы испытания предельных по разрядности (до 24) ЦИМ, для которых порой не существует образцовых СИ.

Целью диссертационной работы является повышение точности метрологических испытаний и аттестации ЦИМ ИИС на основе предложенного в работе метода скользящей гистограммы (СГ) и его компьютерной автоматизации, позволяющих преодолеть ограничения по точности образцовых СИ за счет прецизионных методик, максимально полно оценивающих характеристики испытываемых средств.

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

- используя прецизионные СИ в сочетании с прецизионными методиками, максимально полно оценивающие характеристики испытываемых средств, преодолеть ограничения по точности образцовых СИ;

- разработать прецизионный способ метрологического испытания и аттестации ЦИМ с использованием компьютерных технологий;

- оценить точность разработанного способа;

- подтвердить обоснованность теоретических выводов, расчетов и результатов моделирования экспериментальными исследованиями.

Методы исследования. Результаты исследований, включенные в диссертацию, базируются на методах математического анализа, теории вероятности, теоретических основах электротехники, теории статистического оценивания, численного моделирования и на экспериментальных исследованиях. Использовались пакеты программ Mathematica, LabVIEW.

Научная новизна работы

1. Разработан новый метод метрологического испытания ЦИМ ИИС, названный методом скользящей гистограммы, являющийся развитием гисто-

граммного метода, основанный на циклическом сдвиге опорного уровня образцового испытательного сигнала (ОИС) с номинальным шагом, соизмеримым с интервалом квантования испытываемого ЦИМ по его динамическому диапазону.

2. Найдены зависимости для метода скользящей гистограммы, показывающие, что погрешность в определении DNL и INL испытываемого ЦИМ определяется произведением нелинейности ОИС на нелинейность его перемещения и, следовательно, имеет второй порядок малости.

3. Разработаны алгоритмы, модели и аппаратно-программная реализация системы метрологического испытания, позволяющие оценить статические метрологические характеристики ЦИМ по методу скользящей гистограммы, в которых преодолены метрологические ограничения средств испытаний и измерений за счет прецизионных методик, снижающих требования к линейности ОИС.

Практическая значимость. Разработан и запатентован способ метрологического испытания статических характеристик АЦП, являющегося основным элементом ЦИМ.

На основе разработанных методов и алгоритмов созданы программно-аппаратные средства, зарегистрирована программа для реализации метода СГ, представляющая собой интерактивный инструмент метрологического испытания ЦИМ ИИС, позволяющая получить полную картину реальной ФП со всеми статическими характеристиками.

Методы используются в составе метрологического обеспечения ИИС летных и предполетных испытаний в ЛИИ им. М.М. Громова (г. Жуковский).

Результаты диссертационной работы использовались в НИР и НИОКР по темам:

– «Разработка унифицированной системной оболочки СРС и адаптация программно-аппаратных средств для метрологического обеспечения подготовки многоканальных измерительных систем к летным испытаниям» (№ 186-07-м/11-07);

– «Разработка интерактивной среды эталонного комплекса аппаратно-программных средств для проведения комплексных сертификационных испытаний и аттестации измерительных каналов ИИС» (№ 89-09-М/12-09);

– «Разработка типовых методик, модифицированных алгоритмов программного обеспечения эталонного комплекса для оценки динамических характеристик измерительных модулей бортовых ИИС» (№ 157-11-М);

– «Разработка системы автоматизированного исследования статических характеристик цифровых измерительных устройств, на основе метода СГ по программе «У.М.Н.И.К.».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских НТК «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» (Рязань, 2007, 2010, 2011), Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» (Рязань, 2009). Проект по теме диссертации победил в I региональном итоговом конкурсе «У.М.Н.И.К» (Рязань, 2010).

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы в рамках НИР с Летно-исследовательским институтом имени М.М. Громова – г. Жуковский (2007, 2009, 2011) и в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе: патент РФ на изобретение (№ 2337475), одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2012660596), 1 монография (в соавторстве), шесть статей в журналах из списка рекомендованных ВАК.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод скользящей гистограммы, основанный на анализе каждого интервала квантования испытываемого ЦИМ путем циклического сдвига опорного уровня ОИС по всему динамическому диапазону, с номинальным шагом, соизмеримым с интервалом квантования испытываемого ЦИМ, что заметно снижает влияние нелинейности ОИС и дает возможность повысить точность метрологических испытаний.

2. Методика расчета точности испытания по методу скользящей гистограммы, показавшая, что погрешность в определении статических характеристик испытываемого ЦИМ определяется произведением нелинейности ОИС на нелинейность изменения опорного уровня ОИС и, следовательно, имеет второй порядок малости.

3. Структуры и алгоритмы работы системы метрологического испытания ЦИМ, включающие генератор ОИС, управляемый аттенюатор, регулируемый источник опорного напряжения (РИОН), схему перемещения ОИС, микроконтроллер и ЭВМ, реализующие метод скользящей гистограммы.

4. Результаты моделирования и экспериментальных исследований метода скользящей гистограммы, подтвердивших обоснованность теоретических выводов и расчетов, где выигрыш в точности по сравнению с гистограммным методом достигает величины 30 даже при большой нелинейности смещения ОИС, равной $\alpha = 0.1$.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 73 наименований и пяти приложений. Диссертационная работа содержит 135 страниц, в том числе 102 страницы основного текста, 52 рисунка и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, проанализировано состояние проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу известных методов испытания и оценивания точности ЦИМ ИИС.

Проведен анализ обобщенной структуры ИИС, где под ЦИМ понимается

измерительный канал (ИК) ИИС, конструктивно различные элементы которого объединены в единое устройство, представляющее собой электронный измерительный преобразователь с цифровым выходом. В частности, показано, что понятие ЦИМ нередко сводят к АЦП.

Описаны основные статические характеристики ЦИМ ИИС, образующие его метрологические свойства: ФП, напряжение межкодового перехода, интервал квантования, DNL, INL, зона неопределенности напряжений межкодовых переходов, монотонность ФП, аддитивная и мультипликативная погрешность. Статическая ФП ЦИМ представляется решением уравнения:

$$N \leftarrow \left[x = x_0 + \sum_{i=0}^N h_i + \eta_i \right], \quad (1)$$

где цифровой эквивалент N измеряемой величины x появляется в результате замещения x суммой единичных интервалов квантования h_i с учетом DNL, INL, случайного шума η_i и начального смещения x_0 . Здесь в точности равенства левой и правой части заключена погрешность квантования и компарирования, в разбросе и колебаниях h_i заключены DNL и INL, в нестабильности x_0 – аддитивная составляющая общей погрешности, а в общем тренде всех h_i – мультипликативная составляющая общей погрешности и, наконец, в η_i – случайные колебания уровней квантования. Таким образом, для наиболее полного оценивания ФП ЦИМ необходимо по существу измерить все значения интервалов квантования h_i по всему диапазону преобразования вместе с величинами x_0 и η_i , что, естественно, возможно только с использованием компьютерных технологий.

Проведен анализ основных нормативных документов, распространяющихся на АЦП электрических сигналов, устанавливающих общие требования к методике поверки цифровых измерительных приборов и преобразователей. Особое место при метрологическом испытании АЦП занимает вопрос формализации требований к точности измерений и выбора образцовых СИ. Таким образом, для исследования статических метрологических характеристик 12-разрядного ЦИМ относительная погрешность опорного ОИС (погрешность калибратора) не должна превышать $\gamma = 2^{-12} \times 10^{-1} \approx 0,2 \times 10^{-4}$, т.е. 0.00002 (0,002 %). Для 16-разрядных ЦИМ, а особенно 24-разрядных, требования к точности опорных сигналов возрастают на несколько порядков и становятся реально невыполнимыми.

Проанализированы известные методы экспериментального определения статических характеристик ЦИМ и АЦП. Проведена оценка погрешностей общепринятого гистограммного метода. Показано, что при линейном ОИС систематическая погрешность оценки ступени квантования ЦИМ и погрешность оценки DNL и INL зависят от объема выборки и уменьшаются в среднем в $\sqrt{m \cdot n_T / N_m}$. Здесь m – число периодов ОИС, n_T – число отсчетов за время прямого и обратного хода ОИС по всему диапазону преобразования ЦИМ, N_m – максимальное число кодовых комбинаций ЦИМ. При наличии

нелинейности сканирования плотность распределения мгновенных значений ОИС отлична от равномерной плотности, что приводит к систематической погрешности оценки ступени квантования ЦИМ, обусловленной заданной методикой измерения. В этом случае максимальная погрешность измерения DNL $\beta / 2$, а INL – $\beta / 4$ (β – коэффициент нелинейности ОИС).

Последним обусловлена необходимость разработки новых методов экспериментального определения статических характеристик многоразрядных ЦИМ, направленных на переход от прецизионных средств измерений к прецизионным методикам, при которых требования к образцовым средствам могут быть существенно снижены.

Сформулированы основные задачи диссертационного исследования:

- преодоление метрологических ограничений средств испытаний и измерений;
- разработка прецизионного способа метрологического испытания и аттестации ЦИМ ИИС на базе компьютерных технологий;
- оценка точности разработанного способа.

Вторая глава посвящена разработке прецизионного способа метрологического испытания и аттестации ЦИМ, максимально полно оценивающего характеристики испытываемых средств, направленного на преодоление метрологических ограничений средств испытаний и измерений.

Способ начинается с процедуры определения границ амплитудного диапазона (АД) ЦИМ согласно принятой в работе классификации ФП ЦИМ.

Для решения задачи преодоления ограничений по точности образцовых СИ был разработан и запатентован новый метод метрологического испытания ЦИМ ИИС (пат. РФ № 2337475), названный методом скользящей гистограммы, являющийся развитием гистограммного метода. Суть метода СГ при контроле статических характеристик прецизионных ЦИМ заключается в следующем (рисунок 1).

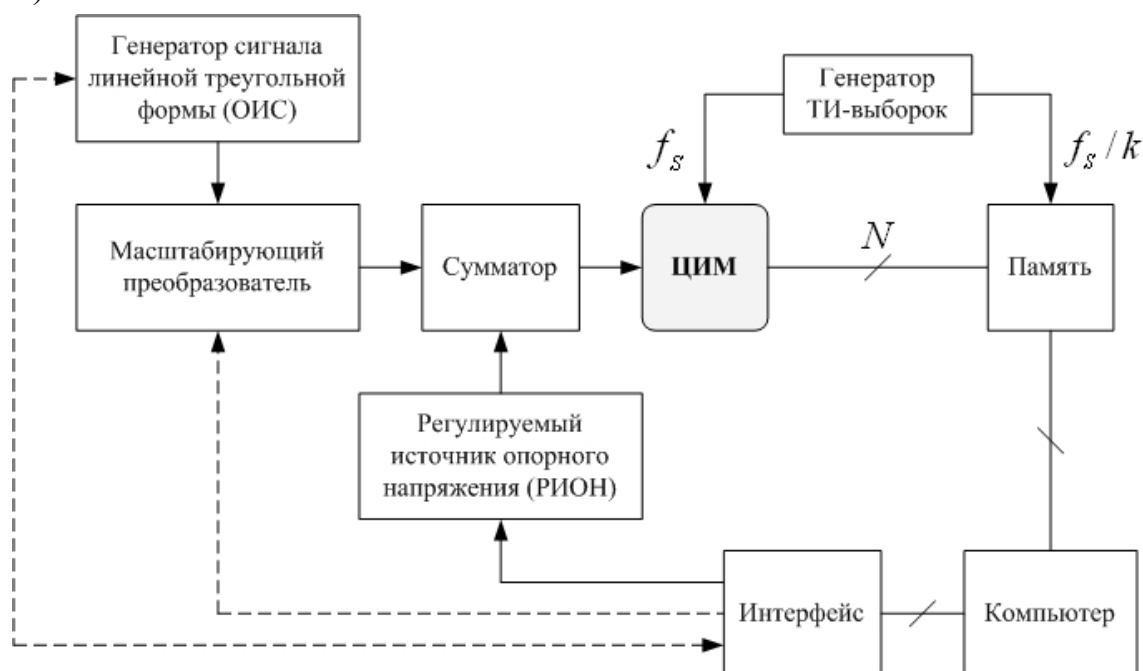


Рисунок 1 – Структура реализации метода СГ

Формируют ОИС в виде

$$U = \left\{ \begin{array}{l} \left| Q^{(+)} \right| t - 2A_{ОИС} \cdot (i-1), \quad T(i-1) < t \leq T \left(i - \frac{1}{2} \right) \\ - \left| Q^{(-)} \right| t + 2A_{ОИС} \cdot i, \quad T \left(i - \frac{1}{2} \right) < t \leq T \cdot i \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $Q^{(+)}$ и $Q^{(-)}$ – производные на возрастающем и убывающем участках ОИС, $A_{ОИС}$ – амплитуда ОИС, T – период ОИС, i – порядковый номер периода ОИС, например, с помощью генератора сигнала линейной треугольной формы или ЦАП и ослабляют его в случае ЦАП для уменьшения собственной ступени квантования с коэффициентом ослабления L

$$L \geq \frac{h_{\Gamma}}{h_{ЦИМ}} \cdot k_{ТР}, \quad (3)$$

где h_{Γ} – номинальное значение шага квантования источника ОИС, $h_{ЦИМ}$ – ожидаемое значение ступени квантования испытываемого ЦИМ, $k_{ТР}$ – коэффициент необходимого превышения по точности источника ОИС над испытываемым ЦИМ. Суммируют уменьшенный образцовый испытательный сигнал ($\overline{ОИС}$) с сигналом регулируемого источника опорного напряжения (РИОН) таким образом, чтобы верхняя граница номинального размаха $\overline{ОИС}$ не превышала нижней код-границы NV испытываемого ЦИМ.

$\overline{ОИС}$ начинают циклически сдвигать с помощью РИОН, с номинальным шагом, соизмеримым с интервалом квантования испытываемого ЦИМ, по всему динамическому диапазону последнего. При этом накапливают на каждом шаге локальную гистограмму кодов с испытываемого ЦИМ в области размаха $\overline{ОИС}$, исключают коды на его границах и суммируют число кодов, соответствующих каждому промежутку квантования испытываемого ЦИМ в общей гистограмме. Продолжают испытания и накопление числа кодов до тех пор, пока нижняя граница номинального размаха $\overline{ОИС}$ не превысит верхней код-границы NB испытываемого ЦИМ. Для этого фиксируют соответствующие коды с испытываемого ЦИМ в память, которая в свою очередь передает эти коды на компьютер. Формирование общей гистограммы на примере 3-битного ЦИМ представлено на рисунке 2.

Получено выражение, показывающее, что время пребывания в j -м промежутке квантования для всех уровней смещения $\overline{ОИС}$ зависит от величины этого промежутка и практически не зависит от нелинейности $\overline{ОИС}$:

$$F_j = mh_j \cdot N_{ОИС} \cdot M^*(1/Q'_i), \quad (4)$$

где m – число периодов $\overline{ОИС}$; h_j – испытываемый интервал квантования; $N_{ОИС}$ – число смещений $\overline{ОИС}$, обеспечивающее участие $\overline{ОИС}$ в испытании j -го интервала квантования; $M^*(1/Q'_i)$ – оценка математического ожидания об-

ратной производной на m периодах, определяемая как

$$M^* \left(\frac{1}{Q'} \right) = \frac{1}{mN_{OIC}} \sum_{i=1}^{mN_{OIC}} \left(\frac{1}{|Q_i^{(+)}|} + \frac{1}{|Q_i^{(-)}|} \right). \quad (5)$$

где $Q_i^{(+)}$ и $Q_i^{(-)}$ – производные на возрастающем и убывающем участках \overline{OIC} в i -м испытании на j -м интервале квантования.

Здесь m и N_{OIC} – величины постоянные, а $M^*(1/Q')$ – величина, колебания которой уменьшаются в $\sqrt{mN_{OIC}}$ по сравнению с исходными колебаниями, в том числе от нелинейности \overline{OIC} .

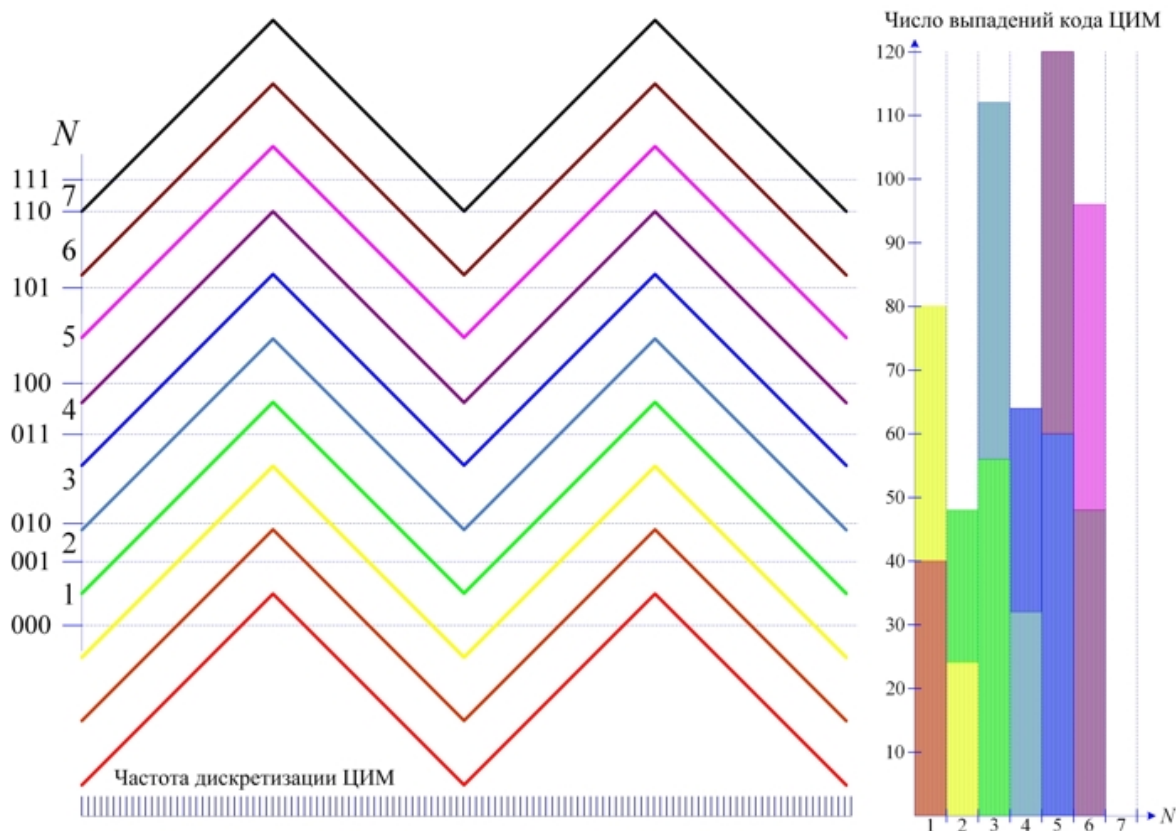


Рисунок 2 – Пример метода СГ при испытании ЦИМ линейным ОИС

Решена задача оценки погрешностей метода СГ. Получена зависимость для метода СГ, показывающая, что погрешность в определении DNL и INL испытываемого ЦИМ определяется произведением нелинейности ОИС (β) на нелинейность его перемещения (α) в РИОН и, следовательно, имеет второй порядок малости:

$$\overline{\delta}_{x_n} = \frac{\alpha\beta}{12}. \quad (6)$$

Показано, что выигрыш в точности по сравнению с гистограммным методом достигает величины 30 даже при большой нелинейности ОИС и РИОН, равной $\beta = 0.1$, $\alpha = 0.1$.

Разработано устройство (пат. РФ № 2337475) для осуществления метода СГ, содержащее генератор ОИС (ЦАП1), управляемый аттенюатор, РИОН (ЦАП2), схему перемещения ОИС (СПОИС), микроконтроллер (МК) и ЭВМ.

Выделены основные параметры системы метрологического испытания статических характеристик прецизионных ЦИМ по методу СГ, влияющие на точность и скорость измерения его ФП.

Третья глава посвящена программному моделированию метрологического испытания статических характеристик ЦИМ.

Описаны основные требования, предъявляемые к имитационной программной модели (далее модели) системы метрологического испытания. На основе этого предложено задачу проектирования модели решать с помощью среды графического программирования LabVIEW.

С учетом сформулированных требований и принципов программирования среды LabVIEW разработана модель системы метрологического испытания по гистограммному методу и его дальнейшему развитию – методу СГ. Обобщенная модель разработанного виртуального прибора (ВП) представлена на рисунке 3.

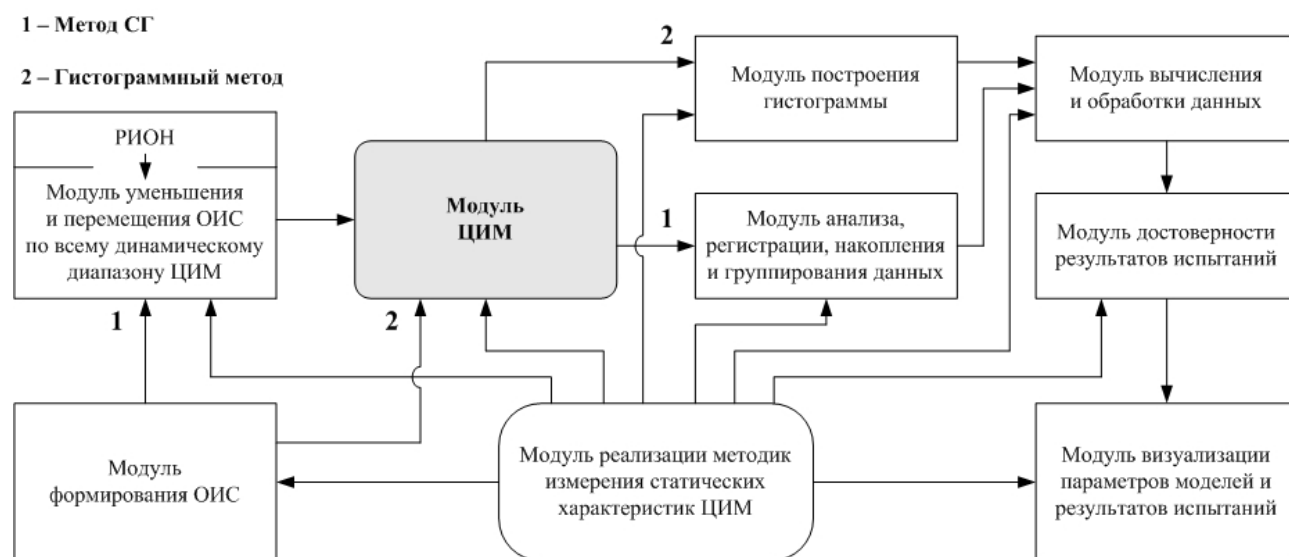


Рисунок 3 – Обобщенная модель системы метрологического испытания

Предложено модуль ЦИМ представить последовательным соединением входного аналогового устройства и АЦП, в котором были учтены особенности идеального дискретного преобразователя и те отличия реального преобразователя от идеального, которые существенно влияют на погрешность результата измерения в статическом режиме. Проведен анализ работы АЦП с входным аналоговым устройством. На основе этого показано, что структуру ЦИМ любого типа можно описать последовательным соединением входного аналогового устройства, квантователя (КВ) и дискретизатора, причем последние два элемента можно менять местами. В качестве основы модели КВ принята процедура решения следующего математического выражения:

$$x - \sum_{i=0}^n [h_H + DNL \cdot RND(i) + f(x_{INL})] + \eta_{III} \cdot RND^*(i) \leq 0. \quad (7)$$

где x – преобразуемая величина, h_H – номинальный интервал квантования, DNL , будучи умноженной на случайную величину RND (в диапазоне -1,+1), и INL , изменяющаяся по заданному закону $f(x_{INL})$, генерируют конкретные зна-

чения h_i для каждого i -го интервала квантования, $\eta_{ш}$ – собственный шум ЦИМ, RND^* – случайная величина (в диапазоне -1,+1) собственного шума ЦИМ.

Вид лицевой панели разработанного ВП представлен на рисунке 4. С помощью органов управления лицевой панели ВП выполняется ввод исходных значений параметров ОИС, статических характеристик ЦИМ, а также настройка метода СГ. Использование средств отображения и индикации ВП позволяют осуществить визуальный контроль формы задаваемых параметров ОИС, ФП ЦИМ, а также представить результаты испытаний по гистограммному методу и методу СГ в виде гистограмм, вычисленных статических характеристик, построенной реальной ФП и зоны неопределенности. Кроме того, разработанная модель системы метрологического испытания позволяет оценить точность определения интервалов квантований испытываемого ЦИМ.

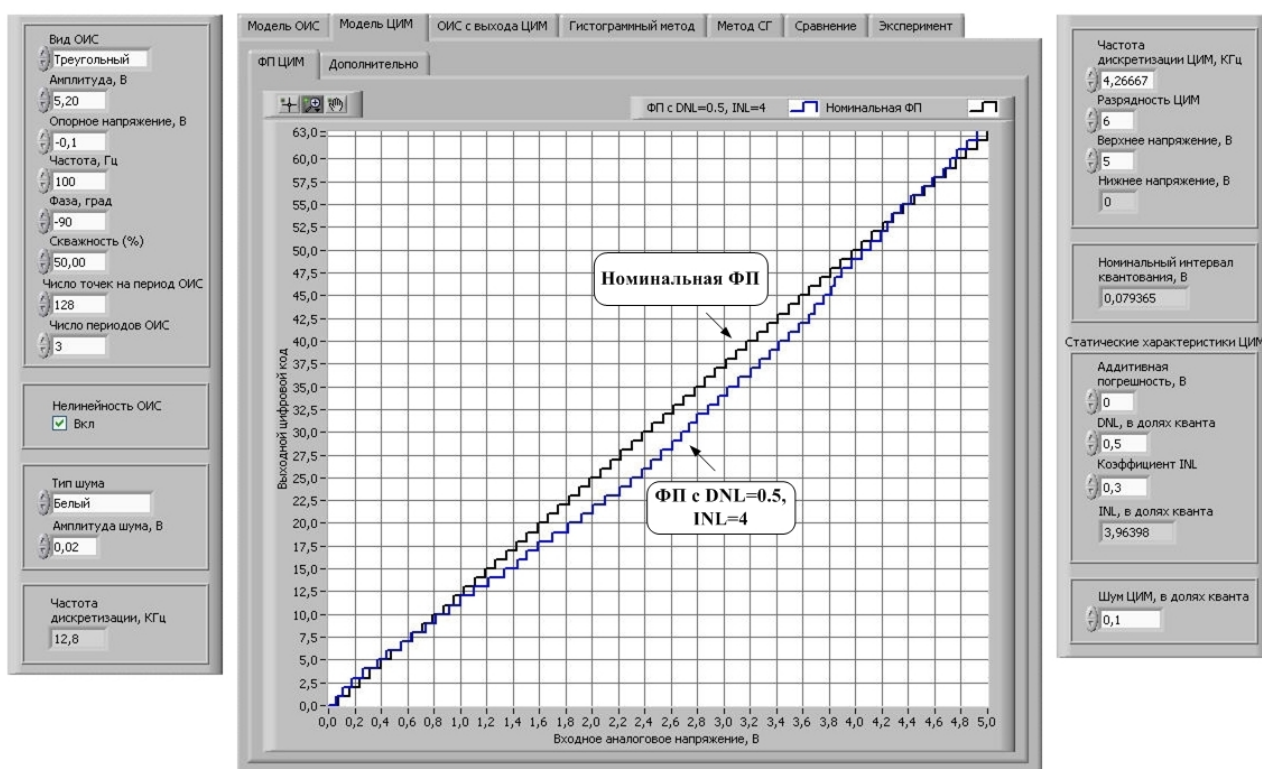


Рисунок 4 – Лицевая панель виртуального прибора

Исследована разработанная модель системы метрологического испытания на разнообразных ФП. На рисунке 5 представлены результаты испытаний ЦИМ с номинальными параметрами ($DNL = 0$ и $INL = 0$) нелинейным ОИС по гистограммному методу и совместной нелинейности ОИС и нелинейности его перемещения, равной ступени квантования по методу СГ.

Здесь при коэффициенте нелинейности ОИС $\beta = 0.2$ предельная относительная погрешность измерения интервалов квантований для гистограммного метода достигает 30 % и для метода СГ 7 %.

Последние результаты подтверждают эффективность разработанного метода СГ по сравнению с общепринятым гистограммным методом. Если в гистограммном методе точность измерений INL испытываемого ЦИМ не может превышать INL ОИС, то в методе СГ нелинейность ОИС практически не влияет на

точность измерения ФП ЦИМ даже при нелинейности перемещения ОИС, равной ступени квантования.

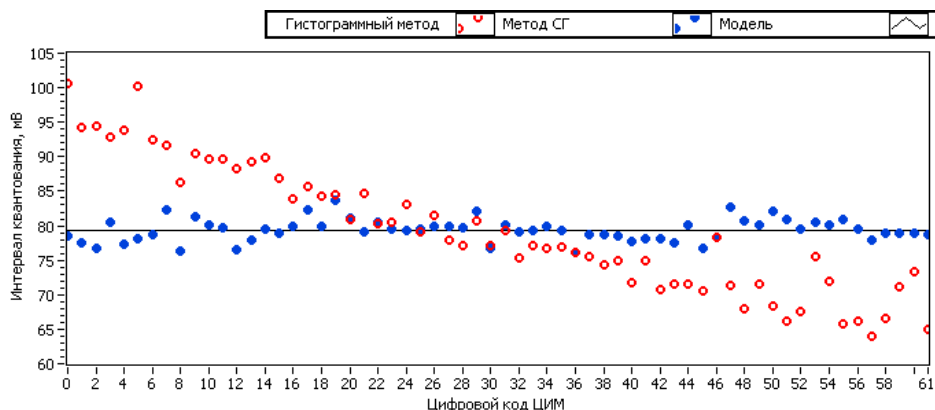


Рисунок 5 – Абсолютные значения интервалов квантований

Четвертая глава посвящена аппаратно-программной реализации и экспериментальному исследованию предлагаемого в работе метода СГ. Разработана система метрологического испытания, позволяющая реализовать как классические методы метрологического испытания (прямого образцового преобразования, гистограммный), так и метод СГ (рисунок 6).

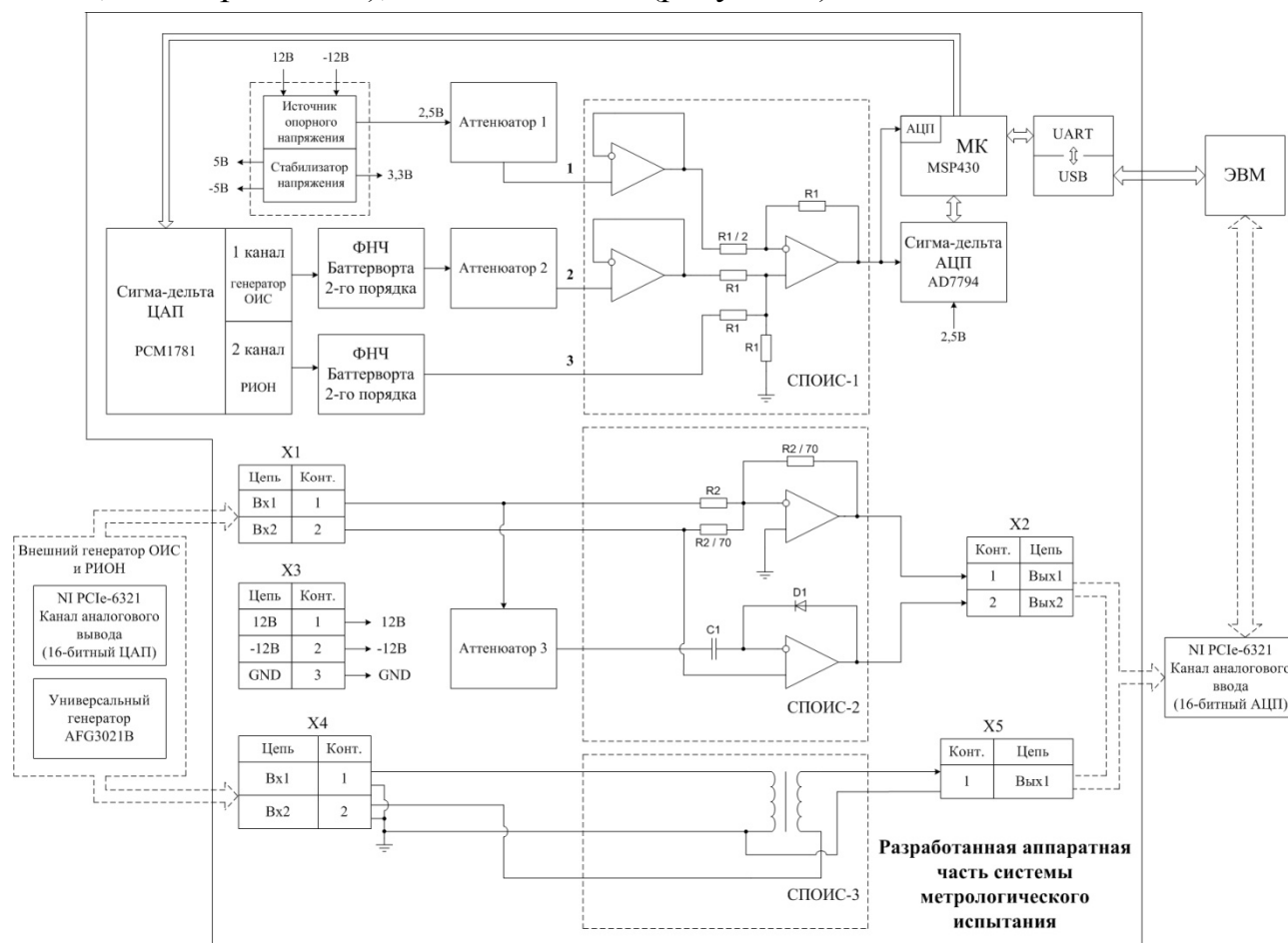


Рисунок 6 – Функциональная схема системы метрологического испытания с использованием метода СГ

Данная система предусматривает подключение внешнего генератора ОИС и РИОН к разъему X1/X4 (канал аналогового вывода NI PCIe-6321 или

универсальный генератор AFG3021B) в случае метрологического испытания внешнего ЦИМ.

Разработка системы была выполнена при поддержке гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «У.М.Н.И.К.». На рисунке 7 представлена фотография макета разработанной системы.

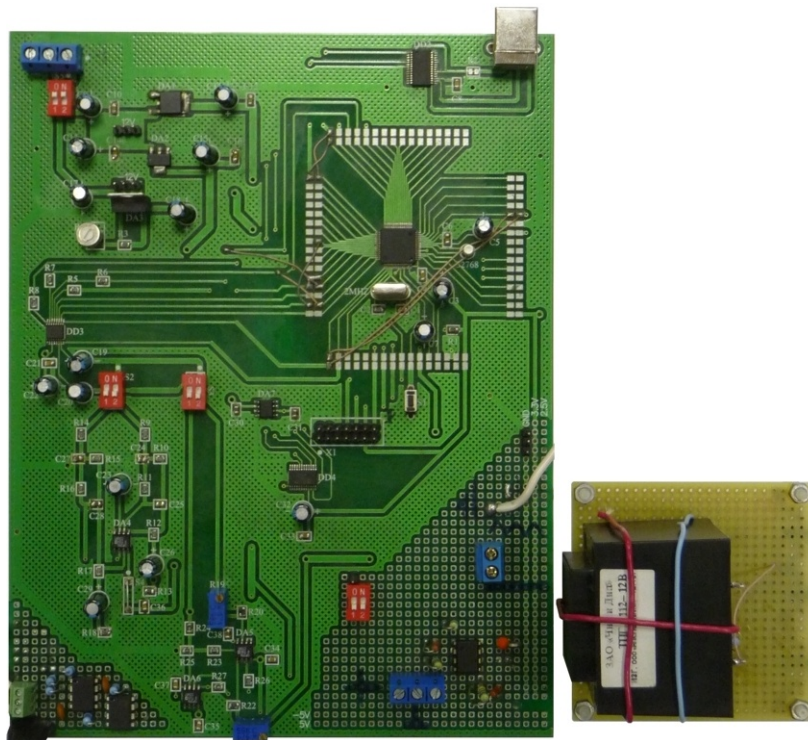


Рисунок 7 – Макет системы метрологического испытания с использованием метода СГ

Для проведения экспериментального исследования метода СГ с помощью системы метрологического испытания была разработана программа для реализации метода СГ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660596) посредством среды графического программирования LabVIEW.

На рисунке 8 представлены результаты метрологического испытания канала аналогового ввода NI PCIe-6321 по методу СГ с 16-битным АЦП AD7685. Для данного эксперимента функцию генератора ОИС и РИОН выполняли 2 канала аналогового вывода NI PCIe-6321, позволяющие воспроизводить сигнал с разрешением 16 бит, с DNL 1LSB и INL 8.5LSB. Макет системы метрологического испытания с помощью СПОИС-2, основанной на инвертирующем сумматоре, выполнял операцию масштабирования сигнала с первого канала аналогового вывода и накладывания его на изменяющийся опорный уровень со второго канала аналогового вывода. По данным общей гистограммы программа определяет абсолютные значения всех интервалов квантований. Результаты этих вычислений позволяют получить статические характеристики: $h_H \approx h_{CP} = 0,16444\text{мВ}$, $DNL_{min} = -0,34\text{LSB}$, $DNL_{max} = 0,54\text{LSB}$, $INL_{min} = -1,2\text{LSB}$, $INL_{max} = 3\text{LSB}$. Данные результаты находятся в пределах заявленных метроло-

гических характеристик производителя и подтверждают эффективность метода СГ.

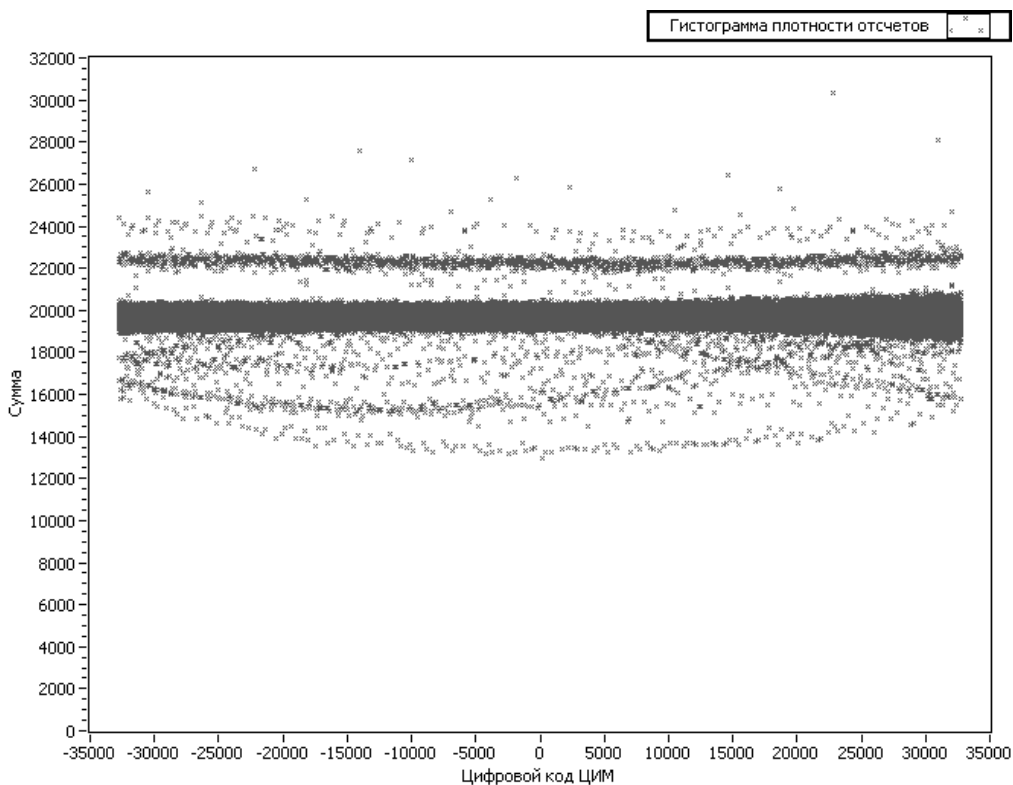


Рисунок 8 – Общая гистограмма плотности кодов, полученная при метрологическом испытании канала аналогового ввода NI PCIe-6321
В завершении работы программа строит реальную ФП (рисунок 9).

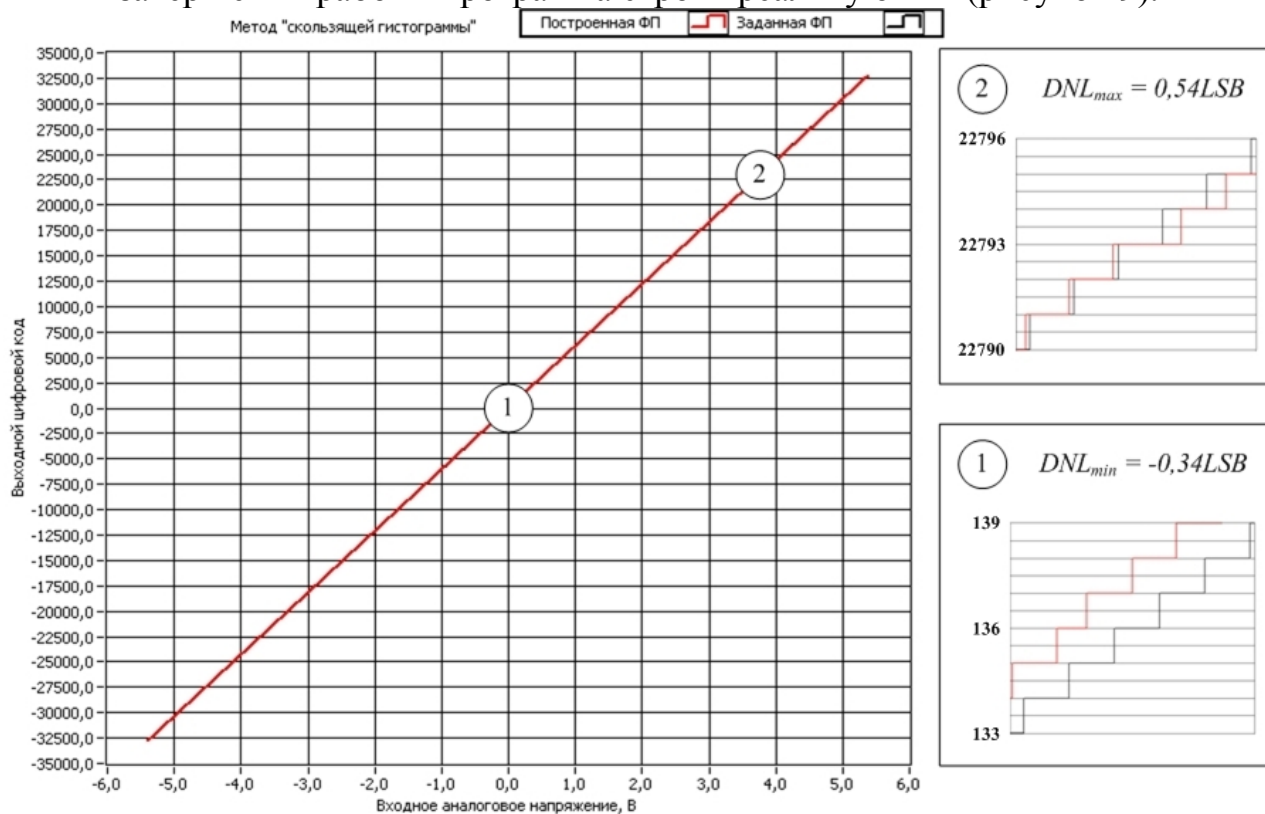


Рисунок 9 – Реальная ФП канала аналогового ввода NI PCIe-6321
На базе научно-образовательного центра авторизованного технологиче-

ского центра National Instruments (НОЦ-АТЦ NI) ФГБОУ ВПО "РГРТУ", было проведено испытание 4-х плат сбора данных PCIe-6321. Результаты испытаний одной из плат PCIe-6321 представлены в таблице.

Результаты испытаний канала аналогового ввода PCIe-6321 по методу СГ

Испытание	DNL, в долях кванта		INL, в долях кванта				Число испытаний каждого кванта		Общее число отчетов	Среднее значение кванта, мВ	Номинальный интервал квантования, мВ
			Без аппроксимации		С аппроксимацией						
	Мин	Макс	Мин/Код	Макс/Код	Мин/Код	Макс/Код	Мин	Макс			
1	-0,34	0,54	-1,2/28991	3/-5936	0,1/32766	1,7/-32767	811	816	1,28986E+9	0,16444	
2	-0,33	0,55	-1,7/28991	2,5/-6510	-0,54/32766	1,2/-32767		817	1,28985E+9		
3		0,53	-1,3/27399	2,8/-6508	-0,1/32766	1,4/-32767		816	1,28986E+9		
4	-0,34	0,52	-1,3/28991	2,7/-6006	-0,1/32766	1,2/-32767		816	1,28986E+9		
5	-0,33	0,54	-1,6/27461	2,5/-6448	-0,35/32766	1,1/-32767		817	1,28986E+9	0,164439	
6		0,53	-1,4/27399	2,8/-6006	-0,3/32766	1,5/-32767			1,28984E+9	0,16444	
7	-0,34	0,55	-0,8/27461	2,8/-6510	0,2/32766	1,4/-32767			812	1,28996E+9	0,164438
8		0,54	-1,3/23941	2,8/-6504	-0,1/32766	1,2/-32767			811	1,28993E+9	
9		0,53	-1,7/27399	2,5/-6442	-0,7/32766	1,4/-32767				1,28991E+9	0,16444
10	-0,33	0,52	-1,2/27399	3/-6441	0,1/32766	1,4/-32767			811	1,28982E+9	

В заключении приведены основные научные и практические выводы по работе.

1. Проанализированы известные способы определения статических характеристик ЦИМ. Наиболее предпочтительным методом при автоматизации метрологических испытаний ЦИМ ИИС является гистограммный, однако присущие ему недостатки не позволяют использовать его при испытаниях прецизионных ЦИМ.

2. Разработан метод СГ, основанный на анализе каждого интервала квантования испытываемого ЦИМ путем циклического сдвига ОИС по всему динамическому диапазону, с номинальным шагом, соизмеримым с интервалом квантования испытываемого ЦИМ, что заметно снижает влияние нелинейности ОИС и дает возможность повысить точность метрологических испытаний.

3. Получены зависимости, показывающие, что погрешность испытания от нелинейности испытательных сигналов в методе СГ возникает только в том случае, когда имеется совместная нелинейность ОИС и нелинейность его перемещения. Детальный анализ показал, что погрешность в определении статических характеристик испытываемого ЦИМ определяется произведением нелинейности ОИС на нелинейность его перемещения и, следовательно, имеет второй порядок малости.

4. Разработана программно-математическая модель системы метрологического испытания по гистограммному методу и его дальнейшему развитию – методу СГ.

5. Результаты моделирования подтвердили эффективность разработанного метода СГ по сравнению с общепринятым гистограммным методом. Если в

последнем точность измерений INL испытываемого ЦИМ не может превышать INL ОИС, то в методе СГ нелинейность ОИС практически не влияет на точность измерения ФП ЦИМ даже при нелинейности перемещения ОИС, равной ступени квантования.

6. Результаты экспериментальных исследований разработанного метода подтвердили обоснованность теоретических выводов, расчетов и результатов моделирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абрамов А.М. Система метрологического испытания и аттестации статических характеристик прецизионных АЦП по методу «плавающей гистограммы» / А.М. Абрамов, С.Г. Гуржин, Е.М. Прошин // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2006. – С. 21-36.
2. Патент № 2337475 РФ, МПК Н03М 1/10 Способ метрологического испытания и аттестации статических характеристик АЦП и устройство для его осуществления / Е.М. Прошин, С.Г. Гуржин, А.М. Абрамов; Рязанский государственный радиотехнический университет. – заявл. 22.05.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30. – 12 с.
3. Измерительная система терапевтической, диагностической и экологической информации на базе комплекса «Мультимаг-М» / А.М. Абрамов, С.Г. Гуржин, Е.М. Прошин и др. // Материалы докладов XX Всероссийской НТК “Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2007”. – Рязань: РГРТУ, 2007. – С. 63-65.
4. Принципы построения системы контроля и измерения терапевтической, диагностической и экологической информации комплекса «Мультимаг-М» / А.М. Абрамов, С.Г. Гуржин, В.И. Жулев и др. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2007. – № 7. – С. 10-13.
5. Абрамов А.М. Измерение систематической погрешности АЦП на переменном сигнале / А.М. Абрамов, Е.М. Прошин, Г.А. Садовский // Перспективные проекты и технологии. – Рязань, 2008. – Вып. 2. – С. 17-22.
6. Абрамов А.М. Контроль метрологических и технических характеристик аппаратно-программных средств комплекса хрономагнитотерапии «Мультимаг-М» / А.М. Абрамов, С.Г. Гуржин, Е.М. Прошин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2008. – № 7. – С. 29-34.
7. Абрамов А.М. Универсальный микропроцессорный макет в лабораторном практикуме студентов / А.М. Абрамов, А.В. Шуляков // Материалы докладов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи “Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2009”. – Рязань: РГРТУ, 2009. – С. 134-138.
8. Абрамов А.М. Система метрологического испытания и аттестации измерительных модулей на основе компьютерной алгоритмизации прецизионных методик / А.М. Абрамов // I региональный итоговый конкурс «У.М.Н.И.К» – 2010: тез. докл. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С.84-88.

9. Абрамов А.М. Анализ погрешностей метода “скользящей” гистограммы при испытаниях каналов измерения магнитного поля комплекса «Мультимаг-МХ» / А.М. Абрамов // Материалы докладов XXIII Всероссийской НТК “Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2010”. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 184-187.
10. Абрамов А.М. Анализ точности метода “скользящей” гистограммы при испытаниях диагностических каналов в комплексной магнитотерапии / А.М. Абрамов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2010. – № 7. – С. 33-38.
11. Абрамов А.М. Аналитическая оценка эффективной разрядности регистрации слабых низкочастотных сигналов / А.П. Казанцев, А.М. Абрамов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2011. – № 7. – С. 47-53.
12. Абрамов А.М. Моделирование системы метрологического испытания по методу “скользящей” гистограммы в среде LabVIEW / А.М. Абрамов // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2011. – С. 23-38.
13. Комплексная хрономагнитотерапия: методы и средства диагностики и контроля: монография / А.М. Абрамов, В.А. Антипов, А.М. Беркутов и др.; под ред. А.Г. Борисова, С.Г. Гуржина. – М.: Радиотехника, 2011. – 200 с.
14. Абрамов А.М. Моделирование метода “скользящей” гистограммы при испытаниях каналов измерения магнитного поля комплекса «Мультимаг-МХ» / А.М. Абрамов // Материалы докладов XXIV Всероссийской НТК “Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2011”. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 128-131.
15. Компьютерная автоматизация метрологического испытания цифровых измерительных средств / А.М. Абрамов, Е.М. Прошин, А.Г. Борисов и др. // Радиотехника. – 2012. – № 3. – С. 115-122.
16. Абрамов А.М. Экспериментальное определение статических погрешностей АЦП / Г.А. Садовский, А.М. Абрамов, А.Г. Борисов // Радиотехника. – 2012. – № 3. – С. 128-132.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660596. Программа для реализации метода «скользящей» гистограммы / А.М. Абрамов, М.Б. Каплан, Е.М. Прошин; Рязанский государственный радиотехнический университет.

Соискатель



А.М. Абрамов

Абрамов Алексей Михайлович

МЕТОД СКОЛЬЗЯЩЕЙ ГИСТОГРАММЫ
ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ
ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать .10.2013 Формат бумаги 60*84 1/16.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО фирма «Интермета»
390000, Рязань, ул. Семинарская, 3. Тел.: (4912) 25-81-76