

На правах рукописи

Агапов Михаил Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГОНИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КОНТРОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА**

Специальность: 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы
(приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Филатов Ю.В.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Антонюк Е.М.
кандидат технических наук, Кривцов Е.П.

Ведущая организация – ФГУП НПК «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

Защита диссертации состоится « 02 » марта 2009 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « » 2009 года.

Ученый секретарь совета

Боронахин А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Преобразователи угла (ПУ) находят широкое применение в системах навигации, в высокоточном оружии, в информационно-управляющих системах, системах управления подвижных объектов, робототехнике, и во многом определяют функциональные и точностные возможности таких системы. Поэтому к точности ПУ предъявляются очень высокие требования, что определяет необходимость создания современной системы их метрологического обеспечения. Используемое в настоящее время метрологическое обеспечение преобразователей угол-код характеризуется рядом существенных недостатков.

Использующиеся в настоящее время методы контроля точности ПУ (делительные головки, сравнение с эталонной шкалой, задаваемой угловой мерой совместно с автоколлиматором и д.р.) обычно характеризуются малым разрешением, существенными погрешностями, отсутствием возможности автоматизации процесса контроля и высокими трудозатратами. Также используемые методы не обеспечивают контроль погрешности ПУ в режимах движения его ротора, максимально приближенных к условиям эксплуатации, что делает невозможным проведение контроля динамической составляющей погрешности контролируемого ПУ.

Для устранения указанных недостатков необходимо создание автоматизированной системы контроля параметров ПУ в процессе их производства и приемо-сдаточных испытаний, обеспечивающей контроль параметров с высокой точностью в широком диапазоне угловых скоростей, а также при сложном законе движения ротора контролируемого преобразователя.

Целью работы является разработка и исследование гониометрических систем, обеспечивающих контроль точностных параметров преобразователей угла с высокой точностью при сложном законе движение ротора преобразователя в широком диапазоне угловых скоростей.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи исследования**:

- разработка методов повышения точности контроля преобразователей угла с использованием динамических гониометрических систем;

- разработка динамической гониометрической системы, обеспечивающей контроль точностных характеристик преобразователей в широком диапазоне угловых скоростей;
- оценка законов распределения погрешности динамической гониометрической системы и контролируемого преобразователя угла;
- разработка метода оценки динамической погрешности преобразователей угла с использованием динамических гониометрических систем;
- экспериментальная апробация предложенных методов.

Методы исследования и использованная аппаратура. При решении задач, поставленных в работе, широко использовались методы частотного анализа с использованием рядов Фурье, а также методы теории вероятностей и корреляционного анализа. При проведении экспериментальных исследований использовались кольцевые лазеры, а также абсолютные и инкрементные преобразователи угла различного типа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Устранение основных недостатков классической лазерной гониометрической системы (ЛГС), обеспечиваемое использованием процедуры кросс-калибровки и применением в качестве образцовой шкалы инкрементных ПУ, дает возможность эффективно использовать динамические гониометрические системы для контроля параметров ПУ, в том числе в условиях серийного производства последних.

2. Динамическая гониометрическая система позволяет проводить контроль высокоразрядных ПУ с регистрацией генеральной совокупности данных, что дает возможность построения корректной модели погрешности ПУ, которая может быть использована для алгоритмической компенсации погрешности в реальном масштабе времени, а также на этапе проектирования и изготовления ПУ.

3. Основные компоненты ЛГС совместно с интерференционным нуль-индикатором имеют достаточно малую временную задержку выходного сигнала, что позволяет использовать такую систему для оценки динамической погрешности ПУ при сложном законе движения его ротора.

Научная новизна результатов работы.

1. Методы повышения точности ЛГС, позволяющие эффективно определять систематическую погрешность ПУ и основанные на применении процедуры кросс-калибровки в сочетании со спектральным анализом;

2. Результаты исследований систематической погрешности преобразователей угла различного типа;

3. Теоретический анализ закона распределения случайной погрешности динамической гониометрической системы, включающий аналитическое выражение функции плотности вероятности

4. Метод оценки динамической составляющей систематической погрешности преобразователей угла.

Практическую ценность работы составляют:

1. Разработка и практическая реализация динамических гониометрических систем, обеспечивающих контроль точностных характеристик ПУ с высокой точностью в широком диапазоне угловых скоростей;

2. Экспериментальные исследования погрешности СКВТ, позволившие определить ее спектральную модель и снизить результирующую погрешность СКВТ при использовании автокоррекции практически на два порядка;

3. Разработка «дискретных» ДГС, имеющих несколько измерительных осей, каждая из которых предназначена для проведения калибровки ПУ при различных значениях угловой скорости и с различной точностью;

4. Разработка и практическая реализация метода определения достоверности кода ЦПУ;

5. Разработка и практическая реализация метода определения динамической составляющей систематической погрешности преобразователей угла.

Реализация и внедрение результатов работы.

1. Результаты работы использованы при исследовании фотоэлектрических цифровых преобразователей углового положения ПФ-ЛН-К-50-16, изготовленных во ФГУП «ГосНИИАС».

2. Результаты работы использованы при исследовании фотоэлектрических преобразователей угла ПФ – ЛН – К – 16, изготовленных ЗАО «Ривас» в рамках ОКР «Комета-1».

3. Для ОАО «Авангард» создан прибор ПИЖМ.401229.001, обеспечивающий контроль ряда 8...19-разрядных фотоэлектрических цифровых преобразователей угла, проведены его успешные испытания для целей утверждения типа средства измерений.

4. В СПбГЭТУ разработана гониометрическая установка ГУ1 (рабочий эталон единицы плоского угла ВЭТ 94-04-04), использованная при создании преобразователей угол-код на основе СКВТ в рамках совместной с ФГУП ЦНИИ «Электроприбор» НИР «Исследование точностных характеристик преобразователей угол-код с автокоррекцией погрешности».

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных конференциях и симпозиумах, которые указаны ниже.

- Международный симпозиум по гироскопическим технологиям (Int. Symposium Gyro Technology), сентябрь, 2007, Карлсруэ, Германия.
- Международный симпозиум по оптической метрологии (Int. symposium optical metrology), – июнь, 2003, Мюнхен, Германия.
- Всероссийская научно-техническая конференция «Лазеры, измерения, информация» (2000 - 2002), Санкт-Петербург, БГТУ, Россия.
- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (2001, 2003, 2004, 2006), Санкт-Петербург, Россия.
- Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета (ЛЭТИ) (2001 – 2008), Санкт-Петербург, Россия.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 11 статьях и докладах, среди которых 1 публикация в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, а также 3 статьи в других изданиях. 7 докладов были доложены и получили одобрение на международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения. Она изложена на 139 страницах машинописного

текста, включает 59 рисунков, 7 таблиц и содержит список литературы из 43 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, цель и задачи исследования, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе диссертации на основе анализа существующей литературы выделены основные типы современных ПУ, сформирован перечень их основных характеристик, определение которых должна обеспечивать система контроля ПУ. Также кратко описаны используемые в настоящее время основные методы контроля точностных характеристик ПУ.

Показано, что применяющиеся методы контроля точности ПУ обычно характеризуются малым разрешением, существенными погрешностями, отсутствием возможности автоматизации процесса контроля и высокими трудозатратами, а в ряде случаев не способны обеспечить контроль всех необходимых характеристик современных ПУ. Также используемые методы не обеспечивают контроль погрешности ПУ в режимах движения его ротора, максимально приближенных к условиям эксплуатации, что делает невозможным проведение контроля динамической составляющей погрешности поверяемого ПУ.

Далее показано, что указанные проблемы могут быть успешно решены при использовании в качестве измерительной системы контроля точностных параметров ПУ лазерного динамического гониометра.

Вторая глава диссертации посвящена разработке и исследованию динамических гониометрических систем на основе лазерного динамического гониометра, предназначенных для контроля точностных параметров современных преобразователей угла. В процессе контроля ПУ необходимо оценивать следующие параметры: информационная ёмкость; монотонность следования значений кода; погрешность угловых координат смены значений кода; достоверность кода в статическом и динамическом режимах; динамическая погрешность.

При использовании для контроля ЦПУ классической ЛГС ротор контролируемого ПУ вращается вместе с кольцевым лазером (КЛ) с квазипостоянной скоростью. Сигналы с выхода КЛ и ЦПУ поступают на устройство обработки информации, где производится сравнение их шкал

посредством заполнения интервалов, формируемых выходным сигналом ЦПУ, выходным сигналом КЛ. Высокая разрешающая способность КЛ позволяет проводить контроль высокоразрядных ЦПУ с регистрацией генеральной совокупности данных, дающих полное представление о характеристиках контролируемого ЦПУ. При использовании в ЛГС схем интерполяции разрядность контролируемых ЦПУ может достигать 24...26 разрядов. Таким образом, использование ЛГС создает предпосылки для определения параметров ЦПУ, указанных выше. В то же время, классическая схема ЛГС обладает рядом существенных недостатков:

1. При проведении калибровки ЦПУ не используется возможность определения и последующей компенсации собственной систематической погрешности ЛГС.

2. В процессе калибровки ЦПУ не учитывается (не компенсируется) погрешность, обусловленная наличием муфты, связывающей валы ЦПУ и ЛГС.

3. КЛ является инерциальным чувствительным элементом, что приводит к появлению дополнительной погрешности, обусловленной вращением Земли при наличии нестабильности скорости вращения вала ЛГС.

4. Использование КЛ в качестве образцового преобразователя угла обеспечивает проведение калибровки ПУ в малом диапазоне скоростей вращения.

Устранение указанных недостатков требует развития методов лазерной динамической гониометрии при калибровке ПУ. При использовании ЛГС для контроля ЦПУ, кроме систематических составляющих погрешностей КЛ и ЦПУ, в измерительной системе имеют место систематические погрешности, обусловленные особенностями работы самой системы. В ЛГС для контроля ПУ важную роль играют компоненты систематической погрешности, обусловленные биениями оси вращения ЛГС, качеством муфты, связывающей вал ЛГС с ротором калибруемого ПУ, неточностью установки ротора ПУ относительно вала ЛГС. Погрешности такого рода могут достигать уровня единиц и даже десятков угловых секунд и должны быть учтены при проведении измерений. Для их определения может эффективно использоваться метод кросс-калибровки.

Применение метода кросс-калибровки в задаче увеличения точности ЛГС сводится к проведению последовательных разворотов статора

калибруемого ПУ относительно основания ЛГС с последующим статистическим и гармоническим анализом полученных результатов измерения угла, что позволяет определить систематические погрешности, как калибруемого преобразователя, так и КЛ вместе с систематической погрешностью самой системы.

На рисунке 1 представлен пример полученных систематических погрешностей ЛГС и ПУ. При этом полученная погрешность ПУ свободна от погрешности измерительной системы.

Аналогичным образом определяется и исключается из результатов измерений и погрешность соединительной муфты, сопрягающей ротор контролируемого ПУ с валом ЛГС.

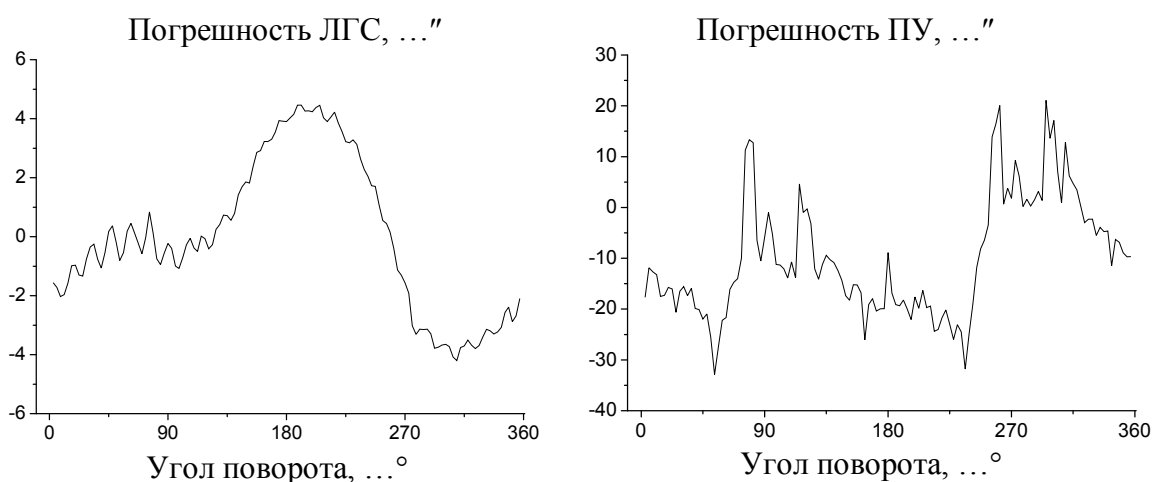


Рисунок 1 – Результаты применения процедуры кросс-калибровки

Как было указано выше, некоторые недостатки классической схемы ЛГС связаны с использованием в качестве образцового преобразователя угла КЛ. Для устранения указанных недостатков была разработана динамическая гониометрическая система (ДГС) для контроля ПУ, в которой в качестве образцового преобразователя угла (ОПУ), используется инкрементный ПУ. Инкрементные преобразователи, например, фотоэлектрического типа, имеют сравнительно большую систематическую погрешность, поэтому целесообразно производить их предварительную калибровку с помощью КЛ. Результатом такой калибровки является зависимость систематической погрешности ОПУ от угла поворота вала ДГС. Затем данная зависимость используется в виде поправки в результатах измерения угла

гонометрической системой. Результаты такой калибровки приведены на рисунке 2.

Использование данного подхода обеспечивает точностные характеристики ДГС сопоставимые с ЛГС, но при этом создает возможность работы в существенно большем диапазоне угловых скоростей. Разработанная ДГС с ОПУ на основе фотоэлектрического ПУ голографического типа ПКГ-105М была использована в качестве средства повышения точности ПУ на основе СКВТ за счет реализации автокоррекции погрешности, алгоритм которой основан на знании её модели. Погрешность СКВТ, имеет широкий спектр и высокие пространственные частоты гармоник, для определения которых требуется проводить измерения погрешности в большом числе точек на обороте для корректного определения параметров гармоник.

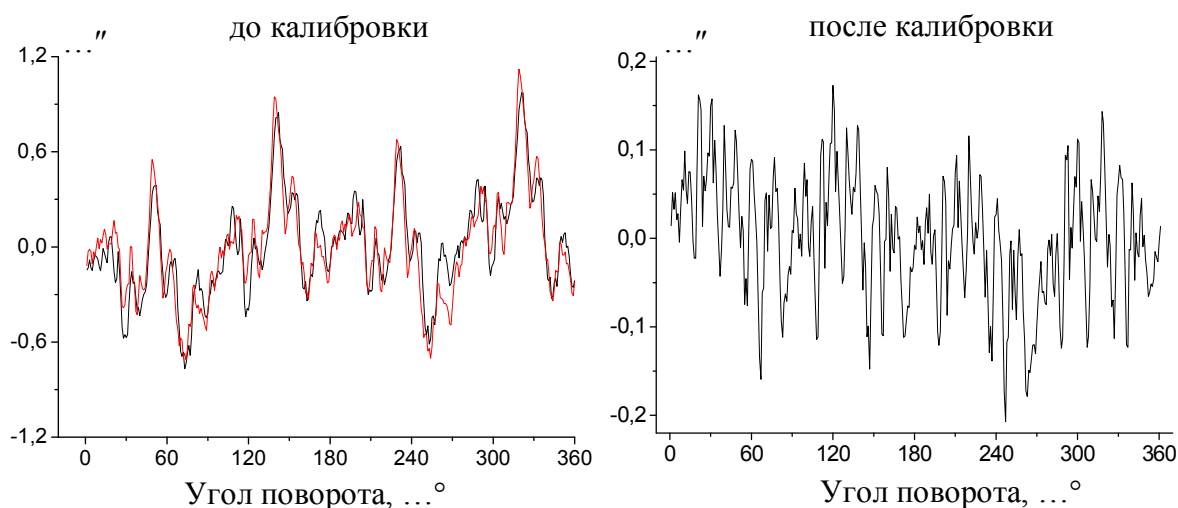


Рисунок 2 – Систематическая погрешность ОПУ

В результате использования ДГС для оценки погрешности СКВТ была определена величина погрешности и найдена ее спектральная модель, которая затем была использована для реализации автокоррекции СКВТ, что снизило результирующую погрешность ПУ практически на два порядка. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 3.

В ряде случаев разработчики ЦПУ ставят задачу создания метрологического обеспечения нескольких типов ЦПУ с погрешностями от десятков до сотен угловых секунд и с диапазоном угловых скоростей до 100 об/с. При разработке ДГС, решающей такую задачу, возникает противоречие – с одной стороны необходимо обеспечить точность измерений на уровне

угловой секунды, а с другой – диапазон рабочих угловых скоростей в десятки и сотни оборотов в секунду. Данная задача успешно решается путем проведения разделения контролируемых ПУ по диапазонам рабочих угловых скоростей и построения «дискретных» ДГС, имеющих несколько измерительных осей, каждая из которых предназначена для проведения калибровки ПУ при различных значениях угловой скорости и с различной точностью.

В работе проведена разработка такой системы, обеспечивающей контроль точностных характеристик ПУ с погрешностью 81,8" в диапазоне

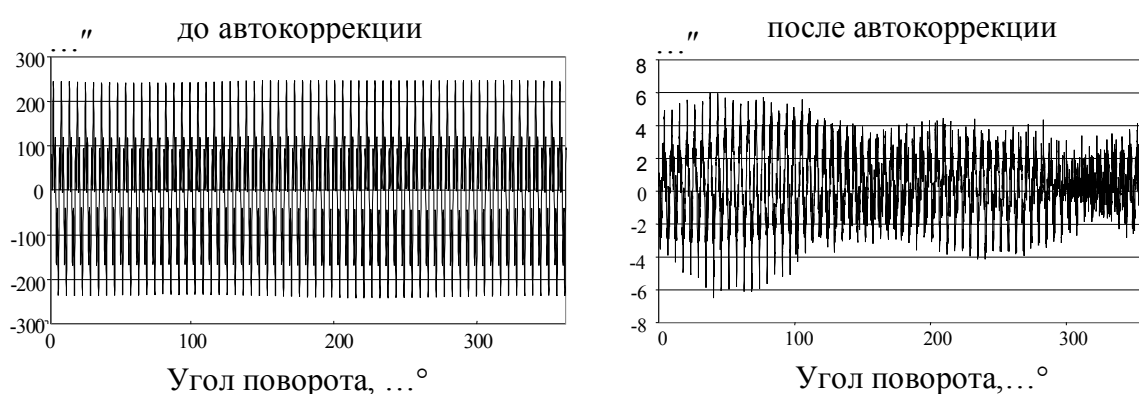


Рисунок 3 – Погрешность СКВТ при реализации режима автокоррекции

угловых скоростей 1...100 об/с и 2,7" в диапазоне угловых скоростей 0,03...10 об/с.

Третья глава посвящена определению с помощью ЛГС достоверности кода ЦПУ. Для оценки влияния точности измерений угла с помощью ЦПУ необходимо использовать критерий, учитывающий влияние информационной ёмкости и достоверности кода. Информационная ёмкость определяется выражением $n = \log N$, где N - число различных дискретных значений q угла в диапазоне изменения угловой величины при произвольном законе распределения её вероятностей и определяет потенциальные точностные возможности ЦПУ. Численное значение достоверности кода $P(E)$ определяется, исходя из закона распределения вероятностей полной погрешности E , и может быть вычислено как

$$P(E) = \int_{-0.5q}^{0.5q} f(e)de \left[1 - \int_{-1.5q}^{-0.5q} f(e)de \right] \left[1 - \int_{0.5q}^{1.5q} f(e)de \right], \text{ где } f(e) - \text{ дифференциальный}$$

закон распределения вероятностей полной погрешности преобразования [1].

Для экспериментального определения закона распределения погрешности ЦПУ необходимо быть уверенным в том, что используемый инструмент (в нашем случае ЛГС) имеет случайную погрешность на порядок меньше исследуемой, а также желательно знать закон распределения вероятностей случайной погрешности ЛГС.

Было проведено статистическое исследование случайных погрешностей результатов измерения угла ЛГС. Для проведения статистического анализа использовалась формула измерений

$$\varphi = 2\pi \frac{N_\varphi}{N_{2\pi}}, \quad (1)$$

где N_φ - число периодов выходного сигнала КЛ в интервале времени $t = t_\varphi$, формируемом измеряемым углом φ , а $N_{2\pi}$ - число периодов за полный оборот вала ЛГС $t=T$ (T - период оборота). Было показано, что двумерное распределение $f_2(N_\varphi, N_{2\pi})$ результатов N_φ и $N_{2\pi}$ можно считать нормальным, поэтому оно может быть определено с использованием стандартных выражений. Анализ формулы измерений (1) показывает, что функция распределения $f(\varphi)$ единичного результата измерения угла может быть выражена через двумерную функцию распределения $f_2(N_\varphi, N_{2\pi})$ результатов измерений N_φ и $N_{2\pi}$ в виде

$$f(s) = \frac{\sqrt{1-R^2}}{\pi} \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 - 2R\sigma_1\sigma_2s + \sigma_2^2s^2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-R^2)\sigma_1^2\sigma_2^2} \left| a_1^2\sigma_1^2 - 2Ra_1a_2\sigma_1\sigma_2 + a_2^2\sigma_2^2 \right|\right\} \times \left[1 + \sqrt{2\pi} z e^{\frac{z^2}{2}} \Phi_0(z) \right] \quad (2)$$

где $s = \varphi/2\pi = N_\varphi / N_{2\pi}$ (результат измерения в полных оборотах вала),

$$z = \frac{a_2\sigma_1^2 - ra_1\sigma_1\sigma_2 + a_1\sigma_2^2s - ra_2\sigma_1\sigma_2s}{\sigma_1\sigma_2\sqrt{(1-r^2)(\sigma_1^2 - 2r\sigma_1\sigma_2s + \sigma_2^2s^2)}}, \quad \Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \text{ функция}$$

Лапласа, $K = N_{2\pi}/2\pi$ - масштабный коэффициент КЛ.

В прецизионной лазерной гониометрии всегда реализуется предельный случай очень малых флуктуаций $\sigma_1, \sigma_2 \ll N_\varphi, N_{2\pi}$ и для единичного результата измерения угла, учитывая, что измерения проводятся на ограниченном угловом интервале 2π , распределение сводится к намотанному нормальному распределению, плотность которого можно вычислять при помощи ζ - функций

$$f(\varphi) = (2\pi)^{-1} \zeta_3(\varphi - \langle \varphi \rangle, \rho),$$

где $\rho = \exp(-D_\varphi)$, а значения $\zeta_3(\frac{1}{2} \text{acc} \cos x, \rho)$ табулированы. В предельном случае $\sqrt{D_\varphi}/\varphi \ll 1$ по-прежнему можно пользоваться стандартным нормальным распределением.

Параметрическая зависимость плотности распределения вероятности от значения измеряемого угла представлена на рисунке 4.

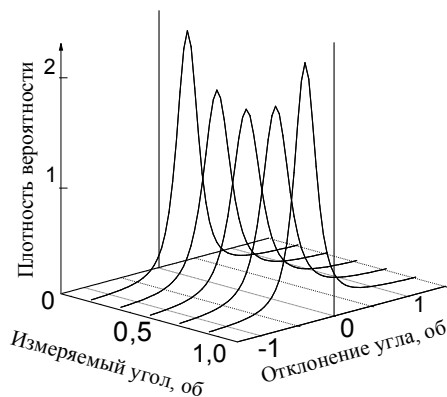


Рисунок 4 - Параметрическая зависимость плотности распределения вероятности от значения измеряемого угла

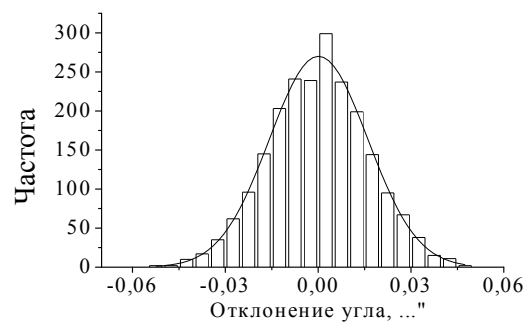


Рисунок 5 - Аппроксимация гистограммы гауссовой кривой

Проведенные исследования показали, что ЛГС можно характеризовать как измерительную систему с весьма малой величиной случайной погрешности. В качестве примера на рисунке 5 приведена гистограмма результатов измерений ЛГС, из которой следует, что среднее квадратическое отклонение результата измерения угла находится на уровне нескольких сотых угловой секунды. В этом случае выполняются условия $\sqrt{D_\varphi}/\varphi \ll 1$ малых флуктуаций результата измерения, и распределение полностью совпадает с распределением Гаусса.

Полученные результаты подтверждают обоснованность использования ЛГС для контроля достоверности кода ПУ. На основе полученных результатов были проведены расчеты достоверности кода для некоторых моделей одноплатных 14-разрядных ЦПУ, отличающихся лишь набором логических схем, на которых реализованы их электрические схемы.

Четвертая глава посвящена оценке динамической погрешности ПУ - систематической составляющей погрешности ПУ, зависящей от характера движения его ротора. Эта погрешность проявляется при функционировании ПУ в реальных режимах работы, поэтому определение динамической погрешности ПУ является важной измерительной задачей.

В работе предложен метод определения динамической погрешности на установке, представляющей собой классическую ЛГС, с той лишь разницей, что моменты съёма информации формируются совместно нуль-индикатором (НИ) и ПУ. Временная диаграмма работы такой системы приведена на рисунке 6. Определение динамической погрешности ПУ производится по данным, содержащимся в интервале II, формируемом импульсом НИ и ближайшим импульсом контролируемого ПУ.

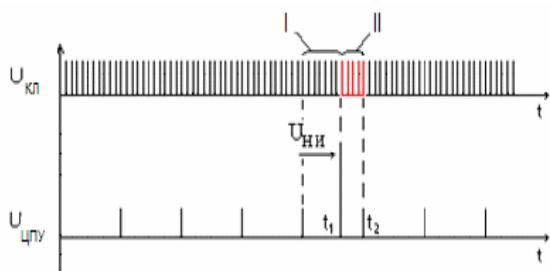


Рисунок 6 - Принцип формирования экспериментальных данных

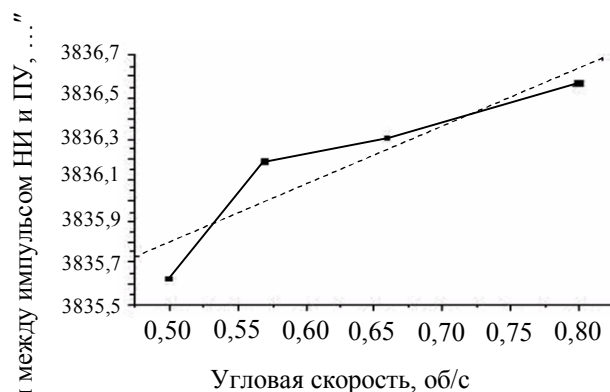


Рисунок 7 – К определению динамической погрешности ЦПУ

При проведении измерений предполагается, что временные задержки в каналах формирования сигналов НИ, КЛ и ПУ постоянны. Временные задержки в каналах формирователей сигналов НИ и КЛ равны

$\tau_{НИ} = 0.05$ мкс, $\tau_{КЛ} = 0.08$ мкс и пренебрежительно малы по отношению к временной задержке в канале формирования сигнала ПУ;

Первая граница угла формируется НИ с временной задержкой $\tau_{НИ}$. Этому моменту соответствует отсчёт гониометра

$$\theta(t_1) = \dot{\theta}(t_1) \cdot (t_1 + \tau_{НИ} + \tau_{КЛ}) \quad (3)$$

Вторую границу угла формирует импульс ПУ с задержкой $\tau_{ПУ}$. Этому моменту соответствует отсчёт

$$\theta(t_2) = \dot{\theta}(t_2) \cdot (t_2 + \tau_{ПУ} + \tau_{КЛ}). \quad (4)$$

Тогда результат измерения угла с учётом (3) и (4) получаем в виде $\tilde{\varphi} = \theta(t_2) - \theta(t_1) = \dot{\theta}(t_2) \cdot t_2 - \dot{\theta}(t_1) \cdot t_1 + [\dot{\theta}(t_2) \cdot (\tau_{ПУ} + \tau_{КЛ}) - \dot{\theta}(t_1) \cdot (\tau_{НИ} + \tau_{КЛ})]$.

А динамическая погрешность измерения определяется выражением:

$$\Delta_{\varphi}^{din} = \tilde{\varphi} - \varphi = \dot{\theta}(t_2) \cdot (\tau_{ПУ} + \tau_{КЛ}) - \dot{\theta}(t_1) \cdot (\tau_{НИ} + \tau_{КЛ}).$$

Используя свойство равномерного вращения $\dot{\theta}(t_2) = \dot{\theta}(t_1) = \dot{\theta}$ и предполагая, что $\tau_{ПУ} \gg \tau_{НИ}$ получаем следующее выражение для динамической погрешности ПУ

$$\Delta_{\varphi}^{din} \approx \dot{\theta} \cdot \tau_{ПУ}. \quad (5)$$

Исходя из связи динамической погрешности Δ_{φ}^{din} измерений угла с временной задержкой сигнала в канале формирования импульсов ПУ $\tau_{ПУ}$ (5), можно схематически представить зависимость Δ_{φ}^{din} от угловой скорости вращения $\dot{\theta}$ ротора ЛДГ в виде линейной зависимости. Получение такой зависимости в результате проведения эксперимента позволяет оценить время задержки $\tau_{ПУ}$ и соответствующую динамическую погрешность.

Были проведены соответствующие эксперименты. На рисунке 7 приведены результаты проведенных измерений и их аппроксимация линейной регрессией вида $y = a + bx$ (пунктирная прямая).

В работе приведены экспериментальные данные, полученные при определении динамической погрешности как инкрементных, так и абсолютных преобразователей угла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Разработано семейство ДГС, обеспечивающее получение генеральной совокупности значений погрешности контролируемого ПУ,

контроль точностных параметров ПУ с высокой точностью в широком диапазоне угловых скоростей, обладающее высоким уровнем автоматизации, что делает возможным использование подобных измерительных систем в процессе разработки и серийном производстве ПУ;

2. Получены аналитические выражения функции плотности распределения единичного результата измерения ЛГС, анализ которых показал, что закон распределения случайной погрешности измерений угла ЛГС соответствует нормальному;

3. На основе разработанного метода проведена оценка достоверности кода ЦПУ;

4. Разработан метод оценки динамической погрешности ПУ, обеспечивающий контроль этого вида погрешности, как инкрементных, так и абсолютных ПУ;

Цитированная литература

1. Оценка точности цифрового преобразователя угла выборочным методом / В.Г. Домрачев, Б.С. Мейко, А.Г. Сапегин // Измерительная техника. – 1983. – №5. – С.21-23.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Агапов М.Ю. Разработка и исследование динамических гониометров на основе оптических датчиков угла для контроля цифровых преобразователей «угол - код» / Агапов М.Ю., Бохман Е.Д., Бурнашев М.Н., Лукьянов Д.П., Миронов А.В., Павлов П.А., Сушко Д.С., Филатов Ю.В. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета). – 2004. – №1. – С. 29-39.

Другие статьи и материалы конференций:

2. M. Yu. Agapov. Errors of measurements by laser goniometer / M. Yu. Agapov, M. N. Bournashev // International Conference on Lasers for Measurements and Information Transfer, Vadim E. Privalov, editors, Proceedings of SPIE. – 2000. – Vol. 4316. – P. 26-30.

3. Agapov M.Y. Calibration of the multichannel sensor of a plane angle in dynamic and static modes / Agapov M.Y., Mironov A.V., Lukianov D.P., Filatov Y.V., Burnashev M.N. // Second International Conference on Lasers for

Measurements and Information Transfer, Vadim E. Privalov, editors, Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4680. – P. 66-71.

4. Agapov M.Y. Laser goniometer systems for dynamic calibration of optical encoders / Agapov M.Y., Filatov Y.V., Burnashev M.N. // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III, Wolfgang Osten, editors, Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5144. – P. 381-390.

5. Agapov M.Y. Ring laser gyro systems for dynamic calibration of angular optical encoder / Y.V. Filatov, M.Y. Agapov, D.P. Loukianov, P.A. Pavlov, M.N. Burnashev // Proceedings of Symposium Gyro Technology 2003, Stuttgart, Germany. – 2003. – P. 18.10-18.17.

6. Агапов М.Ю. Аттестация высокоразрядных датчиков угла / Навигация и управление движением: материалы докладов V конференции молодых ученых "Навигация и управление движением". Науч. редактор д.т.н. О.А. Степанов. Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2004. – С. 173-177.

7. М.Ю. Агапов. Теория измерений. Методические указания к индивидуальным заданиям по одноименной дисциплине / М.Ю.Агапов, М.Н. Бурнашев // – СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2005. – 23 с.

8. М.Ю. Агапов. Исследование характеристик стенда АС 1120 Е фирмы «Acutronic» / М.Ю.Агапов, Е.Д. Бохман, М.Н.Бурнашев, Н.В.Гончаров // Навигация и управление движением: Материалы докладов VIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Науч. редактор д.т.н. О.А. Степанов. Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2007. – С. 252-256.

9. M. Agapov. Measurement of angle movement parameters by means of ring laser goniometer / M. Agapov, E. Bohkman, M. Bournachev, Y. Filatov, N. Goncharov, D. Loukianov, P. Pavlov // Proceedings of Symposium Gyro Technology 2007, Karlsruhe, Germany. – 2007. – P. 20.1-20.18.

10. Агапов М.Ю. Измерение параметров углового движения сканирующего зеркала / Агапов М.Ю., Бачиш Е.А., Бохман Е.Д., Павлов П.А. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета). – 2007. – №1. – С. 52-58.

11. Агапов М.Ю. Лазерные гониометрические системы для калибровки преобразователей угла / Агапов М.Ю., Бурнашев М.Н., Павлов П.А., Филатов Ю.В. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета). – 2008. – №3. – С. 55-63.