

На правах рукописи

Баринаева Евгения Анатольевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ  
ТОЧНОСТИ ГОНИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание учёной степени**  
**кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2009

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

Научный руководитель –  
доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Павлов Пётр Алексеевич

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ  
Цветков Эрик Иванович  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Суслов Геннадий Петрович

Ведущая организация – ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «22» декабря 2009 г. в 14 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «    » ноября 2009 г.

Учёный секретарь совета,  
к.т.н., доцент

Боронахин А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современный уровень развития приборостроения, машиностроения, физического эксперимента и других областей науки и техники предъявляет высокие требования к точности угловых измерений.

В настоящее время новые промышленные технологии выдвигают задачу прецизионного высокоскоростного измерения параметров сложного углового движения самых разнообразных объектов, к числу которых можно отнести гиостабилизированные системы, многоосные испытательные стенды, оптические сканирующие зеркала, большие следящие антенные системы и т.п. Широкое распространение получили преобразователи угла, работающие в большом динамическом диапазоне, имеющие разрешение и точность на уровне единиц и долей угловой секунды. Возникает необходимость расширения парка рабочих эталонов с новыми метрологическими возможностями, позволяющими оптимизировать передачу размера единицы угла рабочим средствам.

Средствами прецизионных угловых измерений, которые позволяют эффективно решать вышеперечисленные задачи, являются т.н. лазерные гониометрические системы, использующие фундаментальные свойства лазера с кольцевым резонатором [1,2]. Потенциальные возможности современной лазерной динамической гониометрии определяются квантовыми флуктуациями выходного сигнала кольцевого лазера (КЛ) и составляют величину порядка тысячных долей угловой секунды. Высокие точностные характеристики могут быть достигнуты также углоизмерительными системами на базе оптических датчиков угла (ОДУ). Перспективными с точки зрения точностных характеристик и функциональных возможностей являются гониометрические системы, использующие принцип комплексирования двух преобразователей угла – кольцевого лазера и оптического датчика угла, в основу работы которых положены принципиально различные физические эффекты [2]. Примерами таких систем в России являются эталон единицы плоского угла при угловом перемещении твердого тела (ГЭТ 94-01) и измерительно-вычислительный комплекс «УППУ-1»[2]. Погрешность этих средств измерений находится на уровне 0,05". При калибровке призматических мер плоского угла погрешность измерения увеличивается, что обусловлено погрешностями устройств фиксации углового положения меры – автоколлиматорами (в статическом режиме работы) и оптическими нуль-индикаторами (в режиме углового перемещения).

Дальнейшее повышение точности современных гониометрических систем возможно как совершенствованием технических средств, так и совершенствованием методов измерений, алгоритмов вычислений. Первый путь

связан с разработкой новых технических средств, совершенствованием технологий и т.д., и требует больших материальных затрат. Второй путь позволяет достичь поставленной цели менее затратными, но не менее эффективными средствами за счет детального исследования погрешностей гониометрических систем, разработки методов их уменьшения.

**Целью работы** является разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем, реализованных на базе кольцевого лазера и/или оптического датчика угла.

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

- исследование погрешностей фазо-временного метода измерений в лазерной гониометрии, обусловленных нестабильностью скорости вращения КЛ;
- исследование случайной и систематической погрешностей КЛ и ОДУ;
- разработка метода уменьшения случайных погрешностей КЛ и ОДУ;
- разработка метода повышения точности лазерной гониометрической системы, включающей КЛ и интерференционный нуль-индикатор (НИ);
- разработка метода уменьшения погрешностей автоколлиматоров, используемых в высокоточных гониометрических системах для фиксации угловых положений;
- экспериментальная апробация предложенных методов.

**Методы исследований** включают в себя аппарат теории математической статистики, методы частотного анализа с использованием рядов Фурье, методы спектрального анализа, инженерно-физический эксперимент.

**На защиту выносятся:**

1. Метод, реализуемый при одновременном съеме данных с кольцевого лазера и двух считывающих головок оптического датчика угла при синхронизации съема сигналами одной из головок ОДУ, позволяет определять случайные погрешности обоих преобразователей угла независимо от источников шумов, присутствующих в гониометрической системе.

2. Метод выставки интерференционного нуль-индикатора, основанный на изменении фазы его систематической погрешности, сосредоточенной на первой гармонике частоты вращения, позволяет уменьшить систематическую погрешность лазерного динамического гониометра.

3. Метод, основанный на процедуре относительных разворотов, позволяет определять перекрёстные систематические погрешности автоколлиматора и средства задания малых угловых перемещений.

**Научная новизна.** В процессе проведения исследований получены новые научные результаты:

- Разработан метод исследований случайных погрешностей КЛ и ОДУ, позволяющий определять случайную погрешность каждого из преобразователей угла при их совместной работе, реализуемый при одновременном съеме данных с КЛ и двух головок ОДУ при синхронизации съема сигналами одной из головок ОДУ.

- Разработан метод повышения точности лазерного динамического гониометра, основанный на компенсации систематической погрешности входящего в его состав интерференционного нуля-индикатора.

- Получены аналитические выражения неисключенной систематической погрешности фазо-временного метода измерений в лазерной гониометрии и оценки этой составляющей погрешности в результате математическое моделирование.

- Разработан метод определения перекрёстных систематических погрешностей прецизионного автоколлиматора и средства задания малых угловых перемещений, основанный на процедуре разворотов.

**Практическая ценность работы состоит в том, что:**

1. Разработан и практически реализован метод исследований случайных погрешностей КЛ и ОДУ, позволяющий определять случайные погрешности каждого из преобразователей угла при их комплексировании в гониометрических системах.

2. Получены оценки воспроизводимости систематических погрешностей КЛ и ОДУ, предназначенные для использования при разработке и проектировании высокоточных гониометрических систем.

3. Предложены методы уменьшения дополнительных источников погрешностей, обусловленных влиянием характера движения ротора на КЛ и ОДУ, предназначенные для использования при отладке и исследованиях гониометрических систем, а также для оценки их метрологических характеристик.

4. Разработан и практически реализован метод, позволяющий выставлять измерительную плоскость интерференционного НИ.

5. Разработан и практически реализован метод, позволяющий определять перекрёстные систематические погрешности автоколлиматора.

### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Теоретические положения, методы и результаты исследований диссертации использованы:

- в ОКР "Разработка оптоэлектронной измерительной системы военного эталона плоского угла ВЭ-35" для МО РФ, шифр «Аксоль-ВЭ-35/1»;
- при создании лазерного динамического гониометра ДГ-03Л в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»;
- при создании нуль-индикатора, входящего в состав системы измерения углового положения сканирующего зеркала, для СКБ КП института космических исследований РАН;
- при исследованиях погрешностей автоколлиматоров в национальном метрологическом институте Германии (РТВ).

**Апробация.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная конференция европейского научного сообщества по высокоточной технике и нанотехнологиям (EUSPEN Int. Conference), май 2007, Бремен, Германия.
- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (2006 – 2009), Санкт-Петербург, Россия.
- Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ) (2007 – 2009), Санкт-Петербург, Россия.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации изложены в 10 публикациях, среди которых 1 научная статья в ведущем рецензируемом издании, рекомендованном в действующем перечне ВАК, 2 статьи в других изданиях, 7 – в научных сборниках и трудах российских и международных конференций.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав с выводами и заключения. Она изложена на 163 страницах машинописного текста, включает 55 рисунков, 14 таблиц и содержит список литературы из 63 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, научные и практические результаты и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** сделан обзор и анализ методов и средств высокоточных угловых измерений.

Измерение углов гониометрическим методом осуществляется путём их сравнения с точно градуированным лимбом (круговой шкалой), который реализуется разбиением естественного эталона  $2\pi$  радиан на равные угловые интервалы.

Проведенный анализ существующих высокоточных углоизмерительных систем показал, что наиболее перспективными с точки зрения точностных характеристик, разрешения и возможности работы в автоматическом режиме являются гониометрические системы, круговая шкала которых реализуется на базе оптических датчиков угла и/или кольцевых лазеров. В случае калибровки призматических мер плоского угла для фиксации угловых интервалов в статическом режиме работы наиболее распространенными средствами измерений являются автоколлиматоры. Для фиксации угловых интервалов в случае вращающейся круговой шкалы используются устройства, созданные специально для работы в динамическом режиме – интерференционные нуль-индикаторы.

Повышение точности гониометрических систем достигается использованием методов определения и компенсации систематических погрешностей круговых шкал. Широкое распространение получили методы, реализованные на базе естественного эталона  $2\pi$  радиан – методы автокалибровки и кросс-калибровки [3]. Классическая реализация метода кросс-калибровки предполагает, что число отметок лимбов, подлежащих аттестации, соответствует числу равномерных разворотов одного лимба относительно другого. Широкое распространение оптических датчиков угла, имеющих большое количество меток (свыше тысячи на обороте), привело к развитию методов определения систематических погрешностей круговых шкал путем совместного использования авто– или кросс-калибровки с гармоническим Фурье анализом [4,5].

**Глава 2** посвящена методам исследования погрешностей угловых шкал, реализуемых оптическим датчиком угла (ОДУ) и кольцевым лазером (КЛ).

Предложен метод исследования случайных погрешностей КЛ и ОДУ, имеющего две и более считывающих головки. Метод реализуется при одновременном съёме данных, осуществляемом КЛ и двумя головками ОДУ, который выполняется через равные угловые интервалы и синхронизируется сигналами одной головки ОДУ.

В течение  $M$  оборотов вала гониометрической системы с закрепленными на нем преобразователями угла, КЛ и двумя считывающими головками ОДУ измеряются углы его поворота:  $\varphi_{im}^{КЛ}$ ,  $\varphi_{im}^{ОДУ1}$  и  $\varphi_{im}^{ОДУ2}$ , где  $i$  – номер измерения внутри оборота;  $m$  – номер оборота. Далее находится разность результатов измерений,

полученных с двух головок ОДУ  $\Delta\varphi_{im}^{\partial}$  (канал обработки 1), а также с КЛ и синхронизирующей головки ОДУ  $\Delta\varphi_{im}^c$  (канал обработки 2):

$$\Delta\varphi_{im}^{\partial} = \varphi_{im}^{\text{ОДУ2}} - \varphi_{im}^{\text{ОДУ1}}; \quad \Delta\varphi_{im}^c = \varphi_{im}^{\text{КЛ}} - \varphi_{im}^{\text{ОДУ1}}.$$

Для каждого оборота  $m$  формируется массив случайных величин:

$$\delta\varphi_{im}^{\partial} = \Delta\varphi_{im}^{\partial} - \overline{\varphi}_i^{\partial}; \quad \delta\varphi_{im}^c = \Delta\varphi_{im}^c - \overline{\varphi}_i^c,$$

$$\text{где } \Delta\overline{\varphi}_i^{\partial} = \frac{1}{M} \sum_1^M \Delta\varphi_{im}^{\partial}; \quad \Delta\overline{\varphi}_i^c = \frac{1}{M} \sum_1^M \varphi_{im}^c.$$

Так как синхронизация съёма данных осуществляется головкой ОДУ, то случайная погрешность в канале 2 обусловлена как случайной погрешностью КЛ, так и погрешностью ОДУ, а случайная погрешность в канале 1 включает случайные погрешности двух считывающих головок. В каждом из каналов обработки определяются оценки спектральной плотностью мощности:  $G^{\partial}(f)$  и  $G^c(f)$ . В силу различной природы формирования угловых шкал ОДУ и КЛ, можно считать, что происходящие в них случайные процессы некоррелированы. Спектральная плотность, характеризующая случайную погрешность в канале 1, может быть представлена в виде суммы спектральных плотностей двух считывающих головок:  $G^{\text{ОДУ2}}(f) + G^{\text{ОДУ1}}(f) = G^{\partial}(f)$ , а спектральная плотность, характеризующая случайную погрешность в канале 2 - в виде суммы спектральных плотностей КЛ и синхронизирующей головки ОДУ:  $G^{\text{КЛ}}(f) + G^{\text{ОДУ1}}(f) = G^c(f)$ .

Исходя из физических соображений и конструктивных особенностей ОДУ, считаем, что  $G^{\text{ОДУ2}}(f) = G^{\text{ОДУ1}}(f)$ . Тогда спектральная плотность, характеризующая погрешность КЛ находится следующим образом:

$$G^{\text{КЛ}}(f) = G^c(f) - \frac{1}{2}G^{\partial}(f),$$

а спектральная плотность, характеризующая погрешность одной головки ОДУ:

$$G^{\text{ОДУ1}}(f) = G^{\text{ОДУ2}}(f) = \frac{1}{2}G^{\partial}(f).$$

Знание спектральной плотности мощности даёт возможность выявления источников случайной погрешности преобразователей угла.

На рисунке 1 представлены графики, полученные по результатам экспериментальных исследований случайных погрешностей преобразователей угла, в качестве которых использовались КЛ типа ГЛ-1 и ОДУ типа ПКГ-105М. Анализ графиков  $G^{\text{КЛ}}(f)$  и  $G^{\text{ОДУ1}}(f)$ , полученных согласно описанному выше

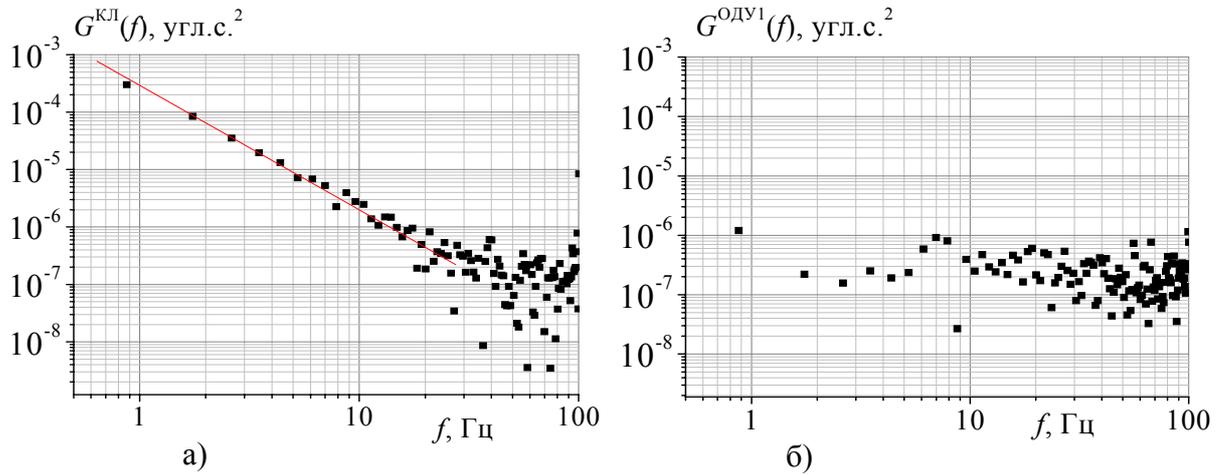


Рисунок 1 – Спектральная плотность мощности шума КЛ (а) и ОДУ (б)

методу исследования случайных погрешностей КЛ и ОДУ, показал, что случайная погрешность ОДУ носит характер белого шума, а основным источником случайной погрешности КЛ является случайный дрейф, который возникает вследствие интегрирования белого шума. Белый шум в КЛ представляет собой флуктуации фаз электромагнитных полей встречных волн, обусловленных спонтанным излучением [6].

При исследовании систематических погрешностей КЛ и ОДУ в представленной работе использовалась процедура кросс-калибровки совместно с гармоническим Фурье анализом, при которой осуществлялись последовательные развороты КЛ относительно ОДУ. Анализировалась воспроизводимость систематической погрешности обоих преобразователей угла в течение короткого (минуты) и длительного (12 мес.) промежутков времени.

Показано, что систематическая погрешность КЛ (для типов КЛ с отражателями в виде призм полного внутреннего отражения) сосредоточена главным образом на первой гармонике частоты вращения, при этом её амплитуда пропорциональна времени его оборота (рисунок 2). Долговременная невоспроизводимость систематической погрешности КЛ, сосредоточенной на частоте вращения, не превышает  $0,01''$ . Неисключенная систематическая погрешность КЛ после алгоритмической компенсации погрешности на первой гармонике составляет  $0,004''$ .

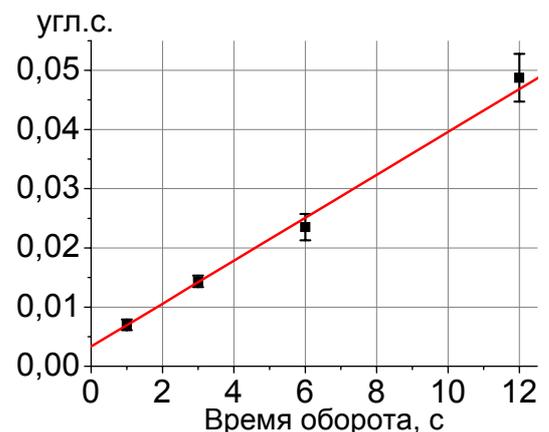


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды первой гармоники систематической погрешности КЛ от времени оборота

Систематическая погрешность ОДУ после усреднения результатов измерений с двух считывающих головок сосредоточена в основном на 2-ой гармонике частоты вращения, при этом её амплитуда не зависит от скорости вращения. Невоспроизводимость систематической погрешности в течение длительного промежутка времени находится в пределах  $0,03''$ , в течение короткого промежутка времени – в пределах  $0,01''$ . Неисключённая систематическая погрешность ОДУ составляет менее  $0,01''$ .

В гониометрических системах, работающих в динамическом режиме, в ряде случаев требуется обеспечивать высокую стабильность скорости вращения, что может приводить к появлению вибрационных колебаний ротора системы. Такой характер вращения ротора служит дополнительным источником погрешности, которая может носить как случайный характер, так и систематический.

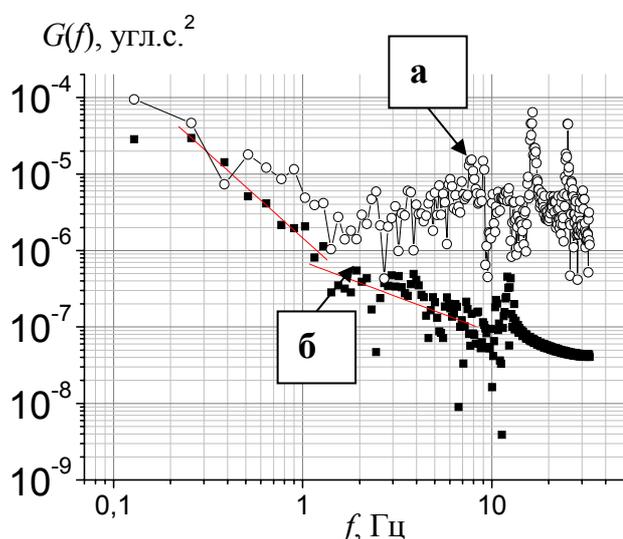


Рисунок 3 – Спектральная плотность мощности шума гониометрической системы до использования фильтрации (а) и после (б),  $\omega=60^\circ/\text{с}$

тота в спектре систематической погрешности ОДУ. На рисунке 3 представлены графики спектральной плотности мощности шума гониометрической системы, включающей КЛ и ОДУ, в случае «жесткой» стабилизации скорости вращения ротора.

Было получено, что использование фильтрации уменьшает СКО результата измерений более чем в 3 раза. По результатам проведенных исследований максимальное значение СКО случайной погрешности ОДУ после фильтрации составляет  $0,006''$ , для КЛ эта величина не превышает  $0,01''$ . Дальнейшее уменьшение случайной погрешности преобразователей угла обеспечивается за счет многократных измерений.

Для устранения этой составляющей погрешности была предложена фильтрация входных данных. Для этого использовался цифровой Фурье фильтр со следующими параметрами:

$$H(f) = \begin{cases} 0, & f < \frac{2}{3} f_1; \\ 1, & \frac{2}{3} f_1 \leq f \leq f_B; \\ 0, & f > f_B, \end{cases}$$

где  $f_1$  – частота вращения ротора гониометрической системы;  $f_B$  – верхняя частота

**Глава 3** посвящена повышению точности лазерного динамического гониометра (ЛДГ). ЛДГ предназначен для измерений углов между нормальными к плоским отражающим поверхностям призматических мер плоского угла. К основным источникам погрешностей ЛДГ, требующих дальнейшего исследования с целью их уменьшения, следует отнести: чувствительность КЛ к нестабильности его скорости вращения, чувствительность КЛ к магнитному полю и наклон измерительной плоскости НИ.

Применяемый в лазерной гониометрии фазо-временной метод измерений [2] заключается в одновременном измерении фазы выходного сигнала КЛ и интервалов времени, сформированными сигналами контролируемого преобразователя угла (в случае призматических мер - сигналами НИ). При реализации этого метода используются два уравнения угловых измерений: уравнение компенсации вертикальной составляющей скорости вращения Земли

$$\tilde{\varphi}_i^* = 2\pi \frac{N_i \pm N_{2\pi} \frac{\Omega_E^* t_i}{2\pi}}{N_{2\pi} (1 \pm \frac{\Omega_E^* T}{2\pi})}; \quad (1)$$

уравнение компенсации обобщенного сдвига нуля (ОСН)

$$\tilde{\varphi}_i^{**} = 2\pi \frac{N_i \pm F_0 t_i}{N_{2\pi} \pm F_0 T}, \quad (2)$$

где  $N_i, N_{2\pi}$  – число периодов выходного сигнала КЛ при его повороте на угол  $\varphi_i$ , задаваемый контролируемым преобразователем угла, и на угол  $2\pi$  соответственно;  $F_0 = \frac{1}{2\pi}(K_0 + K_1 \Omega_E^*)$  – ОСН;  $K_1$  – масштабный коэффициент КЛ;  $K_0$  – сдвиг нуля выходной характеристики КЛ;  $\Omega_E^*$  – вертикальная составляющая скорости вращения Земли;  $t_i$  – время измерения угла  $\varphi_i$ ;  $T$  – время оборота.

В работе получено выражение для неисключенной систематической погрешности при использовании уравнения измерений (1)  $\Delta\varphi_i^*$ , которое имеет вид:

$$\Delta\varphi_i^* = \varphi_i \frac{K_0}{K_1} \left( \frac{\varpi_T - \varpi_i}{\varpi_i \varpi_T} \right) + \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{K_{-1}}{K_1} \left[ \varphi_i \left( \frac{\varpi_T - \varpi_i}{\varpi_i \varpi_T} \right) + \frac{1}{\omega_0} \left( \delta J_i - \delta J_T \frac{\varphi_i}{2\pi} \right) \right],$$

где  $K_{-1}$  – коэффициент нелинейности выходной характеристики КЛ;  $\omega_0$  – постоянная составляющая скорости вращения КЛ;  $\varpi_i, \varpi_T$  – средняя скорость вращения КЛ за время измерения  $t_i$  и за время оборота  $T$ ;  $\varphi_i = \varpi_i t_i$  – угол поворота

КЛ за время измерения;  $\delta J_{i,T} = \int_0^{t_i,T} \delta \omega'(t) dt$ ,  $\delta \omega'(t)$  – нестабильность скорости вращения.

Анализ зависимости  $\Delta \varphi_i^*$  от нестабильности скорости вращения КЛ показал, что неисключенная систематическая погрешность в основном определяется сдвигом нуля КЛ и для её снижения до тысячных долей угловой секунды необходимо обеспечивать относительную нестабильность скорости вращения на уровне 0,1%.

В работе также показано, что при использовании уравнения измерений (2) неисключённая систематическая погрешность  $\Delta \varphi_i^{**}$  имеет вид:

$$\Delta \varphi_i^{**} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{K_{-1}}{K_1} \left[ \varphi_i \left( \frac{\varpi_T - \varpi_i}{\varpi_i \varpi_T} \right) + \frac{1}{\omega_0} \left( \delta J_i - \delta J_T \frac{\varphi_i}{2\pi} \right) \right] + \frac{2\pi}{K_1} \cdot \frac{(\varpi_T - \varpi_i)}{\varpi_T \varpi_i} \cdot \left[ \frac{K_{-1}}{K_1} \cdot \left( J_i - J_T \frac{\varphi_i}{2\pi} \right) + \frac{4\pi}{K_1} \cdot \varphi_i \left( \frac{\varpi_T - \varpi_i}{\varpi_i \varpi_T} \right) F_0 \right] \cdot \delta F,$$

где  $\delta F$  – погрешность определения ОСН.

Математическое моделирование показало, что основной вклад в  $\Delta \varphi_i^{**}$  вносит нелинейность выходной характеристики КЛ, и неисключённая систематическая погрешность измерения угла не превышает 0,003" при относительной нестабильности скорости вращения на уровне 1%.

Таким образом, погрешность, связанная с нестабильностью скорости вращения КЛ, может быть значительно уменьшена алгоритмически.

Тогда преобладающими источниками систематической погрешности ЛДГ являются: чувствительность КЛ к магнитному полю Земли и наклон измерительной плоскости НИ, которые, как известно, сосредоточены на первой гармонике частоты вращения. В работе предложена модель систематической погрешности ЛДГ  $\Theta$  в виде:

$$\Theta = A_{\text{КЛ}} \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + A_{\text{НИ}} \sin(\omega_0 t + \varphi_2) = A \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

где  $A_{\text{НИ}}, A_{\text{КЛ}}$  – амплитуды погрешностей КЛ и НИ;  $\omega_0 t$  – угол поворота ротора ЛДГ, отсчитанный от начального положения;  $\varphi_1, \varphi_2$  – начальные фазы погрешностей КЛ и нуль-индикатора;  $A, \varphi$  – амплитуда и фаза систематической погрешности ЛДГ.

В работе основное внимание было уделено разработке метода, направленного на уменьшение систематической погрешности НИ. При этом известно, что

амплитуда систематической погрешности НИ определяется выражением:  $A_{\text{НИ}} = \sin\beta \cdot \text{tg}\gamma'$ , где  $\beta$  – угол наклона контролируемой меры относительно оси вращения ЛДГ;  $\gamma'$  – угол между измерительной плоскостью НИ и плоскостью, перпендикулярной оси вращения ротора ЛДГ. Задача устранения систематической погрешности НИ сводится к выставке его измерительной плоскости, при которой угол  $\gamma' = 0$ . Трудность выставки обусловлена тем, что НИ имеет чувствительность к угловым перемещениям только по одной координате.

Предлагается метод выставки НИ, реализуемый за счет изменения фазы его систематической погрешности. Метод заключается в определении точки пересечения двух зависимостей квадрата амплитуды первой гармоники систематической погрешности ЛДГ от угла  $\gamma$ :  $A_1^2(\gamma)$  и  $A_2^2(\gamma)$ , где  $\gamma$  – угол наклона измерительной плоскости НИ относительно его базовой поверхности. Зависимость  $A_1^2(\gamma)$  получают при произвольной начальной разности фаз между погрешностями, вносимыми КЛ и НИ, а зависимость  $A_2^2(\gamma)$  – при изменении начальной разности фаз на  $180^\circ$ . Найденное таким образом значение угла наклона  $\gamma$  характеризует оптимальное положение НИ с точки зрения минимума систематической погрешности.

Отметим, что описанный метод может быть реализован в любой гониометрической системе, включающей НИ и требующей его выставки.

Были проведены экспериментальные исследования предложенного метода. На рисунке 4 представлены систематические погрешности ЛДГ до установки НИ в оптимальное положение и после его установки, а также результат синусоидальной регрессии, проведенной с использованием метода наименьших квадратов. Как можно видеть, амплитуда систематической погрешности ЛДГ уменьшилась с  $0,14''$  до  $0,07''$ .

Для подтверждения достоверности принятой модели систематической погрешности ЛДГ были реализованы дополнительные измерения в четырёх положениях гониометра при его разворотах на  $90^\circ$ . Результаты измерений показали, что фаза погрешности на первой гармонике при

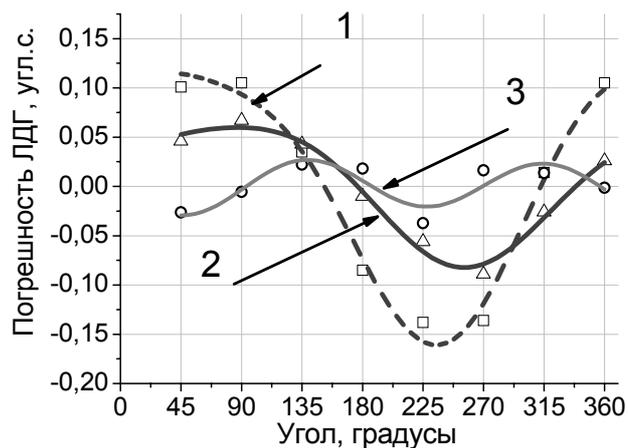


Рисунок 4 – Систематическая погрешность ЛДГ до (1, □) и после (2, △) установки НИ в оптимальное положение, и в результате осреднения при разворотах ЛДГ (3, ○).

разворотах ЛДГ в магнитном поле Земли также изменяется на  $90^\circ$ . После осреднения систематической погрешности по положениям, амплитуда погрешности, сосредоточенной на первой гармонике частоты вращения, составила менее  $0,01''$ . Присутствие второй гармоники (см. рисунок 4, кривая 3) обусловлено наклоном контролируемой призматической меры относительно оси вращения гониометра, её величина уменьшается более точной выставкой меры.

Проведена оценка метрологических характеристик ЛДГ: оценки доверительных границ суммарной погрешности составляют  $\pm 0,08''$  ( $2\sigma$ ) при измерении многогранных призм методом кросс-калибровки и  $\pm 0,13''$  ( $2\sigma$ ) при измерении прочих призматических мер. При этом при измерении многогранных призм методом кросс-калибровки достаточно провести измерения в четырёх положениях призмы с точностью углов разворота призмы на уровне  $1-2^\circ$ .

**Глава 4** посвящена повышению точности автоколлиматора, используемого в системах гониометрического типа при измерениях в статическом режиме.

Представлены методы и средства калибровки высокоточных автоколлиматоров, реализуемые в мире, а также погрешности этих методов и средств. Существующие методы калибровки высокоточных автоколлиматоров позволяют определять погрешности масштабирования их шкал. Однако для высокоточных угловых измерений, наряду с погрешностями масштабирования шкал, представляют интерес перекрёстные погрешности (или погрешность перекрёстных связей) двух ортогональных осей при угловом перемещении. Для определения перекрёстных систематических погрешностей автоколлиматора и средства задания малых угловых перемещений - пьезоэлектрического наклонного стола был предложен метод, основанный на процедуре относительных разворотов.

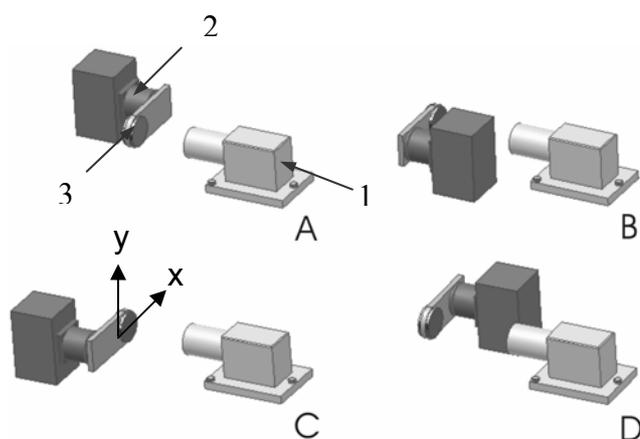


Рисунок 5 – Схема разворотов при реализации метода исследования перекрёстных погрешностей автоколлиматора (1) и пьезоэлектрического наклонного стола (2). (3) – двухстороннее зеркало.

Для реализации метода на наклонную платформу стола крепится двухстороннее зеркало, после чего осуществляются измерения при разворотах пьезоэлектрического стола относительно автоколлиматора как показано на рисунке 5. В каждом из 4-х положений пьезоэлектрическим наклонным столом задаются одинаковые угловые перемещения, например, вокруг вер-

тикальной оси  $y$ . Двухкоординатный автоколлиматор наряду с угловыми перемещениями по координате  $x$ , фиксирует значения по координате  $y$ :  $\Delta y(x)$ , которые на практике не равны нулю. Тогда значения перекрёстных погрешностей автоколлиматора  $\Delta y_{AK}(x)$  и наклонного стола  $\Delta y_{ПНС}(x)$  определяются как сумма и разность результатов измерений, полученных автоколлиматором по координате  $y$  при изменении координаты  $x$  в положениях А-В ( $\Delta y_A, \Delta y_B$ ) или С-Д ( $\Delta y_C, \Delta y_D$ ):

$$\Delta y_{AK} = (\Delta y_{A(C)} + \Delta y_{B(D)})/2,$$

$$\Delta y_{ПНС} = (\Delta y_{A(D)} + \Delta y_{B(C)})/2.$$

Результаты экспериментальных исследований, проведенные с использованием автоколлиматора HR (Moeller-Wedel) и пьезоэлектрического стола S-340 (Physik Instrumente), представлены на рисунке 6. Невоспроизводимость величины перекрёстных погрешностей  $\Delta y(x)$  обоих приборов не превышает  $0,005''$ .

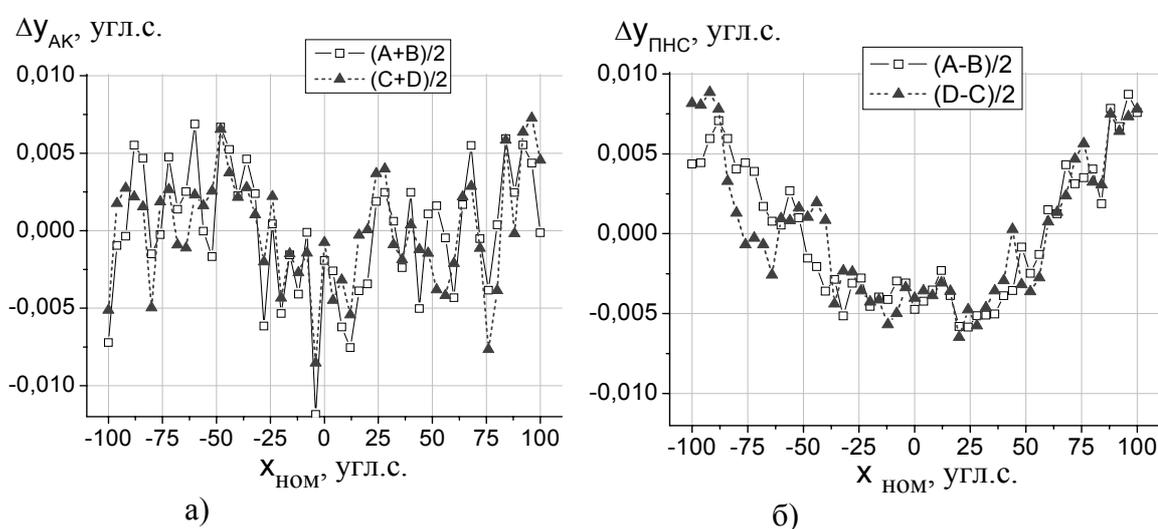


Рисунок 6 – Перекрёстные погрешности автоколлиматора (а) и пьезоэлектрического наклонного стола (б).

Аналогичным образом могут быть определены перекрёстные погрешности по координате  $x$  при изменении координаты  $y$  автоколлиматора  $\Delta x_{AK}(y)$  и наклонного стола  $\Delta x_{ПНС}(y)$ .

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

- Получены аналитические выражения для неисклѳенной систематической погрешности фазо-временного метода измерений в лазерной гониометрии, математическое моделирование которых показало, что погрешность не превышает  $0,003''$  при использовании уравнения компенсации обобщѳенного сдвига нуля и относительной внутриоборотной нестабильности скорости вращения не более 1%.

- Разработан метод выделения случайных погрешностей КЛ и ОДУ из результатов их совместных измерений независимо от источников шумов,

присутствующих в системе. Показано, что случайная погрешность ОДУ носит характер белого шума, а основным источником случайной погрешности КЛ является случайный дрейф.

– Разработан и исследован метод повышения точности лазерного динамического гониометра, позволивший в 2 раза уменьшить его систематическую погрешность, сосредоточенную на частоте вращения.

– Разработан метод исследования систематических погрешностей, основанный на процедуре разворотов, позволяющий определять значения перекрёстных погрешностей двухкоординатного автоколлиматора и пьезоэлектрического наклонного стола. По результатам экспериментальных исследований невоспроизводимость перекрёстных погрешностей обоих приборов не превышает 0,005 ".

#### Цитированная литература

1. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии / М.Н. Бурнашев, Д.П. Лукьянов, П.А. Павлов, Ю.В. Филатов // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, №2. – С. 141-146.

2. Павлов, П.А. Разработка и исследование высокоточных лазерных гониометрических систем: автореф. дис... д-ра техн. наук / П.А. Павлов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. – 32с.

3. Sim, P.J. // Modern Techiques in Metrology. – Singapore: World Scientific, 1984. – P. 102-121.

4. The new PTB angle comparator / R. Probst et al. // Measurement Science and Technology. – 1998. – №9. – P. 1059-1066.

5. Automatic high precision calibration system for angle encoder / T. Watanabe et al. // Proceeding of SPIE. – 2001. – Vol. 4401. – Pt. 1. – P. 267-274; 2003. – Vol. 5190. – Pt. 2. – P. 400-409.

6. Aronowitz, F. Fundamentals of the ring laser gyro / F. Aronowitz // Optical Gyros and their application, Neuilly-sur-seine Cedex, France, May 1999. – RTO AGARDograph 339. – P. 3-1 – 3-45.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Бачиш, Е.А.\* Исследование метрологических характеристик лазерного динамического гониометра / Е.А. Бачиш, П.А. Павлов // Измерительная техника. –

---

\* Здесь и далее по тексту Бачиш Е.А. читать как Баринова Е.А. на основании свидетельства о заключении брака П-АК № 539689

2009. – №5. – С. 19-23.

**Другие статьи и материалы конференций:**

2. Бачиш, Е.А. Методы воспроизведения единицы плоского угла / Е.А. Бачиш // Гироскопия и навигация. – 2006. – №2 (53). – С.105.

3. Бачиш, Е.А. Эталонная углоизмерительная система / Е.А. Бачиш // Навигация и управление движением: материалы докл. VIII конф. молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2007. – С. 305-313.

4. An angular reversal technique for error separation between a dual axis electronic autocollimator and a PZT tilting platform (Метод угловых разворотов в задаче разделения погрешностей двухкоординатного автоколлиматора и пьезоэлектрической наклонной платформы) / R. Probst, G. Fütterer, J. Illemann, J. Mokoš, P.K. Lui, E. Bachish // Proceeding of the 7th International euspen Conference, Bremen, Germany, May 2007. – Bremen , 2007. – P. 121-124.

5. Бачиш, Е.А. Экспериментальные исследования пьезоэлектрического поворотного стола с использованием двухкоординатного автоколлиматора / Е.А. Бачиш, Р. Пробст // Гироскопия и навигация. – 2007. – №2 (57). – С. 90.

6. Измерение параметров углового движения сканирующего зеркала / М.Ю. Агапов, Е.А. Бачиш, Е.Д. Бохман, П.А. Павлов // Изв. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Сер. Приборостроение и информационные технологии. – 2007. – №1. – С. 52-58.

7. Бачиш, Е.А. Исследование пьезоэлектрического поворотного стола с использованием двухкоординатного автоколлиматора / Е.А. Бачиш, Р. Пробст // Навигация и управление движением: материалы докл. IX конф. молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2007. – С. 54-59.

8. Бачиш, Е.А. Методика уменьшения систематической погрешности лазерного динамического гониометра для калибровки многогранных призм / Е.А. Бачиш // Гироскопия и навигация. – 2008. – №2 (61).- С. 96-97.

9. Бачиш, Е.А. Методика уменьшения систематической погрешности лазерного динамического гониометра / Е.А. Бачиш // Навигация и управление движением: материалы докл. X конф. молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2009. – С. 293-297.

10. Баринаова, Е.А. Исследование лазерного гониометра / Е.А. Баринаова, П.А. Павлов // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». – 2009. – №6. – С. 46-52.