

На правах рукописи

Кононова Наталья Александровна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИДЦАТИМЕТРОВОГО
ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОМПАРАТОРА
ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА
ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ – МЕТРА**

**Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам
измерений (механические величины)**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева».

Научный руководитель:

кандидат технических наук Федорин Виктор Леонидович.

Официальные оппоненты:

Филатов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)», декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем;

Мельников Геннадий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор кафедры теоретической и прикладной механики.

Ведущая организация:

Федеральное государственное казенное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации.

Защита состоится «18» ноября 2013 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 308.004.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного унитарного предприятия «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан «10» октября 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

Г.П. Телитченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время в мире наблюдаются постоянный рост требований к повышению точности измерений длины и расширение номенклатуры средств измерений. Появились такие современные высокоточные средства измерений, как прецизионные и промышленные лазерные интерферометры, лазерные сканеры, лазерные координатно-измерительные системы и т.п. Данные средства измерений применяются для решения множества научных задач, а также используются в ряде важнейших отраслей национальной промышленности – аэрокосмической, энергетической, оборонной, микроэлектронной, автомобильной и в машиностроении. Используемые ранее для передачи единицы длины эталонным измерительным лентам (далее эталонные ленты) оптико-механические и интерференционные компараторы не могут обеспечить требуемую в современных условиях точность измерений. К тому же их конструкция не позволяет исследовать лазерные интерферометры, лазерные координатно-измерительные системы и т.п. Таким образом, для Государственного первичного эталона единицы длины – метра должен быть разработан компаратор, метрологические характеристики и конструкция которого обеспечивают передачу единицы современным высокоточным средствам измерений.

Цель работы

Целью данной диссертационной работы является разработка и исследование современного тридцатиметрового лазерного интерференционного компаратора для Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 (далее ГЭТ 2-2010) для исследования и определения метрологических характеристик современных высокоточных лазерных интерферометров, лазерных сканеров, лазерных координатно-измерительных систем, средств измерений уровня из состава измерительно-управляющих систем для коммерческого учета и управления резервуарными парками в нефтегазовой отрасли и других средств измерений, а также поверки эталонных лент. Исследования включают комплексный анализ источников составляющих погрешности компа-

ратора, а также определение наиболее существенных источников погрешности с целью создания методов, технических средств и решений, позволяющих повысить точность передачи единицы длины.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели следует решить ряд задач:

- провести анализ многолетнего опыта ВНИИМ и современных измерительных возможностей ведущих зарубежных метрологических институтов, таких как METAS (Швейцария), PTB (Германия), BEV (Австрия), MIKES (Финляндия) и других, на примере международных сличений, с целью разработки и исследований современного тридцатиметрового лазерного интерференционного компаратора для ГЭТ 2-2010;

- разработать структуру построения современного тридцатиметрового лазерного интерференционного компаратора для ГЭТ 2-2010, позволяющего расширить его диапазон до 30 м и достичь среднего квадратического отклонения (далее СКО) передачи единицы в данном диапазоне не превышающего 5 мкм;

- разработать методики, которые позволят провести исследования основных источников погрешности компаратора с целью уменьшения их влияния. Определить неисключенную систематическую погрешность компаратора (далее НСП);

- с целью определения случайной и суммарной погрешности передачи единицы провести экспериментальные исследования с помощью компаратора современных высокоточных средств измерений, например, лазерной координатно-измерительной системы API Tracker3 фирмы «Automated Precision Inc.» (США).

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

- разработан и создан новый современный тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор;

- разработана методика контроля длины волны в вакууме He-Ne лазера лазерной измерительной системы компаратора по входящему в состав ГЭТ 2-2010 источнику эталонного излучения VNIIM2 – He-Ne/I₂ лазеру, стабилизированному

по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127, что позволило повысить точность измерений длины волны в вакууме на порядок;

- разработан и применен метод автоматической компенсации ошибки Аббе с целью уменьшения погрешности измерений, основанный на использовании высокоточного цифрового двухкоординатного автоколлиматора;

- существенно расширены функциональные возможности ГЭТ 2-2010, что позволило метрологически обеспечить на территории РФ передачу единицы длины не только эталонным лентам, но и новейшим высокоточным лазерным интерферометрам, лазерным сканерам, лазерным координатно-измерительным системам, уровнемерам, работа которых основана на различных физических принципах действия, и другим средствам измерений.

Практическая ценность работы

Практическая ценность диссертационной работы состоит в следующем:

- компаратор введен в установленном порядке в состав ГЭТ 2-2010. Приказ об утверждении Государственного первичного эталона единицы длины – метра № 5377 от 23 декабря 2010 г. Работа выполнялась в рамках программы «Совершенствование государственного эталона единицы длины ГЭТ 2-85». Основанием для выполнения работы являлись приказ Минпромэнерго России от 24 января 2008 года № 23 и приказ Ростехрегулирования от 28 апреля 2008 года № 1281;

- разработан и утвержден новый национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 8.763-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм», отвечающий современным требованиям промышленности;

- результаты исследований созданного компаратора использованы для конструкторской разработки серийного варианта компараторов для оснащения центров стандартизации и метрологии Российской Федерации, а также ведущих предприятий важнейших отраслей национальной промышленности;

- с помощью компаратора проведен ряд экспериментальных исследований новейших высокоточных средств измерений, таких как лазерные интерферомет-

ры, лазерные координатно-измерительные системы, уровнемеры, работа которых основана на различных физических принципах действия;

- проведены теоретические и экспериментальные исследования источников погрешности компаратора, послужившие основой для разработки методов и определения путей дальнейшего совершенствования конструкции компаратора с целью повышения точности передачи единицы длины.

Результаты работы внедрены в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», в РГП «Казахстанский институт метрологии» (КазИнМетр, Казахстан), в ФГКУ «ГНМЦ» Минобороны России.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- структура построения и особенности конструкции основных узлов созданного тридцатиметрового лазерного интерференционного компаратора, позволяющие обеспечить передачу единицы в диапазоне до 30 м с СКО передачи единицы в данном диапазоне не более 5 мкм;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований основных источников погрешности компаратора;

- результаты экспериментальных исследований современных высокоточных средств измерений, подтверждающие расширение функциональных возможностей ГЭТ 2-2010.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- X Международном научно-техническом семинаре «Разработка, производство, применение и метрологическое обеспечение средств измерений давления и вакуума», г. Санкт-Петербург, 2006 г.;

- XXI Национальном научном симпозиуме «Метрология и метрологическое обеспечение», г. Созополь (Болгария), 2011 г.;

- Всероссийской конференции «Метрология и стандартизация нефтегазовой отрасли 2011», г. Санкт-Петербург, 2011 г.;

- Второй Всероссийской конференции «Метрология и стандартизация нефтегазовой отрасли 2012», г. Санкт-Петербург, 2012 г.;
- 6-м Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства», Менделеево, Московская обл., 2012 г.;
- семинарах отдела геометрических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 57 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 138 страниц, включая 48 рисунков и 19 таблиц.

В диссертационной работе изложены и обобщены результаты работы, выполненной в период с 2006 по 2013 гг.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели, научная и практическая значимость исследования.

В **Первой главе** приведена история создания компараторов для поверки эталонных лент и рулеток, а также рассмотрены конструктивные особенности современных компараторов ведущих зарубежных метрологических институтов на примере результатов международных сличений. Показаны основные источники погрешности измерений эталонных лент.

Возрастающие требования к точности измерений в науке и промышленности вызвали широкое применение при передаче единицы длины в диапазоне (0-30) м лазерных интерференционных методов измерений. Приведены метрологические характеристики ряда современных высокоточных лазерных измерительных систем, например, «Automated Precision Inc.» (США), «FARO Technologies Inc.» (США), «Renishaw plc» (Великобритания), «Hewlett Packard» (США).

В связи с бурным развитием нефтегазовой отрасли, растет экспорт нефти в страны Евросоюза и СНГ, становится актуальным вопрос поверки современных радарных и ультразвуковых уровнемеров таких фирм как «Emerson Process Management/Rosemount» (США, Швеция) и «Enraf B.V.» (Нидерланды).

Сделан вывод о том, что для поверок и исследований современных средств измерений необходимо создание лазерного интерференционного компаратора с диапазоном измерений не менее 30 м.

Во **Второй** главе описываются структура построения и основные особенности конструкции компаратора. Внешний вид компаратора приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид компаратора

Основой лазерной измерительной системы компаратора является измерительный блок и оптические элементы системы XL-80 фирмы «Renishaw plc».

Оптико-механическая система компаратора состоит из прецизионных направляющих, по которым с помощью электропривода перемещается каретка. На каретке закреплены видеомикроскоп и подвижный призмный отражатель лазерной измерительной системы. Видеомикроскоп, установленный на каретке компаратора, служит для позиционирования изображений штрихов измеряемой эталонной ленты. Подсветка осуществляется с помощью светодиодного осветителя на гибком держателе. Изображение штрихов фиксируется монохромной CCD-камерой с разрешением 640x480 пикселей, встроенной в видеомикроскоп,

и передается по радиоканалу приемнику радиосигнала. После этого оно поступает на модуль видеозахвата и передается системе обработки изображений. Система обработки автоматически определяет центр штриха (рис. 2). Для закрепления эталонных лент направляющие снабжены специальными приспособлениями. Рабочее натяжение эталонных лент обеспечивают гири. Для уменьшения силы трения при закреплении гирь в конце направляющих установлен специальный блок, также с целью уменьшения силы трения между эталонной лентой и компаратором наклеена тефлоновая лента. Разработаны устройства, позволяющие использовать его для исследований лазерных координатно-измерительных систем, лазерных интерферометров, уровнемеров и других средств измерений.

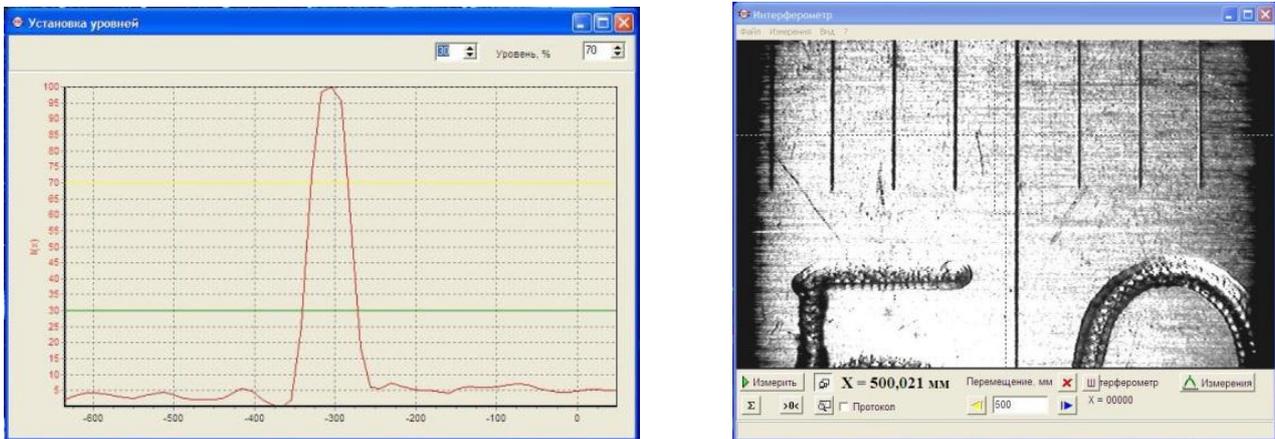


Рис. 2. Определение центра штриха

Управление основными функциями компаратора, сбор информации и ее обработка автоматизированы, что позволило упростить процесс измерений, повысить точность и сократить время проведения измерений в 4 раза.

Температура эталонной ленты определяется с помощью четырех измерителей температуры с платиновыми терморезисторами, равномерно распределенных вдоль компаратора. Система контроля параметров окружающей среды предназначена для определения показателя преломления, который определяется либо по формуле Эдлена при измерениях эталонных лент, либо с помощью лазерного рефрактометра при исследованиях высокоточных лазерных измерительных систем.

Описанные особенности показывают, что созданный для ГЭТ 2-2010 компаратор отвечает современным требованиям науки и техники.

Третья глава посвящена исследованию наиболее существенных источников систематической погрешности компаратора для максимально возможного ее исключения путем введения поправок при передаче единицы длины. Источники возникновения погрешности, а также значение погрешности будут различными при исследованиях разных средств измерений. Так уравнения измерений имеют следующий вид для

лазерных интерферометров и

лазерных координатно-измерительных систем
$$L_m = \frac{\lambda_{vac}}{n_{tpf}} \cdot N + C_{Abbe} + C_{cos}, \quad (1)$$

эталонных лент

$$L_m = \frac{\lambda_{vac}}{n_{tpf}} \cdot N + C_{tm} + C_{Abbe} + C_{cos} + C_F + C_{lc}, \quad (2)$$

где L_m – измеренная длина интервала; λ_{vac} – длина волны лазерного излучения в вакууме; n_{tpf} – показатель преломления окружающей среды при температуре t , давлении p и влажности f ; N – количество длин волн в измеряемом интервале; C_{tm} – поправка, вводимая для приведения полученной длины интервала эталонной ленты к температуре 20 °С; C_{Abbe} – поправка, связанная с ошибкой Аббе; C_{cos} – поправка, связанная с ошибкой, вызванной отклонением от параллельности между осью лазерного луча компаратора и осью измеряемого объекта; C_F – поправка, связанная с натяжением эталонных лент и влиянием силы трения; C_{lc} – поправка, связанная с определением центра штриха.

Для компаратора был исследован и отобран образец системы XL-80, так как она обладает высокими метрологическими характеристиками. Впервые с целью уменьшения погрешности измерений был применен контроль длины волны в вакууме лазера системы по входящему в состав ГЭТ 2-2010 источнику эталонного излучения – He-Ne/I₂ лазеру. Это позволило повысить точность измерений длины волны в вакууме на порядок.

Была рассчитана погрешность определения поправки C_{tm} , вводимой для приведения полученной длины интервала эталонной ленты к температуре 20 °С. Поправка вычисляется по формуле

$$C_{t_m} = -\alpha \cdot (t_m - 20) \cdot L, \quad (3)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала измеряемой эталонной ленты (берется из ее паспорта); t_m – температура измеряемой эталонной ленты; L – номинальная длина интервала измеряемой эталонной ленты.

Погрешность при определении данной поправки будет обусловлена погрешностью при измерении температуры эталонной ленты. Если НСП t_m задана границами Θ_{t_m} , то границы НСП при вычислении поправки C_{t_m} (без учета знака) равны

$$\Theta_{C_{t_m}} = \frac{\partial C_{t_m}}{\partial t_m} \cdot \Theta_{t_m} = \alpha \cdot L \cdot \Theta_{t_m}. \quad (4)$$

С целью определения ошибки Аббе были проведены исследования характеристик направляющих и каретки компаратора с помощью двухкоординатного цифрового автоколлиматора, разработанного ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (диапазоны измерений углов в горизонтальной и вертикальной плоскостях от -5 до +5 угловых минут, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений углов $\pm 0,05$ угловые секунды). Согласно компараторному принципу (принципу Аббе) контролируемый объект и эталонное средство измерений должны располагаться в компараторе так, чтобы один являлся продолжением другого (компаратор с продольным расположением измерительных осей), что позволяет избегать ошибок первого порядка. Это не всегда возможно реализовать, т.к. габаритные размеры такого компаратора вдвое превышают диапазон измерений. При измерении длин порядка 30 м применяется параллельное расположение измерительных осей, тогда при малых углах поворота каретки φ отклонение от прямолинейности направляющих приводит к ошибке, пропорциональной расстоянию H между измерительными осями

$$C_{Abbe} = H \cdot \sin\varphi \approx H \cdot \varphi = (H_H + \delta) \cdot \varphi, \quad (5)$$

где H_H – номинальное расстояние между измерительными осями контролируемого объекта и эталонного средства измерений; δ – смещение каретки, вызванное поворотом каретки на угол φ . Эта ошибка является ошибкой первого по-

рядка и существенно превышает ошибку второго порядка. Для ее уменьшения следует минимизировать расстояние H , т.е. номинальное расстояние H_H и смещение Аббе δ .

Отклонения от прямолинейности направляющих вызывают поворот каретки в горизонтальной плоскости относительно вертикальной оси на угол φ_1 не превышающий ± 100 угловых секунд и поворот в вертикальной плоскости относительно горизонтальной оси на угол φ_2 не превышающий ± 120 угловых секунд. Использование двухкоординатного автоколлиматора позволяет проводить одновременно исследование прямолинейности направляющих в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Далее вычисляются смещения δ_1 и δ_2 . Значение ошибки Аббе зависит не только от смещений δ_1 и δ_2 , но и от номинальных расстояний между измерительными осями контролируемого объекта и эталонного средства измерений в горизонтальной H_{H1} и вертикальной H_{H2} плоскостях, то есть от объекта измерений. Суммарная ошибка Аббе может быть оценена по ошибкам Аббе в горизонтальной C_{Abbe1} и вертикальной C_{Abbe2} плоскостях. Использование автоколлиматора позволяет автоматически вносить в результат измерений поправку, связанную с ошибкой Аббе. Введение поправки вызывает возникновение НСП, связанной с погрешностью измерений угла наклона каретки φ . Границы НСП при вычислении поправки C_{Abbe} (без учета знака)

$$\Theta_{C_{Abbe}} = \frac{\partial C_{Abbe}}{\partial \varphi} \cdot \Theta_{\varphi} = H \cdot \Theta_{\varphi}, \quad (6)$$

где Θ_{φ} – границы НСП измерений угла наклона каретки φ .

Для работы компаратора необходимо соблюдать параллельность между осью лазерного луча компаратора и осью измеряемого объекта. В противном случае будет иметь место так называемая косинусная ошибка. Уменьшения ее возможно добиться путем тщательной настройки параллельности осей. Для этой цели используется мишень, на которой наблюдается расположение центра пятна лазерного луча при перемещении каретки. Поправка определяется как

$$C_{cos} = L \cdot \frac{\beta^2}{2}. \quad (7)$$

Погрешность при определении данной поправки будет обусловлена погрешностью при измерении угла β между осью лазерного луча компаратора и осью измеряемого объекта. Если НСП β задана границами Θ_β , то границы НСП при вычислении поправки C_{cos} (без учета знака) будут равны

$$\Theta_{C_{cos}} = \frac{\partial C_{cos}}{\partial \beta} \cdot \Theta_\beta = \beta \cdot L \cdot \Theta_\beta. \quad (8)$$

Данная погрешность будет пренебрежимо мала по сравнению с погрешностями, вызываемыми другими влияющими факторами.

При измерениях эталонных лент под влиянием силы натяжения происходит их упругая деформация. При этом на эталонные ленты также действует сила трения, зависящая от коэффициента трения материалов, из которых изготовлены поверхности эталонной ленты и опоры для нее. Погрешность при определении поправки C_F будет обусловлена погрешностями при измерении силы трения. Если НСП F_T задана границами Θ_{F_T} , то границы НСП при вычислении поправки C_F (без учета знака) будут равны

$$\Theta_{C_F} = \frac{\partial C_F}{\partial F_T} \cdot \Theta_{F_T} = \frac{L}{E \cdot S} \cdot \Theta_{F_T}, \quad (9)$$

где E – модуль Юнга; S – площадь поперечного сечения эталонной ленты.

При использовании формулы Эдлена для определения показателя преломления воздуха с целью регистрации параметров окружающей среды в компараторе применяются четыре измерителя температуры с платиновыми терморезисторами, равномерно распределенными вдоль компаратора (пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений $\pm 0,05$ °С), барометр типа БРС-1М-2 (пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ± 20 Па), измеритель влажности и температуры ИВТМ-7 М (пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений ± 2 %). Погрешность определения поправки будет обусловлена погрешностями при измерениях параметров окружающей среды: температуры Θ_t , давления Θ_p и влажности Θ_f . Границы НСП при вычислении поправки (без учета знака) будут равны

$$\Theta_{n_{tpf}} = \sqrt{\left(\frac{\partial n_{tpf}}{\partial t}\right)^2 \cdot \Theta_t^2 + \left(\frac{\partial n_{tpf}}{\partial p}\right)^2 \cdot \Theta_p^2 + \left(\frac{\partial n_{tpf}}{\partial f}\right)^2 \cdot \Theta_f^2}. \quad (10)$$

При исследованиях высокоточных лазерных измерительных систем показатель преломления определяется абсолютным методом с помощью лазерного рефрактометра. Погрешность определения показателя преломления будет вызвана погрешностями при измерении длины вакуумной камеры и длины волны в вакууме лазерного интерферометра рефрактометра.

При измерении эталонных лент выделяется прямоугольная область с изображением части штриха. В каждой строке изображения по заданному уровню интенсивности определяются границы штриха, внутри них производится определение центра «тяжести». По найденным в каждой строке центрам методом наименьших квадратов строится аппроксимирующая прямая и по ней вычисляется координата центра штриха. Значение погрешности зависит от ряда факторов, таких как увеличение объектива видеокамеры, равномерность освещения поля зрения, чистота штрихов и т.п.

В таблице 1 приведены составляющие НСП компаратора.

Доверительные границы НСП компаратора при исследованиях лазерных интерферометров и лазерных координатно-измерительных систем $\Theta(P)$ (без учета знака) при вероятности P будут равны

$$\Theta(P) = k \cdot \sqrt{\Theta_{\lambda_{vac}}^2 + \Theta_{C_{Abbe}}^2 + \Theta_{C_{cos}}^2 + \Theta_{n_{tpf}}^2}, \quad (11)$$

где k – коэффициент, определяемый выбранной доверительной вероятностью P , числом составляющих НСП и их соотношением. При $P=0,99$ $k=1,4$. Следовательно, $\Theta(0,99) = 1,4 \cdot \sqrt{(0,0002 \text{ мкм})^2 + (0,0103 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$, где L – измеряемая длина, м. СКО НСП компаратора определяется по формуле

$$S_{\Theta} = \sqrt{\frac{\Theta_{\lambda_{vac}}^2 + \Theta_{C_{Abbe}}^2 + \Theta_{C_{cos}}^2 + \Theta_{n_{tpf}}^2}{3}}. \quad (12)$$

Получаем, что СКО НСП равно $S_{\Theta} = \sqrt{\frac{(0,0002 \text{ мкм})^2 + (0,0103 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}{3}}$, где L – измеряемая длина, м.

Таблица 1 – Составляющие НСП компаратора

Составляющие погрешности	Значение погрешности при исследованиях	
	лазерных интерферометров	эталонной измерительной ленты*
Погрешность определения длины волны в вакууме, $\theta_{\lambda_{vac}}$	$5 \cdot 10^{-9} \cdot L^{**}$	$5 \cdot 10^{-9} \cdot L$
Погрешность определения поправки для приведения полученной длины интервала эталонной ленты к температуре 20 °С, $\theta_{C_{tm}}$	-	$5,75 \cdot 10^{-7} \cdot L$
Погрешность определения поправки, связанной с ошибкой Аббе, $\theta_{C_{Abbe}}$	0,0002 мкм	0,011 мкм
Погрешность определения поправки, связанной с ошибкой из-за отклонения от параллельности между осью лазерного луча компаратора и осью измеряемой объекта, $\theta_{C_{cos}}$	$1,7 \cdot 10^{-10} \cdot L$	$1,7 \cdot 10^{-10} \cdot L$
Погрешность определения поправки, связанной с натяжением эталонных лент и влиянием силы трения, θ_{F_T}	-	$1,39 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Погрешность определения поправки при использовании формулы Эдлена для расчета показателя преломления окружающей среды, $\theta_{n_{tpf}}$	-	$7,4 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Погрешность определения показателя преломления при использовании лазерного рефрактометра, $\theta_{n_{tpf}}$	$9 \cdot 10^{-9} \cdot L$	-
Погрешность определения центра штриха, θ_{lc}	-	0,05 мкм

Примечания

* – значения приведены для стальной эталонной ленты, ТКЛР которой равен $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, площадь поперечного сечения $3,5 \text{ мм}^2$, модуль Юнга для стали $2,06 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$;
 ** – L – измеряемая длина, м.

Доверительные границы НСП компаратора при исследованиях эталонных измерительных лент $\theta(P)$ (без учета знака) при вероятности P будут равны

$$\theta(P) = k \cdot \sqrt{\theta_{\lambda_{vac}}^2 + \theta_{C_{tm}}^2 + \theta_{C_{Abbe}}^2 + \theta_{C_{cos}}^2 + \theta_{F_T}^2 + \theta_{n_{tpf}}^2 + \theta_{lc}^2}. \quad (13)$$

Таким образом, $\theta(0,99) = 1,4 \cdot \sqrt{(0,05 \text{ мкм})^2 + (0,58 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$, где L – измеряемая длина, м. СКО НСП компаратора определяется по формуле

$$S_\theta = \sqrt{\frac{\theta_{\lambda_{vac}}^2 + \theta_{C_{tm}}^2 + \theta_{C_{Abbe}}^2 + \theta_{C_{cos}}^2 + \theta_{F_T}^2 + \theta_{n_{tpf}}^2 + \theta_{lc}^2}{3}}. \quad (14)$$

СКО НСП равно $S_{\theta} = \sqrt{\frac{(0,05 \text{ мкм})^2 + (0,58 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}{3}}$, где L – измеряемая длина, м.

Исследование существенных источников систематической погрешности компаратора позволило уменьшить ее путем введения поправок при передаче единицы длины.

В **Четвертой главе** приведены результаты исследований метрологических характеристик современных высокоточных средств измерений. Погрешность передачи единицы характеризуется указанием суммарного СКО результата измерений S_{Σ} , обусловленного влиянием случайных погрешностей и НСП метода и средств измерений

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta}^2 + S^2}. \quad (15)$$

Случайную погрешность компаратора можно оценить на основании экспериментальных данных. В диссертационной работе приведены таблицы с результатами экспериментальных исследований лазерной координатно-измерительной системы API Tracker3 фирмы «Automated Precision Inc.» (США) и эталонной измерительной ленты длиной 24 м.

Были проведены 10 независимых измерений системы API Tracker3, причем измерения были выполнены в разные дни. Определение абсолютной погрешности системы проводилось с шагом 1 м. Для каждого измеряемого интервала были вычислены СКО результатов измерений S . После этого для каждого измеряемого интервала были вычислены доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\varepsilon(0,99)$ и суммарное СКО результатов измерений S_{Σ} , а также доверительные границы суммарной погрешности $\Delta_{\Sigma}(P)$. В диссертационной работе приведены таблицы с результатами вычислений. Из них видно, что при 10 независимых измерениях системы API Tracker3 S_{Σ} не превышает 0,931 мкм, а $\Delta_{\Sigma}(0,99)$ не превышает $\pm 2,908$ мкм.

Дальнейшее совершенствование компаратора связано с разработкой дополнительной системы термостабилизации помещения, с целью уменьшения градиента температуры по его длине, а также с увеличением верхнего предела диапазона измерений до 50 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе решена актуальная научно-техническая и хозяйственная задача расширения диапазона передачи единицы длины ГЭТ 2-2010 до 30 м. Это необходимо для исследования метрологических характеристик, поверок и калибровок таких новейших высокоточных средств измерений, как лазерные интерферометры, лазерные координатно-измерительные системы, уровнемеры.

На основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ многолетнего опыта ВНИИМ и современных измерительных возможностей ведущих зарубежных метрологических институтов. Рассмотренные материалы позволили сделать вывод, что изготовление, исследование и введение в состав ГЭТ 2-2010 нового тридцатиметрового лазерного интерференционного компаратора наилучшим образом решает задачу совершенствования Государственного первичного эталона единицы длины – метра.

2. Разработана структура построения компаратора. Описаны конструктивные особенности некоторых узлов компаратора, которые позволили расширить функциональные возможности ГЭТ 2-2010, что необходимо для передачи единицы новейшим высокоточным лазерным интерферометрам, лазерным координатно-измерительным системам, уровнемерам и другим средствам измерений.

3. В диссертационной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования основных источников погрешности компаратора. Проведена оценка НСП компаратора, определены доверительные границы НСП и СКО НСП компаратора.

4. Разработана методика контроля длины волны в вакууме He-Ne лазера компаратора по входящему в состав ГЭТ 2-2010 источнику эталонного излучения VНИИМ2 – He-Ne/I₂ лазеру, что позволило повысить точность измерений длины волны в вакууме на порядок.

5. Проведено исследование характеристик направляющих и каретки компаратора с целью определения ошибки Аббе. Разработан и применен метод автоматической компенсации ошибки Аббе с целью уменьшения погрешности измерений. Т.к. лазерные интерферометры и системы, эталонные ленты и уровнемеры по-разному устанавливаются при исследованиях на компараторе, то ошибки Аббе приведены для всех случаев установки.

6. Экспериментально определена случайная составляющая погрешности компаратора при исследованиях лазерной координатно-измерительной системы API Tracker3 и эталонной ленты длиной 24 м. Определена погрешность передачи единицы. Показано, что тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор обеспечивает суммарное СКО передачи единицы не более 5 мкм.

7. Утвержден новый национальный стандарт РФ ГОСТ Р 8.763-2011.

8. Результаты работы внедрены в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», в РГП «Казахстанский институт метрологии» и в ФГКУ «ГНМЦ» Минобороны России.

9. Определены пути дальнейшего совершенствования компаратора.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Мельников Н.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Современное состояние воспроизведения единицы длины метра // Приборы. – 2007. – № 8 (86). – С. 53-55.

2. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Высокоточные измерения геометрических величин на Государственном первичном эталоне единицы длины // Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции «Механометрика-2008». – г. Суздаль. – 2008. – С. 40-41.

3. Александров В.С., Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Стабилизированный лазер Государственного эталона длины - метра // «Актуальные вопросы метрологии», сборник материалов научно-

практической конференции, посвященной 30-летию базовой кафедры метрологии СЗТУ при ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – СПб. – 2010. – С. 23-27.

4. Кононова Н.А. Тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор из состава Государственного первичного эталона единицы длины – метра // XXI национальный научный симпозиум с международным участием «Метрология и метрологическое обеспечение 2011», сборник докладов. – С.88-92.

5. Александров В.С., Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Лейбенгардт Г.И., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 // Измерительная техника. – 2012. – № 6. – С. 3-7.

6. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Лейбенгардт Г.И., Чекирда К.В. Тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор, входящий в состав государственного первичного эталона единицы длины – метра // Измерительная техника. – 2012. – № 5. – С. 22-26.

7. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Чекирда К.В. Измерительные возможности ВНИИМ им. Д.И. Менделеева при поверке и испытаниях уровнемеров // Измерительная техника. – 2013. – № 3. – С. 60-61.