

Довыденко Ольга Владимировна

**Разработка и исследование эталонов единиц массы,  
длины в области измерений координат центра масс и момента инерции**

Специальность 05.11.15 - Метрология и метрологическое обеспечение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

Научный руководитель **Петроневи́ч Василий Васильевич**  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное автономное учреждение  
«Центральный аэрогидродинамический институт  
имени профессора Н.Е. Жуковского», начальник  
научно-исследовательского отделения  
измерительной техники и метрологии,  
главный метролог ФАУ «ЦАГИ»

Официальные оппоненты: **Храпов Федор Иванович**  
доктор технических наук, ФГУП «ВНИИФТРИ»,  
начальник научно-исследовательского отделения  
обеспечения единства измерений при разработке,  
испытаниях и применении продукции

**Телешевский Владимир Ильич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,  
заведующий кафедрой измерительных  
информационных систем и технологий

Ведущая организация Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Всероссийский научно-  
исследовательский институт метрологии  
им. Д.И. Менделеева»  
(ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»)

Защита состоится «30» июня 2022 г. в 14:30 часов на  
заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в Московском государственном  
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я  
Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью  
организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря  
диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и  
на официальном сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «    »                      2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.18  
доктор технических наук, доцент



Мешков С.А.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Задачи управления траекторией движения летательных аппаратов (спутников, ракет), обеспечения их управляемости и устойчивости, стабилизации параметров движения построены на решении уравнений динамики полета. Решение этих уравнений невозможно без знания характеристик геометрии масс летательных аппаратов: массы, координат центра масс (далее – ЦМ) и моментов инерции (далее – МИ). Для определения характеристик геометрии масс экспериментальными методами, которые дают более точные результаты в сравнении с расчётными, создаются специализированные измерительные устройства (далее – стенды). Так, специалистами ЦАГИ за последние десятилетия создана линейка автоматизированных измерительных стендов для предприятий авиационной и ракетно-космической отрасли.

Весь класс таких устройств объединяет общая проблема, связанная с отсутствием эталонов единицы длины в области измерений координат центра масс и единицы момента инерции. Данное обстоятельство исключает возможность поверки стендов, приводит к ряду трудностей в обеспечении прослеживаемости измерений и выполнении законодательных и нормативных требований к ним. Существующий принцип обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс – аттестация стендов в качестве испытательного оборудования с применением контрольных приспособлений, аттестованных методик измерений и программного обеспечения, имеет терминологические противоречия и не позволяет обеспечить соответствие заключения по результатам аттестации о метрологических характеристиках стенда их действительной принадлежности к области допускаемых значений, т.е. обеспечить удовлетворительную достоверность контроля метрологической исправности стенда во всем его диапазоне измерений. Проблема усугубляется большой длительностью и высокой трудоемкостью процедуры аттестации испытательного оборудования применительно к стендам.

Данная работа посвящена разработке и исследованию эталонов, воспроизводящих единицы измерений характеристик геометрии масс, а также разработке достоверного и эффективного принципа обеспечения прослеживаемости этих измерений к государственным первичным эталонам.

### **Степень разработанности темы исследования**

Задачи экспериментального определения положения ЦМ и МИ находятся в поле зрения научных интересов уже не менее трех столетий. Нарботки в этой области принадлежат как отечественным, так и зарубежным ученым, в их числе такие великие ученые, как Л. Эйлер, Х. Гюйгенс, Н.Е. Жуковский. Попытку систематизировать существующие экспериментальные методы определения МИ и получить некоторые оценки их погрешностей осуществили в своих трудах М.М. Гернет и В.Ф. Ратобыльский.

В ЦАГИ на протяжении последних трех десятилетий над созданием стендов трудились В.В. Богданов, И.Н. Панченко, В.В. Петров, А.И. Самойленко и другие ученые, в настоящее время продолжаются работы по совершенствованию

таких стендов и исследованию новых подходов к их созданию. Подобные разработки ведутся и на других российских и иностранных предприятиях (НПО «Техномаш», КАМ-Инжиниринг, Resonic GmbH, Raptor Scientific и др.).

В промышленности для подтверждения метрологических характеристик стендов, как правило, используется габаритно-массовый макет изделия, для измерений характеристик которого предназначен стенд. В работах А.В. Ключникова для контроля погрешности стендов по определению характеристик геометрии масс роторов предлагается использовать меру МИ, которая представляет собой индивидуальный для каждого типа роторов имитатор с известными характеристиками, и набор грузов, прикрепляемых к ней на известном расстоянии. Немецко-японская компания Resonic, заявившая о себе на отечественном рынке в 2021 г., предлагает способ валидации своих стендов с помощью набора прецизионных цилиндров, рамы и мобильной координатно-измерительной машины из состава стенда. Тем не менее в публикациях отсутствуют научно-методические основы обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс, не даны какие-либо оценки достигнутой точности контрольных устройств, не освещены вопросы их создания и применения для передачи единиц величин к стендам. Данный аспект послужил предпосылкой к выбору цели и задач исследования.

#### **Цели и задачи исследования**

**Целью** диссертационной работы является повышение достоверности подтверждения метрологической исправности стендов и разработка научно обоснованных методов и средств обеспечения их прослеживаемости к государственным первичным эталонам.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработка достоверного и эффективного принципа обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс;
2. Разработка научно-обоснованной концепции и конструкции эталонов единиц массы, длины в области измерений координат ЦМ и МИ (далее – эталоны), разработка и исследование их математических моделей;
3. Выявление взаимосвязей между конструктивными, эксплуатационными и физическими особенностями эталонов и их инструментальной погрешностью;
4. Разработка методики измерений характеристик геометрии масс эталонов;
5. Апробация эталонов и методов определения их метрологических характеристик, включая разработку локальной поверочной схемы, методики их поверки и методики поверки стендов.

**Объектом исследования** является прослеживаемость измерений характеристик геометрии масс.

**Предметом исследования** являются эталоны единиц массы, длины в области измерений координат центра масс и момента инерции.

**Область исследования** соответствует пунктам «4. Совершенствование системы обеспечения единства измерений в стране» и «5. Разработка и внедрение новых государственных эталонов единиц физических величин, позволяющих существенно повысить единство и точность измерений» паспорта специальности 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение.

**Научная новизна исследования** заключается в том, что:

1. Разработан и научно обоснован на базе системного подхода новый принцип решения задачи обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс, основанный, в отличие от существующих, на отнесении стендов к средствам измерений и их поверке универсальными эталонами модульной конструкции в широком диапазоне измерений и позволяющий повысить достоверность подтверждения метрологической исправности стендов;

2. Впервые разработана многофакторная математическая модель модульных эталонов, унифицированная для построения алгоритма программной обработки данных при их поверке;

3. Впервые установлены взаимосвязи между конструктивными и эксплуатационными требованиями к модульным эталонам и их инструментальными погрешностями с учетом норм государственных стандартов, на основе которых сформулированы научно обоснованные рекомендации по выбору в зависимости от требуемой точности эталонов допусков на их размеры и введению корректирующих коэффициентов в значения воспроизводимых величин для уменьшения температурной погрешности;

4. Предложена новая методика определения характеристик геометрии масс модульных эталонов косвенными измерениями, основанная на измерениях массы и геометрических размеров всех модулей эталонов, которая, в отличие от известных ранее, позволяет уменьшить погрешность неадекватности модели за счет совместного применения аналитического метода определения характеристик геометрии масс и метода балансировки на призматических опорах, а также дополнительных измерений температуры и линейных размеров модулей.

#### **Практическая значимость работы**

1. Созданы и утверждены Росстандартом эталоны с наибольшими пределами воспроизведения массы 57 и 1193 кг ( $\delta = 0,005 \dots 0,5 \%$ ), вертикальной координаты центра масс 555 и 1232 мм ( $\Delta = 0,2 \dots 1,0$  мм), центрального момента инерции 7,4 и 552,8 кг·м<sup>2</sup> ( $\delta = (0,3 \dots 0,5) \%$ ).

2. Разработаны и утверждены приказами Росстандарта методика поверки эталонов МП 4.28.013-2020 и методика поверки стенда МП 4.28.001-2015.

3. Разработана и согласована с ВНИИМС локальная поверочная схема для средств измерений массы, координат центра масс и моментов инерции.

4. Разработаны технические требования к эталонам.

5. Два стенда прошли процедуру утверждения типа с применением предложенного принципа обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс (регистрационные номера 62420-15 и 72575-18).

**Реализация и внедрение результатов работы.** Предложенная методика определения характеристик геометрии масс эталонов применена автором для разработки методики калибровки МК 4.28.001-2014 (ФГУП «ВНИИА») и методики поверки эталонов МП 4.28.013-2020 (утв. приказом Росстандарта от 02.06.2021 №928) и внедрена в ФАУ «ЦАГИ» и ФГУП «ВНИИА». Методика поверки опробована при утверждении типа эталонов, регистрационный номер 81928-21. Способ определения погрешности стендов с помощью эталонов ЭМЦИ защищен патентом № 2697442 РФ.

**Методы исследования.** В исследовании применялись системный подход, положения теории измерений, теоремы геометрии масс, метод разбиения на конечные части, метод отрицательных масс, теорема Гюйгенса-Штейнера, аналитический метод определения характеристик геометрии масс, метод линеаризации, а также экспериментальные методы: метод косвенных измерений, метод балансировки на призматических опорах.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Принцип решения задачи обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс, основанный на отнесении стенов к средствам измерений и их поверке с применением универсальных эталонов модульной конструкции;

2. Многофакторная математическая модель модульных эталонов, унифицированная для построения алгоритма программной обработки данных при их поверке;

3. Установленные взаимосвязи между конструктивными и эксплуатационными требованиями к модульным эталонам и их инструментальными погрешностями с учетом норм государственных стандартов и рекомендации по выбору в зависимости от требуемой точности эталонов допусков на их размеры и введению корректирующих коэффициентов в номинальные значения воспроизводимых величин;

4. Методика определения метрологических характеристик модульных эталонов косвенными измерениями, включающая совместное применение аналитического метода определения характеристик геометрии масс и метода балансировки на призматических опорах, а также дополнительные измерения температуры и линейных размеров модулей.

**Степень достоверности.** Достоверность результатов достигается применением в исследовании основополагающих понятий о центре масс тела, справочных формул, теоремы Гюйгенса-Штейнера, основополагающих методов метрологии и поверенных средств измерений (компараторов массы, эталонных гирь, координатно-измерительных машин). Апробация работы выполнена при утверждении эталонов и утверждении типа двух стенов.

**Апробация результатов.** Результаты работы докладывались и обсуждались на 18 научно-технических конференциях, в том числе на 6 международных: IX Всероссийская научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации» (2012 г., пос. Поведники, Московская область, ВНИИФТРИ); XII, XIII Всероссийские научно-технические конференции «Состояние и проблемы измерений» (2013 г., 2015 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана); XXIII, XXIV, XXV и XXVI National Scientific Symposium with International Participation, METROLOGY AND METROLOGY ASSURANCE (2013, 2014, 2015, 2016 г.г., г. Созополь, Болгария, Технический университет – София), 7th IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace, METROAEROSPACE 2020 (2020 г., Италия, University of Pisa) и др.

**Публикации по теме диссертации.** По материалам диссертационной работы опубликованы 22 печатные работы, из них одна – в изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, две - в

международной базе Scopus, одна – патент на изобретение. Исследования выполнялись в рамках госконтрактов ЦАГИ с Минпромторгом России, контрактов с предприятиями авиационно-космической промышленности: ФГУП «ВНИИА», АО «НПО Лавочкина», АО «Корпорация Комета», АО «НПК «КБМ».

**Личный вклад автора.** Автором самостоятельно проанализирована исходная информация, предложен и обоснован принцип обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс посредством утверждения типа и поверки стендов, выявлены источники погрешности эталонов, разработана их математическая модель и методика определения метрологических характеристик, выполнены все аналитические исследования, разработаны нормативно-технические документы, проведены методические работы по утверждению эталонов и стендов, разработана концепция ПО «MS\_NKM». Под методическим руководством автора проведены экспериментальные исследования, разработана конструкция эталонов, проведены прочностные расчеты.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 137 страниц, в том числе 50 рисунков, 42 таблицы и список источников из 121 наименования.

#### **Основное содержание работы**

**Во введении** изложены актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

**Глава 1** состоит из пяти параграфов. В **параграфе 1.1** дано описание исследуемых характеристик геометрии масс, приведен обзор методов их измерений. В **параграфе 1.2** дано описание и сравнительные характеристики современных устройств измерений характеристик геометрии масс. Стенд, созданный ЦАГИ для предприятия авиационно-космической отрасли, показан на Рисунке 1. В **параграфах 1.3** и **1.4** автором описаны современные принципы обеспечения единства измерений характеристик геометрии масс в России и за рубежом, проанализированы законодательные и нормативные требования. Описаны особенности аттестации стендов в качестве испытательного оборудования, систематизированы сведения об аттестованных методиках измерений, особенности предлагаемых контрольных приспособлений.

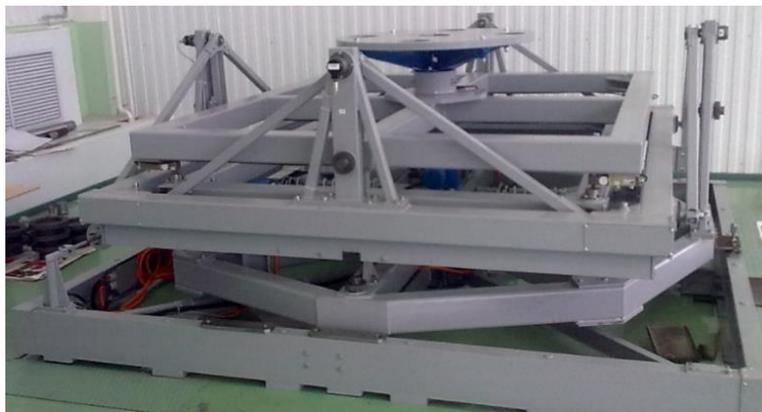


Рисунок 1. Стенд, созданный ЦАГИ

В параграфе 1.5 автором систематизированы сведения о достигнутом уровне точности отечественных и зарубежных стандов, установлены целевые показатели точности для них и выделено две области для дальнейших исследований:

- станды ЦАГИ (область исследования 1);
- станды наивысшей заявляемой точности (область исследования 2).

Глава 2 состоит из четырех параграфов, в ней изложены концепция эталонов и результаты исследования их инструментальной погрешности. В параграфе 2.1 автором рассмотрено обеспечение прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс с позиций системного подхода. В результате проведенного сравнения определений терминов «технологическое оборудование», «испытательное оборудование», «техническая система (комплекс) полигона или испытательной станции», «технические системы и устройства с измерительными функциями», «средство измерений» принято решение об отнесении стандов к средствам измерений. Выявлены недостатки и возможности аттестации стандов в качестве испытательного оборудования (Таблица 1).

Таблица 1. Недостатки и возможности аттестации стандов в качестве испытательного оборудования

Недостатки		Возможности
Методические	- противоречие принятой терминологии при отнесении стандов к испытательному оборудованию, техническим системам (комплексам) полигона или испытательной станции, техническим системам и устройствам с измерительными функциями; - противоречие закону «Об обеспечении единства измерений» в случае невозможности поверки встроенных средств измерений: измерения на стенде с помощью не имеющего метрологического статуса контрольного приспособления и не прошедших поверку встроенных средств измерений	-
Организационные	- необходимость аттестации методик измерений и программного обеспечения; утверждения типа и периодическая поверка встроенных средств измерений с частичной разборкой станда и последующей сборкой и переналадкой; - для каждой новой точки диапазона измерений требуется новое контрольное приспособление; - увеличение длительности измерений на стенде в 2-3 раза при применении метода неполного замещения или подтверждении погрешности станда с помощью контрольного приспособления при каждом измерении	- не требуется подтверждение соответствия для периодической аттестации стандов; - меньшая длительность аттестации станда (проверка одной точки диапазона измерений)
Достоверности контроля метрологической исправности станда	подтверждение ограниченного диапазона измерений станда (1-2 точки координат ЦМ)	-

По результатам анализа предложен новый принцип обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс, основанный, в отличие от существующих, на отнесении стенов к средствам измерений и их поверке эталонами, характеристики которых определяются косвенными измерениями аналитическим методом. Показано, что:

- поверка стенов позволяет снизить финансовые и временные затраты на их метрологическое обслуживание, т.к. исключает необходимость утверждения типа и поверки встроенных средств измерений, аттестации методик измерений и программного обеспечения, использование контрольного приспособления при каждом измерении;

- модульная конструкция эталонов позволяет подтверждать метрологические характеристики стенов во всем диапазоне их измерений, обеспечив число поверяемых точек 5-6 в соответствии с МИ 187-86, а значит повысить достоверность контроля по сравнению с поверкой в одной точке; применять один эталон для совокупности стенов, снизив затраты на их метрологическое обслуживание.

**В параграфе 2.2** описана концепция эталонов (Рисунок 2), которые представляют собой набор многозначных мер и предназначены для воспроизведения одновременно трех единиц величин – единицы массы, а также единиц длины в области измерений координат ЦМ и МИ относительно трех координатных осей. Предложенная конструкция защищена патентом № 2697442 РФ.



Рисунок 2. Эталон НКМ-50, ЦАГИ

Аналитическим методом определения характеристик геометрии масс обусловлены особенности конструкции: все модули эталонов, включая крепежные элементы, имеют форму, образованную простыми телами вращения (цилиндрами). При этом выделены три типа эталонных мер: сегмент, диск и гиря. Ввиду сложного и многоступенчатого расчета характеристик эталонные меры предложено сгруппировать в стандартные комплекты по их типу и определять их индивидуальные характеристики. При поверке стенов несколько стандартных комплектов закрепляют на его измерительной платформе, образуя при этом

конфигурации эталона (Рисунок 3), воспроизводящие величины в контрольных точках диапазона измерений стенда. Показано, что количество всевозможных конфигураций, которое можно получить сочетанием этих стандартных комплектов, превышает 60 тыс.

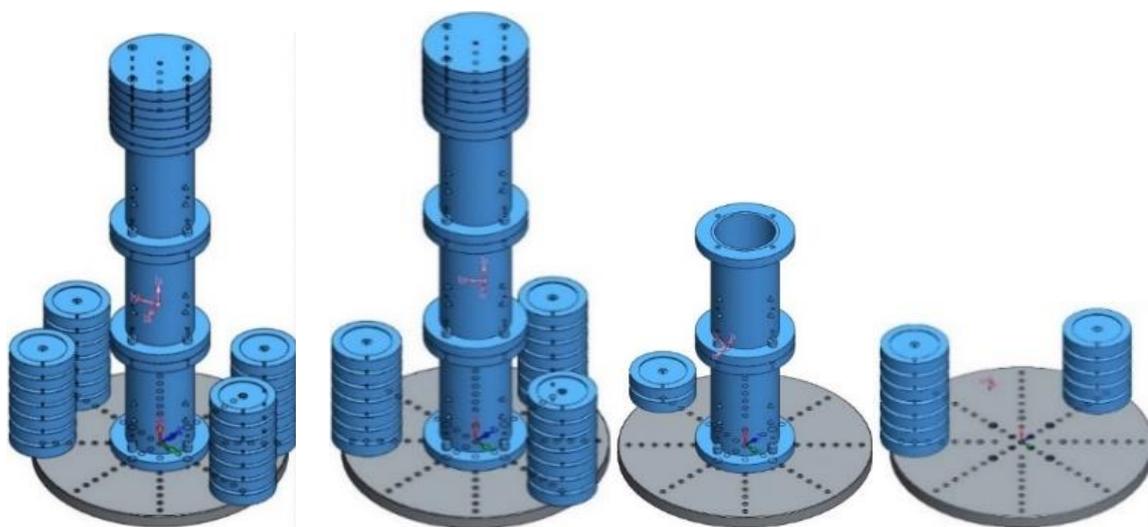


Рисунок 3. Примеры конфигураций эталона

**В параграфе 2.3** освещены вопросы разработки многофакторной математической модели эталонов.

Модель координат ЦМ эталонов разработана на базе уравнений для нахождения центра тяжести объема однородного твердого тела. Для построения модели МИ эталонов автором применены справочные аналитические формулы для вычисления МИ цилиндра, и теорема Гюйгенса-Штейнера о параллельных осях. Для учета отверстий, переходов, фланцев в модулях эталонов применен метод разбиения на конечные части и метод отрицательных масс. Введение коэффициентов типа и расположения элементов, представление расстояний, определяющих положение элементов, в виде функциональной зависимости от других размеров позволило унифицировать модель для построения алгоритма программной обработки данных при поверке эталонов. Модель разделена автором на три части.

Часть 1 предназначена для определения характеристик модулей эталонов.

Часть 2 предназначена для определения характеристик стандартного комплекта на основе представления его как механической системы тел с известными характеристиками геометрии масс.

Часть 3 предназначена для определения характеристик конфигураций эталонов (аналогично части 2).

Для уменьшения погрешности эталонов модель учитывает влияние неоднородности материала, погрешностей изготовления и температурного линейного расширения.

Ниже приведен комплекс уравнений, описывающих часть 1 универсальной многофакторной математической модели:

$$x_{20} = \left\{ \left[ \left( \sum_{j=1}^r k_j d_j^2 h_j k_{xj} (Hx_j + h_j / 2) \right) / \left( \sum_{j=1}^r k_j d_j^2 h_j \right) \right] + q_n \right\} \cdot q_{t20}$$

$$d_j = \left( \sum_{i=1}^{\lambda} d_{ji} \right) / \lambda, \text{ кроме крепежных отверстий, штифтов и крепежных элементов}$$

$$h_j = \left( \sum_{i=1}^{\mu} h_{ji} \right) / \mu, \text{ кроме крепежных отверстий и штифтов}$$

$$y = 0$$

$$z = 0$$

$$\rho = 10^9 \cdot m / \left( \frac{\pi}{4} \sum_{j=1}^r k_j d_j^2 h_j \right)$$

$$Ix = 10^{-15} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^r k_j d_j^2 h_j \left( \frac{d_j^2}{8} + Hy_j^2 + Hz_j^2 \right)$$

$$Iy = 10^{-15} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^r k_j d_j^2 h_j \left( \frac{d_j^2}{16} + \frac{h_j^2}{12} + \left( k_{xj} (Hx_j + h_j / 2) - x \right)^2 + Hz_j^2 \right) \quad , (1)$$

$$Iz = 10^{-15} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^r k_j d_j^2 h_j \left( \frac{d_j^2}{16} + \frac{h_j^2}{12} + \left( k_{xj} (Hx_j + h_j / 2) - x \right)^2 + Hy_j^2 \right)$$

$$Hx_j = \sum_{i=1}^u Cx_{ji} \cdot Lx_{ji}$$

$$Hy_j = \sum_{i=1}^v Cy_{ji} \cdot Ly_{ji}$$

$$Hz_j = \sum_{i=1}^w Cz_{ji} \cdot Lz_{ji}$$

$$q_{t20} = 1 - \alpha_{эм} \cdot \Delta t_{ног} : x \leq 1000 \text{ мм}, \Delta t_{ног} \geq 2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$1000 < x \leq 2000 \text{ мм}, \Delta t_{ног} \geq 1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$2000 < x \leq 5000 \text{ мм}, \Delta t_{ног} \geq 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{ног} = t_{ног} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q_n = \Delta x, \Delta x \geq 0, 1 \Delta x_{дон}$$

$$q_n = 0, \Delta x < 0, 1 \Delta x_{дон}$$

где  $m$  – измеренная масса модуля;  $x_{20}$  – вертикальная координата ЦМ модуля в собственной системе координат при  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $k_j$  – коэффициент типа  $j$ -того элементарного цилиндра ( $k_j = 1$  для валов;  $k_j = -1$  для отверстий);  $d_j$ ,  $h_j$  – диаметр и высота каждого  $j$ -той элементарного цилиндра, на которые условно разбит модуль эталона;  $k_{xj}$  – коэффициент расположения  $j$ -того элементарного цилиндра по оси  $X$ ;  $Hx_j$ ,  $Hu_j$  и  $Hz_j$  – расстояния, определяющие положение элементов;  $r$  – количество элементарных цилиндров, на которые условно разбит модуль;  $q_n$  – поправка на неоднородность материала;  $q_t$  – температурная поправка;  $y$ ,  $z$  – горизонтальные координаты ЦМ модуля в собственной системе координат;  $\rho$  – плотность модуля;  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$  – центральные МИ модуля;  $Cx_{ji}$ ,  $Cy_{ji}$ ,  $Cz_{ji}$  и  $Lx_{ji}$ ,  $Ly_{ji}$ ,  $Lz_{ji}$  – коэффициенты и аргументы функций, определяющих расстояния  $Hx_j$ ,  $Hu_j$ ,  $Hz_j$ ;  $\lambda$

и  $\mu$  – количество сечений при измерении диаметров и высот;  $\alpha_{\text{от}}$  – температурный коэффициент линейного расширения материала модуля;  $\Delta t_{\text{пов}}$  – отклонение температуры при поверке  $t_{\text{пов}}$  от 20 °С;  $\Delta x$  – отклонение определенного балансировкой значения координаты ЦМ от измеренного аналитическим методом;  $\Delta x_{\text{доп}}$  – допускаемое отклонение координаты ЦМ модуля.

В параграфе 2.4 изложены результаты исследования инструментальной погрешности эталонов. Автором выявлены и проанализированы источники погрешностей (Рисунок 4), законы накопления погрешностей в стандартных комплектах, получены их оценки с учетом требований к эталонам (Таблица 2).

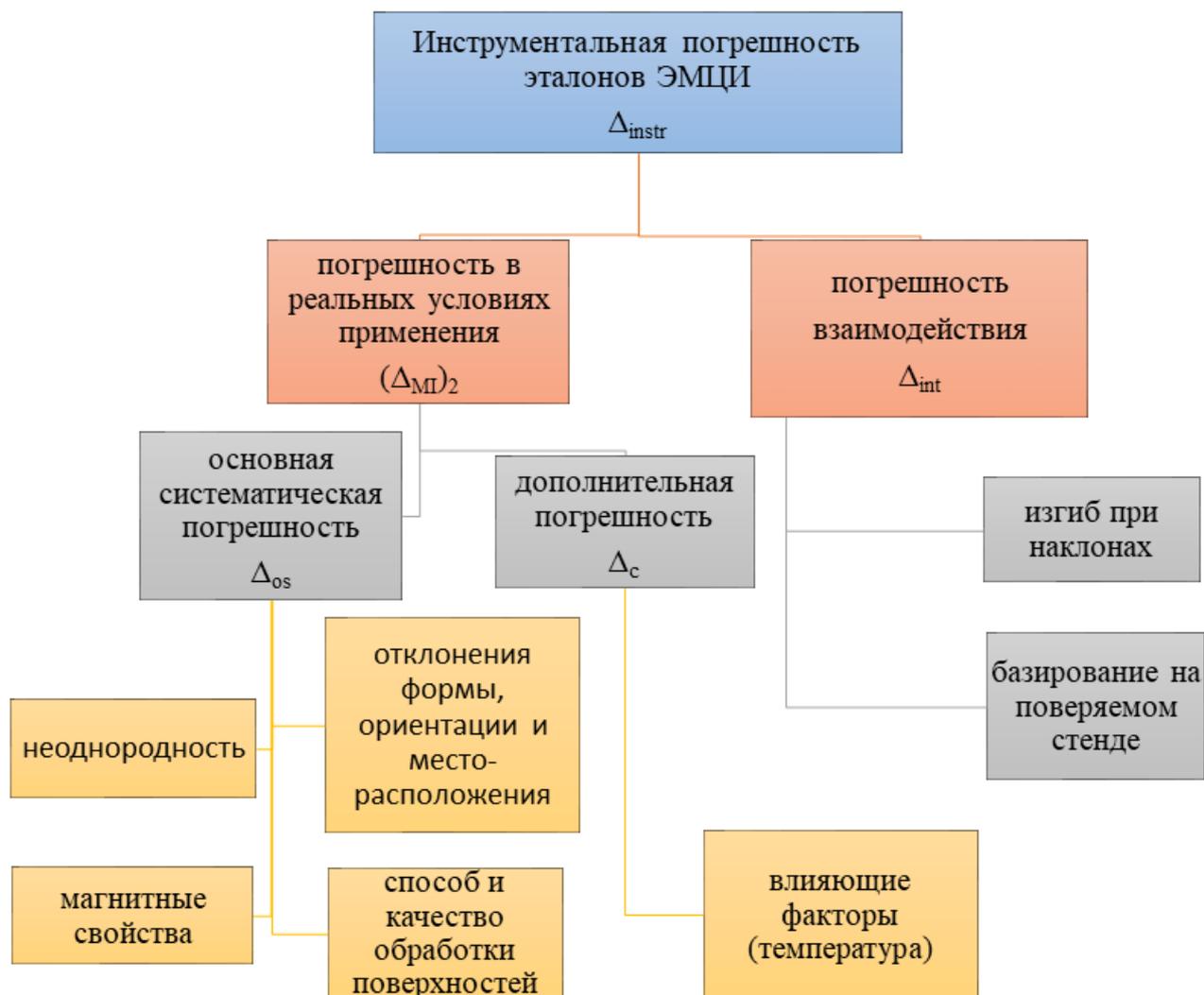
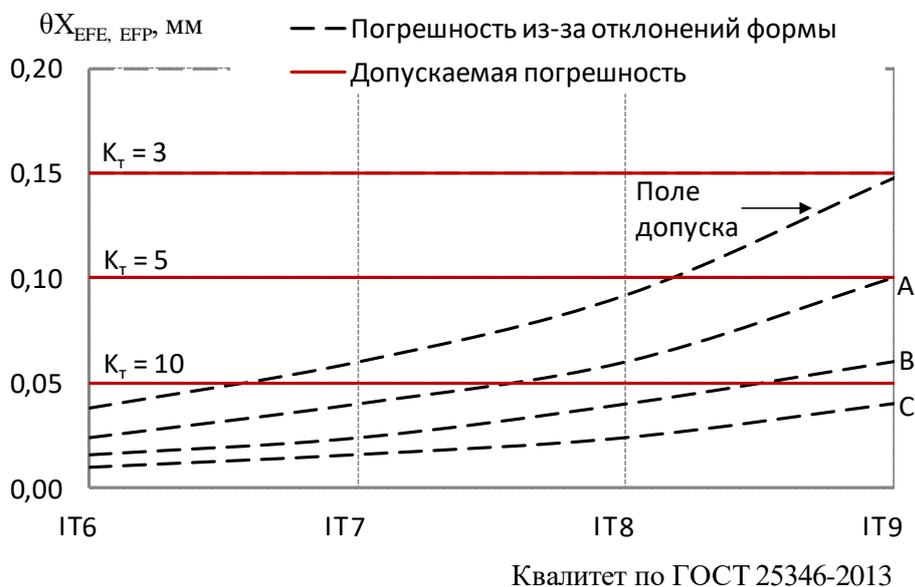


Рисунок 4. Структурная схема инструментальной погрешности эталонов

Таблица 2. Метрологические требования к эталонам

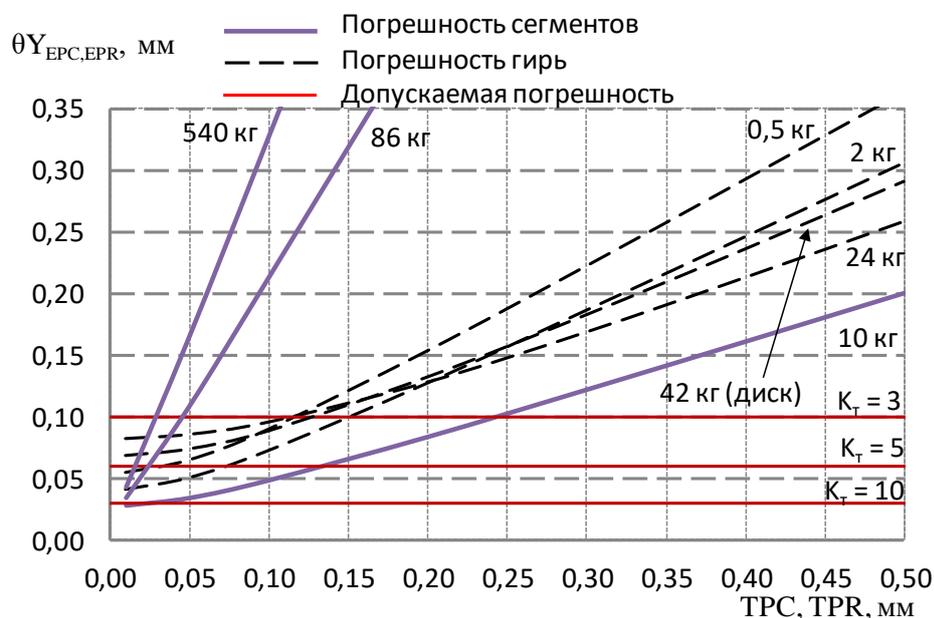
Величина	Диапазон воспроизведения	Допускаемая погрешность $\Delta_{\text{доп}}$ ( $\delta_{\text{доп}}$ ) для области исследования	
		1	2
Масса	1 – 5 · 10 <sup>3</sup> кг	0,01– 0,5 %	0,01 %
Вертикальная координата ЦМ	40 – 5 · 10 <sup>3</sup> мм	0,5 – 1,5 мм	0,03 мм
Горизонтальная координата ЦМ	0 – 700 мм	0,3 мм	0,03 мм
Центральный МИ	1,5 · 10 <sup>-1</sup> – 3 · 10 <sup>3</sup> кг · м <sup>2</sup>	0,3 – 1,0 %	0,03 %

Для оценивания погрешности, обусловленной отклонениями формы и расположения, автором применены положения теории погрешностей, принцип взаимозаменяемости и рекомендуемые ГОСТ 24643-81 соотношения между допусками на эти отклонения и допусками размеров. Это позволило впервые установить взаимосвязи между требованиями к эталонам и их инструментальными погрешностями (Рисунки 5, 6) и сформулировать рекомендации по выбору допусков на размеры.



A, B, C – уровни относительной геометрической точности по ГОСТ 24643-81;  
 $K_T = \Delta_{\text{доп}}/\theta$  – коэффициент запаса точности

Рисунок 5. Инструментальная погрешность эталона  $\theta X_{EFE, EFP}$ , обусловленная отклонениями формы: плоскостности EFE и профиля продольного сечения EFP



TPC – допуск соосности;  
 TPR – допуск перпендикулярности;  
 $K_T = \Delta_{\text{доп}}/\theta$  – коэффициент запаса точности

Рисунок 6. Инструментальная погрешность эталона  $\theta Y_{EPC, EPR}$ , обусловленная отклонениями расположения: соосности EPC и перпендикулярности EPR

Проведено исследование зависимости погрешности эталона, обусловленной температурным линейным расширением, от изменения температуры и воспроизводимых характеристик (Рисунок 7). Разработаны рекомендации по введению корректирующих коэффициентов в значения координаты ЦМ для

уменьшения температурной погрешности. Показано, что введение поправок в МИ не требуется.

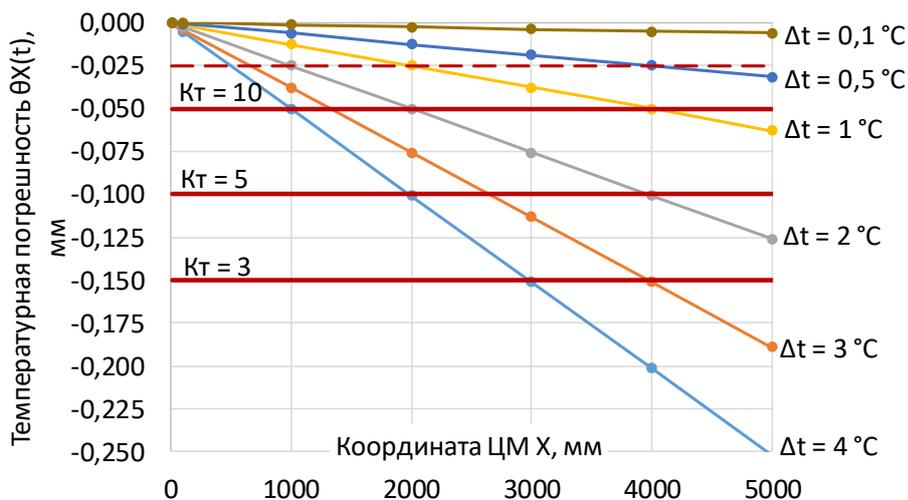


Рисунок 7. Инструментальная погрешность эталона  $\theta X(t)$ , обусловленная отклонением  $\Delta t$  температуры  $t$  от нормальной ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ )

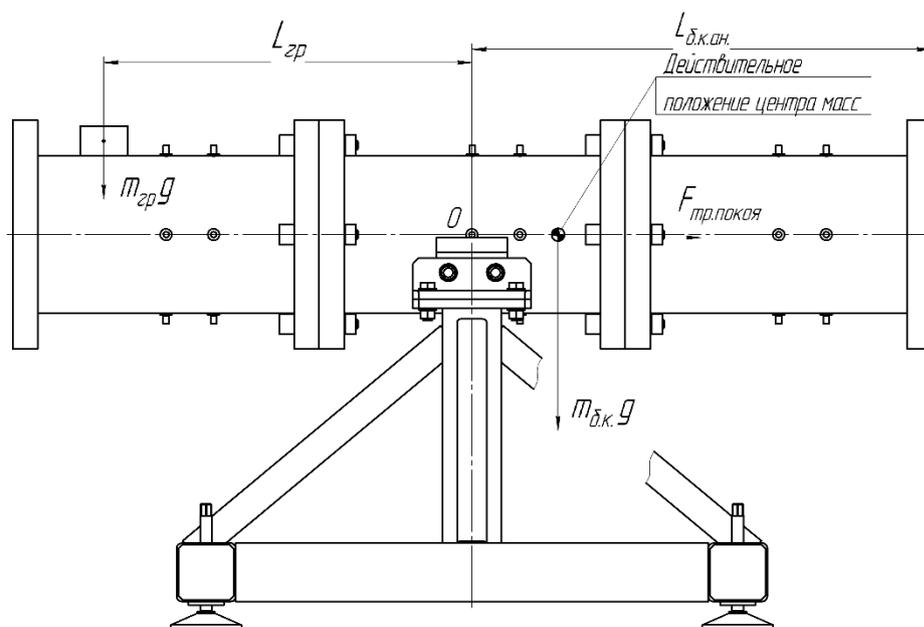
Автором также оценено влияние остальных источников погрешности и установлены условия, при которых погрешность не выйдет за допускаемые пределы (Таблица 3).

Таблица 3. Суммарная инструментальная погрешность эталонов (область исследования 1)

Составляющие погрешности		X, мм	Y, Z, мм	I <sub>x</sub> , I <sub>y</sub> , I <sub>z</sub> , %
Основная систематическая	$\Delta_{os}$	0,09	0,08	0,03
Дополнительная	$\Delta_c$	поправка	0,00	0,00
Взаимодействия	$\Delta_{int}$	0,05	0,03	0,03
Суммарная	$\Delta_{instr}$	0,12	0,09	0,05
		$0,23\Delta_{доп}$	$0,31\Delta_{доп}$	$0,16\delta_{доп}$

**Глава 3** состоит из трех параграфов, в ней изложены вопросы разработки методики определения метрологических характеристик эталонов. В **параграфе 3.1** рассмотрены недостатки и возможности аналитического и экспериментального методов определения характеристик геометрии масс. Ключевой недостаток последнего – неприменимость для МИ. Поэтому в основу методики определения характеристик эталонов ЭМЦИ автором положен менее трудоемкий для модульной конструкции аналитический метод. Для уменьшения погрешности неадекватности модели в данном методе автором предлагается предпринять ряд мероприятий:

- для всех размеров, за исключением крепежных элементов, проводить измерения в нескольких измерительных сечениях, определять значения отклонений формы и расположения;
- применить метод дополнительных измерений температуры и ввести поправочные коэффициенты  $q_t$  во все три части математической модели;
- совместить применение аналитического и экспериментального методов и для эталонных мер, имеющих форму, вытянутую вдоль вертикальной оси, дополнительно определять вертикальную координату ЦМ балансировкой на призматических опорах и при необходимости вводить поправку  $q_{неодн}$  в расчетное значение (Рисунок 8).



$L_{б.к.ан.}$  – расстояние до нижней плоскости меры;  
 $m_{гр}$  – масса уравнивающего груза;  
 $L_{гр}$  – расстояние до ЦМ уравнивающего груза;  
 $m_{б.к.}$  – масса меры

Рисунок 8. Определение поправки на неоднородность материала

В параграфе 3.2 рассмотрена погрешность косвенных измерений при определении характеристик эталонов. Автором получены зависимости инструментальной погрешности измерений от погрешности применяемых эталонных средств измерений, на основании чего впервые сформулированы рекомендации по их выбору в зависимости от требуемой точности эталонов. Рассмотрены также источники методической погрешности, обусловленной погрешностью определения поправок  $q_t$  и  $q_{неодн.}$ , наличием фасок, округлениями при вычислениях, выталкивающей силой воздуха и даны их оценки, а также оценки случайной и суммарной погрешности косвенных измерений (Таблица 4) и установлены условия, при которых эта погрешность не выйдет за допускаемые пределы. В параграфе 3.3 рассмотрена предложенная автором концепция универсального программного обеспечения для расчета метрологических характеристик эталона «MS\_NKM», позволяющая уменьшить трудоемкость процесса вычислений и субъективные ошибки от влияния оператора.

Таблица 4. Суммарная погрешность измерений (область исследования 1)

Измеряемая величина	X, мм	I <sub>x</sub> , %	I <sub>y</sub> , I <sub>z</sub> , %
Предельная погрешность косвенных измерений в долях от допускаемой погрешности (Таблица 2)	0,19 $\Delta_{доп}$	0,4 $\delta_{доп}$	0,4 $\delta_{доп}$

**Глава 4** состоит из трех параграфов, в ней рассмотрены вопросы апробации эталонов и методов определения их метрологических характеристик. В рамках реализации предложенного принципа созданы и утверждены Росстандартом эталоны (Таблица 5), рассмотренные в параграфе 4.1.

Таблица 5. Утвержденные Росстандартом эталоны

Эталон, регистрационный номер	Масса	Координата ЦМ	МИ
Эталон стенда МЦИ-1200М1, 3.1.АЗО.0252.2015 (ВНИИА)	24...1193 кг	37...1232 мм	0,1...552,8 кг·м <sup>2</sup>
НКМ-50, 81928-21 (ЦАГИ)	1...57 кг	13...555 мм	0,15...7,4 кг·м <sup>2</sup>
Пределы допускаемой погрешности	$\delta = 0,005...0,5 \%$	$\Delta = 0,2...1,0 \text{ мм}$	$\delta = 0,3...0,5 \%$

Полученные оценки инструментальной погрешности эталонов и суммарной погрешности косвенных измерений позволили автору разработать локальную поверочную схему передачи единиц величин к предложенным рабочим эталонам от государственных первичных эталонов единицы массы ГЭТ 3-2020 и единицы длины ГЭТ 2-2021 (Рисунок 9).

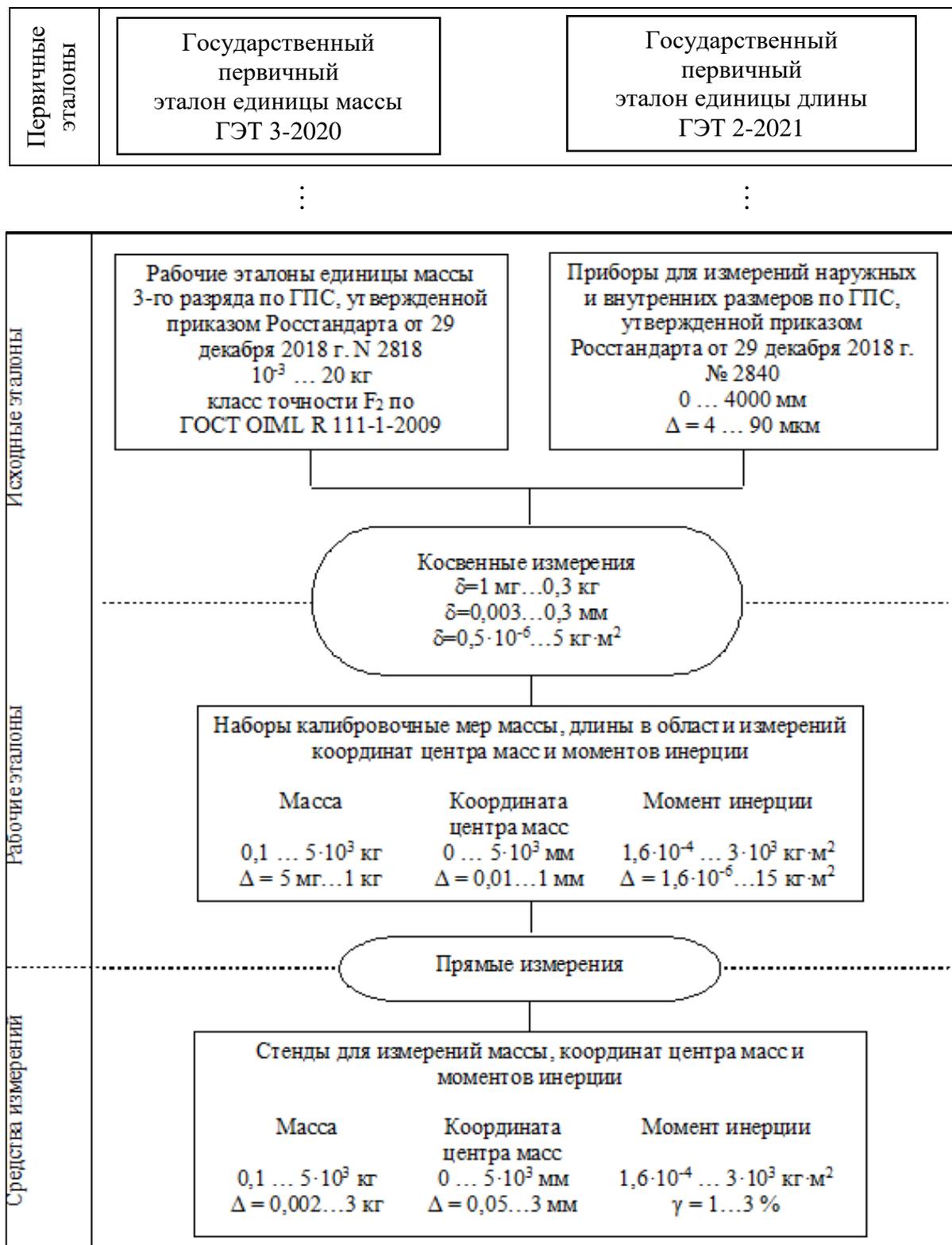


Рисунок 9. Локальная поверочная схема для средств измерений массы, координат центра масс и моментов инерции

Предложенная методика определения характеристик геометрии масс эталонов применена автором для разработки методики калибровки МК 4.28.001-2014 (ФГУП «ВНИИА») и методики поверки МП 4.28.013-2020 (утв. приказом Росстандарта от 02.06.2021 №928) эталонов. Методики внедрены в ФАУ «ЦАГИ» и ФГУП «ВНИИА». Методика поверки опробована при утверждении типа и первичной поверке эталонов, регистрационный номер 81928-21.

В **параграфе 4.2** отмечено, что результаты диссертационного исследования применены при утверждении типа двух стандов: для ФГУП «ВНИИА» и АО «НПО Лавочкина» (регистрационные номера 62420-15 и 72575-18). Использование результатов исследования позволили автору обосновать требования к конструкции эталонов, изложенные в **параграфе 4.3**, оптимальные допуски на геометрические размеры (Таблица 6) и требования к качеству поверхности (толщина покрытия не более 4 мкм, шероховатость Ra1,6).

Таблица 6. Требования к допускам формы и расположения

Тип модуля	Допуск						
	плоскостности TFE	профиля продольного сечения TFP	прямолинейности TFL	параллельности TFA	соосности элементов меры TPC <sub>M</sub>	соосности элементов базирования TPC <sub>баз</sub>	перпендикулярности TPR
Гиря	IT9A	IT9	IT9C	IT9C	0,01 мм	0,025 мм	0,015 мм
Диск	IT9A	IT9	IT9C	IT9	0,01 мм	0,025 мм	0,015 мм
Сегмент	IT9A	IT9B	IT9C	IT8C	0,05 мм	0,025 мм	0,015 мм

В **заключении** изложены основные выводы и результаты выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

В **приложениях** приведены копии документов, подтверждающих практическую реализацию предложенных автором научных идей.

### Основные результаты диссертации

1. Предложен новый принцип решения задачи обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс, основанный на отнесении стандов к средствам измерений и поверке их универсальными эталонами модульной конструкции, который позволил осуществлять подтверждение метрологических характеристик стандов во всем диапазоне измерений и снизить финансовые и временные затраты на их метрологическое обслуживание. Утверждены типы двух стандов (регистрационные номера 62420-15 и 72575-18).

2. Предложена новая унифицированная многофакторная математическая модель эталонов, учитывающая влияние неоднородности материала, погрешностей изготовления и температурного линейного расширения, что позволило уменьшить инструментальную погрешность эталонов. Унификация модели для построения алгоритма программной обработки данных при поверке эталонов позволила существенно снизить трудоемкость расчетов их характеристик, а также исключить субъективные погрешности, возникающие при построении индивидуальных моделей.

3. Выявлены взаимосвязи между погрешностями изготовления эталонов, ограниченными конструктивными требованиями, и инструментальными

погрешностями эталонов, которые позволили сформулировать рекомендации по выбору для них установленных государственными стандартами допусков формы и расположения, взаимно увязанных с допусками на размеры.

4. Выявлены взаимосвязи между эксплуатационными требованиями к влияющим факторам (температуре) в пределах диапазона воспроизведения координат ЦМ и МИ эталонов и их инструментальной погрешностью, обусловленной температурным линейным расширением. На основании этих взаимосвязей сформулированы рекомендации по введению корректирующих коэффициентов в значения вертикальной координаты ЦМ, что позволило уменьшить температурную погрешность эталонов. Обосновано отсутствие необходимости введения поправок в значения моментов инерции.

5. Предложена новая методика определения характеристик эталонов косвенными измерениями, включающая совместное применение аналитического и экспериментального метода и дополнительные измерения температуры и линейных размеров модулей, которая позволила определять все характеристики эталонов и уменьшить погрешность неадекватности модели. Методика реализована в методике поверки эталонов МП 4.28.013-2020 (утв. приказом Росстандарта от 02.06.2021 №928).

6. Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность метрологической службы ЦАГИ и позволили: повысить достоверность контроля метрологических характеристик стендов, обеспечив полный охват диапазона измерений (5-6 точек вместо 1-2); существенно (в 5-10 раз) снизить затраты на их метрологическое обслуживание; уменьшить инструментальную погрешность эталонов в 3-4 раза, а также разработать технические требования к эталонам, позволяющие достигнуть погрешности 0,03 мм для координат центра масс и 0,03 % для моментов инерции.

## **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

### **Публикации в рецензируемых изданиях:**

1. Довыденко О.В., Самойленко А.И., Петров В.В. Система метрологического обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс // Измерительная техника. 2020. № 12. С. 28-34. (1,3 п.л./1,0 п.л.).

2. Довыденко О.В. Метод измерений массы, координат центра масс и моментов инерции специальных эталонов модульной конструкции при их поверке // Приборы. 2021. № 11. С. 40-48. (1,3 п.л.).

3. Dovydenko, O., Samoilenko, A., Petronevich, V. Special measurement standard of mass, mass center and inertia moment // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2020 - Proceedings, 2020, P. 430–435 (1,0 п.л./0,8 п.л.).

4. Патент № 2722962 Российская Федерация, МПК G01M 1/10 (2006.01) / Способ определения погрешности стенда для измерения характеристик геометрии масс изделий и устройство для его осуществления: № 2019135946: заявл. 08.11.2019: опубл. 05.06.2020/Довыденко О.В., Самойленко А.И., Бугров А.Ю., Лютов В.В., Куликов А.А. 20 с. (1,9 п.л./1,5 п.л.).

### Прочие основные публикации:

5. Довыденко О.В. Автоматизированная система управления аттестацией спецстенда для определения моментов инерции объектов с использованием метрологического контрольного приспособления модульного типа // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», ВНИИФТРИ, Москва, 2012. С. 48–51 (0,4 п.л.).

6. Довыденко О.В. Выбор допусков формы и расположения поверхностей с учетом их влияния на погрешность измерений координат центра масс контрольного приспособления модульного типа // Измерения в современном мире - 2013: Сборник научных трудов Четвертой международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире - 2013», С-Пб.: Изд-во Политехнического университета, 2013, С. 19-20. (0,2 п.л.).

7. Довыденко О.В. Поверочная схема для средств измерений массы, координат центра масс и момента инерции недеформируемого твердого тела //Сборник материалов XII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2013. С. 102-104. (0,3 п.л.).

8. O. Dovydenko., V. Petronevich, A. Samoylenko. Validation of a measurement standard of mass unit, length unit areas of center of gravity coordinates measurements and inertia moment unit for calibration of measuring instruments of mass and inertial characteristics of space-rocket branch products // 25th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance 2015. Proceedings of the symposium. 2015. P.95-100. (0,6 п.л./0,5 п.л.).

9. O. Dovydenko., A. Samoylenko, E. Shalneva Research of transfer of uncertainty of length unit areas of center of gravity coordinates measurements to the special measurement standard in the way of knife support balance // 26th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance 2016. Proceedings of the symposium. Sozopol, Bulgaria, 2016. P. 438-444. (0,6 п.л./0,4 п.л.).

10. Государственная система обеспечения единства измерений. Наборы калибровочные мер массы, длины в области измерений координат центра масс и момента инерции НКМ-6ГС-60, НКМ-50. Методика поверки. МП 4.28.013-2020 [Электронный ресурс]: Методика поверки / Довыденко О.В. г. Жуковский: ФГУП «ЦАГИ», 2020. 22 с. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1388509> (дата обращения: 17.06.2021). (1,8 п.л.).

11. Довыденко О.В. Методические погрешности при воспроизведении единиц специальным эталоном массы, координат центра масс и моментов инерции // Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвящённой 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, доктора физико-математических наук, профессора Кисилёва М.И. (Москва, 17-19 марта 2020 г.) / ред. кол.: А.А. Крансуцкая, Е.В. Тумакова, Е.В. Кречетова. М.: Диона, 2020. С.104-108. (0,3 п.л.).