

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В РОССИИ. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ»

Выполнил студент

419 группы

Шишков Платон Игоревич

научный руководитель:

к.ф.м.н., с.н.с. Шапаева Татьяна Борисовна

Допущена к защите

Зав. кафедрой _____

Москва

2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. МЕТРОЛОГИЯ ЗА РУБЕЖОМ	3
1.1. Анализ стратегии Консультативного Комитета по электромагнитным измерениям Международного бюро мер и весов	6
1.2 Место России в международных метрологических организациях	12
ГЛАВА 2. МЕТРОЛОГИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.	15
2.1 Государственные первичные эталоны Российской Федерации	19
2.2 Государственные первичные эталоны Российской Федерации в области магнитных измерений	22
2.3. Рабочие эталоны.....	26
ГЛАВА 3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	27
3.1 Средства измерения, зарегистрированные в Госреестре	28
3.1.1 Тесламетры на основе эффекта Холла.....	28
3.1.2 Феррозондовые магнитометры.....	31
3.1.3 Магнитометры других типов	33
3.2 Средства измерений, не зарегистрированные в Госреестре	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
ВЫВОДЫ	45
Список использованной литературы	46

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важность точных измерений в науке, промышленности, торговле и социальной сфере трудно переоценить. Современная система единства измерений была создана в 19 веке. В 1875 г. 17 стран в том числе и Россия подписали Метрическую конвенцию, и было учреждено Международное бюро мер и весов (МБМВ). В настоящее время работу этой организации поддерживает 10 консультативных комитетов по различным видам измерений, каждый из которых принимает стратегию, которая определяет развитие фундаментальной и прикладной метрологии в данной области.

Одна из целей настоящей работы – изучить стратегию консультативного комитета по электричеству и магнетизму, познакомиться с основными направлениями развития этой области метрологии для того, чтобы в дальнейшем сопоставить, эту информацию с состоянием российской метрологии в данной области в настоящее время.

Развитие промышленности и науки невозможно без точных измерений. Успех в этом направлении, безусловно, определяется уровнем отечественного приборостроения, поэтому еще одна цель работы – исследовать рынок средств измерения магнитных величин и сопоставить характеристики отечественных приборов с их зарубежными аналогами.

ГЛАВА 1. МЕТРОЛОГИЯ ЗА РУБЕЖОМ

Испытания и контроль качества продукции, сертификация, аккредитация метрологических лабораторий сопряжены с действиями, основанными на национальных системах измерений. При оценке соответствия продукции требованиям стандартов осуществляются измерения различных параметров. При сертификационных испытаниях, устанавливающих соответствие товара определённым требованиям, методика и практика измерений прямо сказываются на сопоставлении результатов и на признании сертификата. Следовательно, можно сказать, что метрология будет обеспечивать интересы международной торговли, если соблюдается единство измерений. Эта задача и является важнейшей в деятельности международных метрологических организаций, благодаря усилиям которых в большинстве стран мира принята Международная система СИ, действуют сопоставимые терминологии, приняты рекомендации по способам нормирования характеристик средств измерения, по сертификации и испытаниям средств измерений и т.д.

История современной метрологии началась 20 мая 1875 г. В этот день 17 государств, включая Россию, подписали Метрическую конвенцию, были созданы международные и национальные прототипы килограмма и метра. (Именно 20 мая отмечается День метролога). Было решено создать и финансировать постоянно действующую научную организацию: Международное бюро мер и весов – МБМВ (Bureau International des Poids et Mesures – BIPM). По состоянию на март 2018 года 59 стран являются членами Метрической конвенции и 42 страны – ассоциированные члены, последние обладают правом направлять на заседания Генеральной конвенции своих наблюдателей. [1] (<http://www.bipm.org/en/about-us/>).



Рис. 1 Логотип ВІРМ

ВІРМ располагается во Франции, в г. Севр. ВІРМ хранит международные прототипы эталонов физических величин, а также организует периодические **сличения** национальных эталонов с международными. Процедура сличения – это совокупность операций, устанавливающих соотношение между размерами величины, полученными в результате воспроизведения этой величины или ее производных с эталонами стран участниц сличений. Сличению подвергаются национальные (государственные) эталоны, предназначенные для воспроизведения, хранения и (или) передачи размера физической величины, ее кратных или дольных значений.

В настоящее время председателем организации является англичанин Martin J.T. Milton. Руководство деятельностью ВІРМ осуществляется Международным комитетом мер и весов (СІРМ – *Comité International des Poids et Mesures* – *Международный комитет мер и весов*), созданным одновременно с ВІРМ. СІРМ является надзорным над ВІРМ органом, в обязанности которого входят: предоставление государствам-участникам ВІРМ годовых отчетов об административном и финансовом положении ВІРМ, координация совместной метрологической деятельности государствами-участниками, формулировка соответствующих рекомендаций и представление комиссионных отчетов в рамках подготовки к заседаниям Генеральной конференции по мерам и весам (СGРМ).

Генеральная конференция является высшим руководящим органом, определяющим долговременную научную политику стран, подписавших Метрическую конвенцию, и принимающим на международном уровне все принципиальные решения в области единиц физических величин и их эталонов. После получения комиссионных отчетов о проделанной работе от CIPM, в CGPM обсуждают и рассматривают меры, необходимые для обеспечения распространения и совершенствования Международной системы единиц (СИ), проверяют результаты новых фундаментальных метрологических определений и различных научных резолюций международного масштаба, а также решают все основные вопросы, касающиеся организации и развития BIPM, включая ее финансирование. CGPM проводится в среднем один раз в четыре года. С 1875 г. она созывалась 25 раз. Последнее собрание было проведено в ноябре 2014 г. в Версале, а следующее заседание состоится с 13 по 16 ноября 2018 г.

1.1 Анализ стратегии Консультативного Комитета по электромагнитным измерениям Международного бюро мер и весов

На протяжении многих лет, начиная с 1927 г., при BIPM создаются Консультативные Комитеты (CC's), координирующие, каждый в своей области измерений, международные работы и вырабатывающие рекомендации по изменению определений и размеров единиц физических величин, которые BIPM может принимать непосредственно или выносить на утверждение Генеральной конференции по мерам и весам в целях обеспечения унификации единиц. Консультативные Комитеты несут ответственность за:

- Консультирование CIPM по любым вопросам, связанным с метрологией и деятельностью научных программ BIPM;

- Установку глобальной сочетаемости измерений путем отслеживания стандартов системы СИ на межгосударственном уровне;
- Содействие созданию общепризнанной системы национальных эталонов, методов и средств измерений;
- Выступление в качестве наблюдателей на различных конференциях по обмену информацией о деятельности Консультативных комитетов, а также
- Создание любых возможностей для сотрудничества.

Работу Международного бюро мер и весов поддерживают 10 Консультативных Комитетов (КК):

1. ССАUV: КК по акустике, ультразвуку и вибрации
2. **ССЕМ: КК по электричеству и магнетизму**
3. ССL: КК по измерениям длины
4. СКК: КК по измерениям массы и связанных величин
5. ССРR: КК по фотометрии и радиометрии
6. ССQМ: КК по количеству вещества
7. ССRІ: КК по ионизирующим излучениям
8. ССТ: КК по термометрии
9. ССТF: КК по времени и частоте
10. ССУ: КК по единицам измерения

Члены Консультативных Комитетов – это представители национальных метрологических институтов и другие специалисты соответствующей области. КК определяют стратегию развития метрологической науки в мире. Измерительные возможности всех стран-членов ВІРМ классифицированы в соответствии с тематиками КК.

Консультативный Комитет по электричеству (ССЕ) был создан в 1927

году. В 1997 году его название было изменено на Консультативный Комитет по электричеству и магнетизму (ССЕМ) в рамках СИРМ. В постоянный состав ССЕМ входят две рабочие группы (WG), каждая из которых работает с определенным частотным диапазоном электромагнитных измерений:

- Рабочая группа по низкочастотным величинам (Working Group on Low-Frequency Quantities – WGLF), охватывает семь «производных» электрических величин напряжения, сопротивления, емкости, индуктивности, мощности, отношения напряжений и разности переменного/постоянного тока в диапазонах ниже МГц.
- Рабочая группа по радиочастотам (Groupe de Travail pour les grandeurs aux Radio-Fréquences, GT-RF), организует ключевые сличения на частотах МГц и выше.

Разделение частотного спектра необходимо из-за различия в технологиях, необходимых при проведении измерений для каждого диапазона. В настоящее время WGLF и GT-RF ответственны за поддержание эквивалентности базы СИ и производных электрических величин, а также за организацию, проведение и утверждение ключевых сличений соответствующих величин по всему диапазону частот.

Стратегия развития Консультативного Комитета по электромагнитным измерениям

Стратегия развития Консультативного Комитета по электромагнитным измерениям принята на десять лет с 2013 по 2023 г. Документ содержит следующие разделы: общие сведения о Комитете, круг выполняемых задач, обзор мероприятий и достижений за предыдущий период, список стэйкхолдеров, прогноз на будущее, обоснование для

проведения различных мероприятий, необходимые ключевые сличения, пилотные исследования, а также источники ресурсов для реализации намеченных планов [2] (https://www.bipm.org/utis/en/pdf/BIPM-Work-Programme_2016-2019_final.pdf).

Основные достижения ССЕМ на период 1999 – 2012 г.

Основными достижениями рабочих групп WGLF и GT-RF с 1999 г. считается подготовка и проведение 15 и 9 ключевых сличений соответственно. В частности, впервые в 2013-2014 гг. были проведены пилотные сличения эталонов индукции магнитного поля в диапазоне от 20 до 100 мкТл. (Лаборатория-пилот ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Санкт Петербург). GT-RF определили семь «ключевых величин», которые будут являться основой для последующих ключевых сличений, и приняли политику проведения не более одного ключевого сличения каждой величины одновременно. Семь ключевых величин: мощность, параметры рассеяния и импеданс, мощность шума, напряжение, затухание, напряженность электромагнитного поля и параметры антенны. Сличения этих величин проводились на разных частотных диапазонах, в соответствии с возможностями рабочих групп. На сегодняшний день повторные сличения ключевых величин не проводились.

Также в период 1999 - 2012 гг. GT-RF наблюдали снижение необходимости дальнейших сличений в области традиционных измерений напряжения, в силу несовременности и отсутствия новых технологий. Тем не менее, наблюдается повышенный интерес к измерениям формы волны, в частности к измерениям кристаллов на пластине и измерениям при более высоких частотах (более 100 ГГц).

Непосредственными бенефициарами (стэйкхолдерами) ССЕМ являются НМИ (национальные метрологические институты), участвующие

в международной метрологической деятельности, например, в сличениях. Они получают подтверждение достоверности своих эталонов и измерений или выявляют их недостатки. Основываясь на постоянно меняющихся потребностях производства, члены НМИ определяют приоритетные направления измерений и сличений на регулярных встречах WGLF и GT-RF. Ключевые сличения ССЕМ лежат в основе ключевых и дополнительных программ сличения, проводимых РМО (региональными метрологическими организациями), которые, в свою очередь, служат основой для подтверждения и развития международной системы измерений. Это позволяет регионам развивать свои возможности промышленной калибровки, что в конечном итоге приносит пользу экономике всех стран-участников.

Обзор будущей деятельности 2013 –2023

С уверенностью можно сказать, что в ближайшее десятилетие важность ключевых сличений уменьшаться не будет. Они обеспечивают постоянную и последовательную реализацию единиц СИ, определяют компетентность различных НМИ, а также поддерживают улучшение средств измерений, поскольку спрос на лучшие методы измерений постоянно увеличивается.

Также не может быть переоценена важность разработки квантовых эталонов в области электрических измерений в низкочастотном диапазоне. Фактически, внедрение таких эталонов дает возможность устранить необходимость в некоторых ключевых сличениях. Разработка высокотемпературных квантовых эталонов Холла, основанных на технологиях применения графена, открывает возможности для применения менее сложных систем на основе QHR (Quantum Hall Resistance – квантовое сопротивление Холла) и их более широкое использование в будущем. По-прежнему существует превосходный потенциал применения квантового

эталона тока, основанного на эффекте одноэлектронного туннелирования. Наблюдаются также постоянные успехи в разработке новых приложений эталонов джозефсоновского напряжения, особенно в областях переменного напряжения.

Быстрорастущей областью, которой может потребоваться метрологическая поддержка на уровне ССЕМ, является передача и распределение электрической энергии. Это технология Smart Grids передачи сверхвысокого напряжения, постоянного или переменного тока. Соответствующими величинами, для которых могут потребоваться сличения, являются мощности гармоник, напряжения, токовые фазоры (синхрофазоры), а также характеристики импульсов переключения и грозовые импульсы. Некоторые из этих сличений в настоящее время организуют РМО и отдельные лаборатории.

Также одним из важнейших направлений ЭМ измерений является контроль электромагнитных характеристик материалов, где измерение магнитных свойств играет важную роль. Другим важным направлением является создание новой системы определения килограмма. В настоящее время GT-RF проводит экспериментальные исследования в этой области.

Авторы стратегии подчеркивают, что современная точность измерений, принятая в мире, уже находится на пределе возможностей и составляет одну миллиардную долю единицы. Счет идет уже на сверхмалые величины, а к переходу на новые методики измерения величин готовы не все страны. Поэтому следующий этап развития метрологии – это доступность точных измерений для широкого круга потребителей и проведение измерений в реальном времени.

1.2 Место России в международных метрологических организациях

В настоящее время наряду с главной метрологической организацией МБМВ существуют и сотрудничают несколько региональных метрологических организаций: AFRIMETS (Intra-Africa Metrology System), APMP (Asia Pacific Metrology Programme), COOMET (Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions), EURAMET (European Association of Metrology Institutes), GULFMET (Gulf Association for Metrology), SIM (Inter-American Metrology System). Российская федерация является лидером COOMET [3] (<http://www.coomet.org/>).



Рис. 2. Международные метрологические организации

Уровень метрологического развития страны характеризует количество калибровочных и измерительных возможностей, так называемых СМС-сроки (calibration and measurement capabilities). Данные о калибровочных и измерительных возможностях стран регулярно публикуются на сайте ВІРМ. Любая страна может получить статус обладателя строки СМС, подтвердив свои возможности участием в соответствующих международных сличениях.

Поскольку стратегия – документ, который члены консультативного комитета создавали, анализируя современное состояние измерительных

возможностей разных стран, нельзя не упомянуть о них. Корректно сравнивать государства с сопоставимым промышленным потенциалом. На рис. 3 показана динамика изменения количества строк СМС России и некоторых зарубежных стран [4]. До недавнего времени Россия входила в тройку стран с наиболее развитой метрологией. В настоящее время Россия переместилась на 2 место (рис.4).

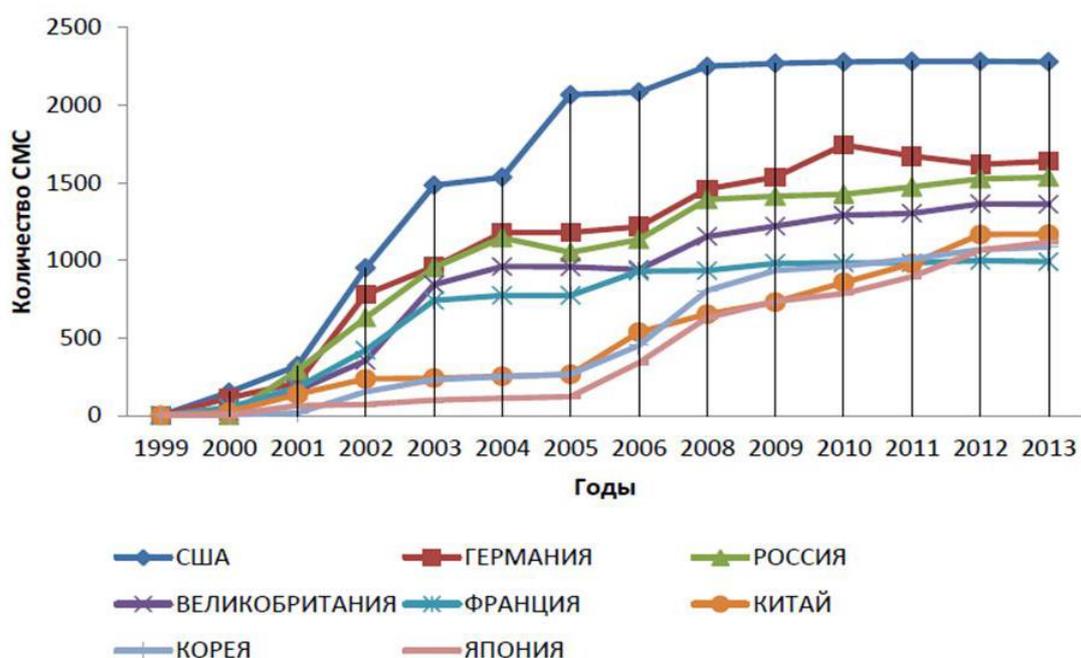


Рис. 3 Динамика изменения количества строк СМС России и ряда зарубежных стран

По количеству некоторых измерений Россия прочно занимает лидирующее положение (газовый анализ, время и частота, электричество и магнетизм, акустика и др.). Расширение измерительных возможностей

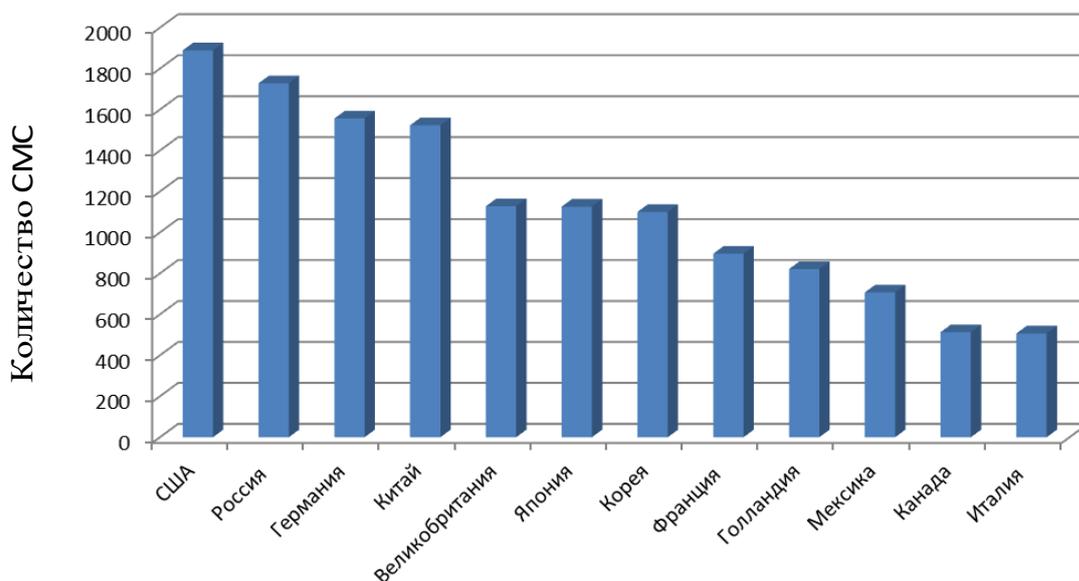


Рис. 4 Количество строк СМС государств по состоянию на 26 марта 2018 г.

способствует не только развитию экспорта товаров и услуг, в том числе и измерительных, но и создает прочный фундамент отечественной промышленности, непременным условием развития которой является собственное приборостроение.

Анализ стратегии консультативного комитета по электромагнитным измерениям показал, что точность современных измерений уже находится на пределе возможностей и дальнейшее развитие метрологии связано не с увеличением точности измерений, а в доступности высокоточных измерений для потребителей. Кроме того, в последнее время в мире наблюдается насыщение баз данных СМС, заявляемых ведущими странами, и замедление роста их количества. Можно предположить, что это продлится до осени 2018 г., когда на Генеральной конференции по мерам и весам будет узаконен переход на новые определения основных единиц и, соответственно, на новые эталоны и методы их реализации. В этом случае, ССЕМ должен будет пересмотреть и скорректировать количество строк СМС на основании результатов новых сличений, по итогам которых представление СМС в международной базе данных будет оптимизировано наряду с оптимизацией проведения ключевых сличений с учетом формирования перспективных направлений развития областей измерений в соответствии с планами ВІРМ вплоть до 2020 г [5] (<https://www.bipm.org/utils/en/pdf/ССЕМ-strategy-summary.pdf>).

ГЛАВА 2. МЕТРОЛОГИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.

Первое государственное поверочное учреждение – Депо образцовых мер и весов было организовано при Петербургском монетном дворе в 1841 году в соответствии с принятым Указом "О системе Российских мер и весов", узаконившим ряд мер длины, объема и веса. [6] Основными задачами Депо являлись: хранение эталонов, составление таблиц русских и иностранных мер, изготовление менее точных по сравнению с эталонами образцовых мер и рассылка последних в регионы страны. Поверка мер и весов на местах была вменена в обязанность городским думам, управам и казенным палатам. Были организованы "ревизионные группы", включающие представителей местных властей и купечества, имеющие право изымать неверные или неклеименные меры, а владельцев таких мер привлекать к ответственности. Таким образом, в России были заложены основы единой государственной метрологической службы.

В 1893 г. в Петербурге на базе Депо была образована Главная палата мер и весов, которую возглавлял до 1907 г. великий русский ученый Д. И. Менделеев. Именно в это время начали проводиться серьезные метрологические исследования. Д. И. Менделеев вложил много сил в развитие и совершенствование поверочного дела; была образована сеть поверочных палаток, осуществляющих поверку, клеймение и ремонт мер и весов, контроль за их правильным применением. В 1900 г. при Московском окружном пробирном управлении состоялось открытие Поверочной палатки торговых мер и весов. Так было положено начало организации метрологического института в Москве (в настоящее время – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы – ВНИИМС).

Метрическая система мер и весов была введена декретом Совнаркома РСФСР 14 сентября 1918 года (с этой даты начался «нормативный этап»

российской метрологии). Присоединение СССР к Международной метрической конвенции произошло в 1924 году, также как и создание в России комитета по стандартизации.

В 1930 г. произошло объединение метрологии и стандартизации. Была проведена большая работа по изучению состояния метрологической деятельности. Опыт, полученный в эти годы, оказался полезным во время Великой Отечественной войны, когда потребовалось быстрое восстановление измерительного хозяйства на эвакуированных предприятиях и приспособление его к задачам военного производства. После окончания войны сеть поверочных и метрологических организаций начала стремительно воссоздаваться. Были организованы новые метрологические институты.

В 1954 г. был образован Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР (в дальнейшем Госстандарт СССР). В 1960 г. была создана «Международная система единиц», в СССР она начала применяться с 1981 г. (ГОСТ 8.417-81). В 1973 г. в СССР была утверждена Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). После распада СССР управление метрологической службой России осуществляет Государственный комитет РФ по стандартизации и метрологии (Госстандарт России). В 1993 г. были приняты: первый закон РФ «Об обеспечении единства измерений», законы РФ «О стандартизации» и «О сертификации продукции и услуг». Установлена ответственность за нарушение правовых норм и обязательных требований стандартов в области единства измерений и метрологического обеспечения. В настоящее время все измерения в России подчиняются Федеральному закону N 102-ФЗ от 26.06.2008 г. "Об обеспечении единства измерений".

Согласно этому закону эталон единицы величины – техническое средство, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи

единицы величины. Процедура передачи единицы осуществляется при поверке средств измерений в соответствии с поверочной схемой см. рис.5.

Поверочная схема устанавливает порядок передачи размера одной или нескольких взаимосвязанных единиц или шкал физических величин от эталонов рабочим средствам измерений.

Выделяют следующие виды эталонов:

1. **Первичный эталон** — это эталон, воспроизводящий единицу физической величины с наивысшей точностью, возможной в данной области измерений на современном уровне научно-технических достижений. Первичный эталон может быть национальным (государственным) и международным.
2. **Эталон копия** – применяется вместо государственного эталона для хранения единицы и передачи её размера рабочим эталонам. Эталон копия не всегда является физической копией государственного эталона, а применяется в качестве копии только по метрологическому назначению

**Международные
сличения**

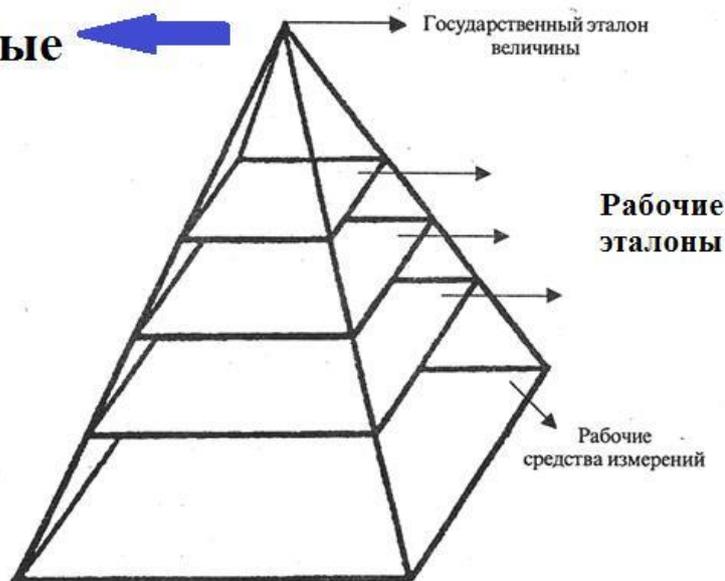


Рис.5. Общая логика поверочной системы

3. **Вторичный эталон** — эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы.
4. **Эталон сравнения** — эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.
5. **Исходный эталон** — эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в данной лаборатории, организации, на предприятии), от которого передают размер единицы подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений.
6. **Одиночный эталон** — эталон состоящий из одной меры, одного измерительного прибора или одной измерительной установки, обеспечивающих воспроизведение или хранение единицы самостоятельно, без других средств измерений того же типа.
7. **Групповой эталон** — эталон, состоящий из совокупности однотипных мер, измерительных приборов или других средств измерений, применяемых как одно целое для повышения надежности хранения единицы. Размер единицы, хранимой групповым эталоном, определяется как среднее арифметическое их значений, найденных с помощью отдельных мер или измерительных приборов, входящих в групповой эталон. Групповые эталоны могут быть постоянного и переменного состава. В групповые эталоны переменного состава входят меры или измерительные приборы, периодически заменяемые новыми. Отдельные меры или измерительные приборы, входящие в групповой эталон, применяют в качестве рабочих эталонов, если это допустимо по условиям хранения единицы.
8. **Рабочий эталон** — эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений, согласно утвержденной ГОСТ

поверочной схеме, на вершине которой находится Государственный первичный эталон (ГПЭ) (рис. 5)

2.1 Государственные первичные эталоны Российской Федерации

Эталонная база РФ в настоящее время насчитывает 163 государственных первичных эталонов (ГПЭ) и более 110 тыс. рабочих эталонов [7] (<http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,ETALON>). Поскольку государственные эталоны служат для воспроизведения физических величин, структура эталонной базы соответствует структуре единиц СИ. Основа этой базы — эталоны основных единиц СИ. Наряду с основными единицами СИ в состав эталонной базы России входят эталоны производных единиц.

В настоящее время в России существуют эталоны всех основных единиц, кроме эталона единицы количества вещества (моль). Основные единицы СИ это: единица времени – секунда, длины – метр, массы – килограмм, постоянного тока – ампер, термодинамической температуры – кельвин, количества вещества – моль и силы света – кандела. Одной из причин того, что эталон единицы количества вещества не создан, является недостаточная четкость определения этой единицы и отсутствие метода ее измерения в соответствии с определением.

Тем более, эту единицу трудно назвать основной, так как ее определение неразрывно связано с единицей массы. Вполне возможно, что эта единица будет переведена в разряд специальных единиц массы.

Производные единицы выражаются в основных единицах с использованием математических символов умножения и деления. Отдельную группу составляют специальные эталоны — это эталоны, обеспечивающие воспроизведение единицы в особых условиях (смена характера объекта измерений) и заменяющий для этих условий первичный

эталон. Единица, воспроизводимая с помощью специального эталона, согласована по размеру с единицей, воспроизводимой с помощью соответствующего первичного эталона.

ГПЭ Российской Федерации находятся в национальных метрологических институтах – институтах-хранителях: ВНИИМ, ВНИИОФИ, ВНИИМС, ВНИИФТРИ, ВНИИР, УНИИМ, СНИИМ (рис.6.) Крупнейшие из них: Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ФГУП ВНИИМ) и Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП ВНИИФТРИ). Во ВНИИМ хранится 54, а во ВНИИФТРИ – 51 ГПЭ. (см. таблицу 1.) В настоящее время решение о модернизации каждого конкретного эталона и его статусе принимает коллегия Росстандарта в соответствии со Стратегией Российской Федерации в области обеспечения единства измерений.



Рис.6. Институты-хранители ГПЭ Российской Федерации на карте России.

В соответствии с международными стандартами ГПЭ Российской Федерации распределены по метрологическим областям так, как показано в таблице 1. Большое всего ГПЭ относится к измерительной области Электричество и Магнетизм, к измерительной области Время и Частота относится только 1 эталон.

Таблица 1. Распределение количества эталонов по областям измерений и метрологическим научно-исследовательским институтам по данным базы <http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,ETALON> «Реестр государственных первичных эталонов России» [7]

Количество эталонов		Метрологическая область								
		Акустика, Ультразвук и Вибрация	Электричество и Магнетизм	Длина и Угол	Масса, Сила, Давление и Вязкость	Фотометрия и Радиометрия	Физико-Химические измерения	Радиация и ионизирующие излучения	Термометрия	Время и Частота
ГНМИ	163	AUV 9	EM 44	L 16	M 26	PR 21	QM 15	RI 14	T 16	TF 1
ВНИИМ	54	3	12	6	12	2	4	8	6	
ВНИИФТРИ	51	6	18	1	6		6	6	7	1
ВНИИОФИ	27		3	2	1	19	1		1	
ВНИИР	6				5		1			
СНИИМ	6		5						1	
УНИИМ	10		2	2	2		3		1	
ВНИИМС	9		4	5						

2.2 Государственные первичные эталоны Российской Федерации в области магнитных измерений

В таблице 2 приведено распределение государственных первичных эталонов в области магнитных измерений по государственным научно-метрологическим институтам. Лаборатория «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» является ведущим подразделением Госстандарта РФ по метрологическому обеспечению магнитных измерений, которые применяются в научных сферах, таких как: изучение физической природы земного магнетизма, геофизические исследования, определение магнитных параметров технических объектов, изучение магнитных полей в ближнем и дальнем космосе, исследование магнитных полей человека, определение качества технических параметров изделий бесконтактными методами, фундаментальная метрология и др.

Таблица 2. Государственные первичные эталоны РФ в области магнитных измерений по данным базы <http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,ETALON> «Реестр государственных первичных эталонов России» [7]

Номер по реестру	Наименование эталона	Институт-хранитель	Год утверждения
Гэт 12-2011	ГПЭ единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции	ФГУП «ВНИИМ»	2018
Гэт 15-79	ГПЭ единицы индуктивности	ФГУП «ВНИИМ»	2016
Гэт 44-2010	ГПЭ единицы напряженности магнитного поля в диапазоне частот 0,01-30 МГц	ФГУП «ВНИИФТРИ»	2011
Гэт 82-85	ГПСЭ единицы магнитной индукции в диапазоне 1 ÷ 10 Тл	ФГУП «ВНИИФТРИ»	1985
Гэт83-2017	ГПЭ единицы количества парамагнитных центров	ФГУП «ВНИИФТРИ»	2017
Гэт 148-2013	ГПСЭ единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне 0,1 - 10,0 нс	ФГУП «ВНИИОФИ»	2014
Гэт174-2016	ГПЭ единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей в диапазоне частот от 1 МГц до 18 ГГц	ФГУП «СНИИМ»	2016

Гэт178-2016	ГПСЭ единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне от 10 до 100 пс	ФГУП «ВНИИОФИ»	2016
Гэт198-2017	ГПЭ мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от 1×10^{-5} до 3×10^{-2} Вб	ФГУП «УНИИМ»	2017

Лаборатория «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» является базовой научной структурой по метрологическому обеспечению магнитных измерений в стране. В лаборатории разработаны Государственный первичный эталон единиц магнитных величин ГЭТ 12-2011 и государственная поверочная схема в области базовых параметров магнитного поля по ГОСТ 8.030-2013. Государственная поверочная схема введена в действие с 1 января 2015 года.

Для измерения плотности магнитного потока и напряженности магнитного поля при постоянном и переменном токе, наряду с ГЭТ 12-2011 применяется ГПСЭ (государственный первичный специальный эталон) ГЭТ 82-85 лаборатории ФГУП «ФНИИФТРИ», при этом диапазоны измерения эталонов «не перекрываются», как это видно из таблицы 3.

Таблица 3. Сравнение ГПЭ измерений магнитного потока и поля [7]

	НЗД*	СПВ**	НСП***
ГЭТ 82-85	1 – 10 Тл	$1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$
ГЭТ 12-2011	$1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-3}$ Тл	$2 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-5} \div 6 \cdot 10^{-7}$

* – Номинальное значение, диапазон

** – Случайная погрешность воспроизведения

*** – Неисключённая систематическая погрешность

Эталонный комплекс ГЭТ 12-2011 включает в себя задачи воспроизведения единиц измерений в области постоянных и переменных (до 20 кГц) магнитных полей:

- Магнитной индукции – Тл (единица магнитной индукции воспроизводится, опираясь на гиромагнитное отношение протона, гиромагнитное отношение атомов гелия-4 и метод двойного радиооптического магнитного резонанса);
- Магнитного потока – Вб (константы рассчитываются через экспериментально измеряемые геометрические параметры обмоток);
- Магнитного момента – А*м² (константа эталонной меры магнитного момента определяется как отношение констант преобразования эталонных мер магнитного потока и магнитной индукции);
- Градиента магнитной индукции - Тл/м
- Магнитной восприимчивости - единица СИ
- Отношений единиц - Вб/Тл, Тл/А, Вб/А, (Тл/м)/А
- Магнитных параметров материалов

} Данные параметры определяются как произведение констант преобразования соответствующих эталонных мер этих величин на силу тока, пропускаемого через обмотки

Так как система государственных эталонов создана для поддержания и распространения допускаемых к применению единиц величин в целях удовлетворения потребностей страны, моральное и физическое старение государственных первичных эталонов с точки зрения перспективных требований к ним со стороны практики неизбежно. В известной мере индикатором необходимости совершенствования эталона являются также результаты сличений с первичными эталонами других стран. Кроме того в общемировой практике отмечается, что раньше потребности науки и

промышленности обуславливали рост точности средств измерений в среднем в 3–10 раз каждые 10–15 лет. Для метрологического обеспечения требуемого уровня точности с такой же периодичностью должно было происходить и совершенствование эталонной базы. В последнее десятилетие положение коренным образом изменилось, т.к. появились продукты принципиально нового качества – наукоёмкие технологии и проекты, потребовавшие ускорения процессов модернизации в промышленности и соответственно обновления метрологического обеспечения с периодичностью уже 5–7 лет.

ГЭТ 82-85

Эталон ГЭТ 82-85 реализует абсолютный метод ядерного магнитного резонанса, использующий фундаментальную физическую константу - гиромагнитное отношение протона, при температурах от 4,2 – 300 К. В состав эталона входят:

- Эталонный тесламетр;
- Два криогенных пульта со сверхпроводящими соленоидами;
- Пульт управления эталонным комплексом;
- Пульт управления магнитным полем.

Применение эталона охватывает исследования сверхпроводящих магнитных систем, область электроэнергетики, приборостроения, машиностроения и транспорта.

Согласно общей логике поверочной схемы (рис. 5), единица измерения от государственного первичного эталона передается разрядным эталонам, с помощью которых происходит поверка и калибровка средств измерения.

2.3. Рабочие эталоны

Для получения информации о количестве рабочих эталонов, восходящих, согласно поверочной схеме, к государственным первичным эталонам, были проанализированы открытые данные информационной базы Росстандарта [8] (http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,ETLN_EV). На рис. 7 показано количество рабочих эталонов в области магнитных измерений, восходящих к определенному ГПЭ.

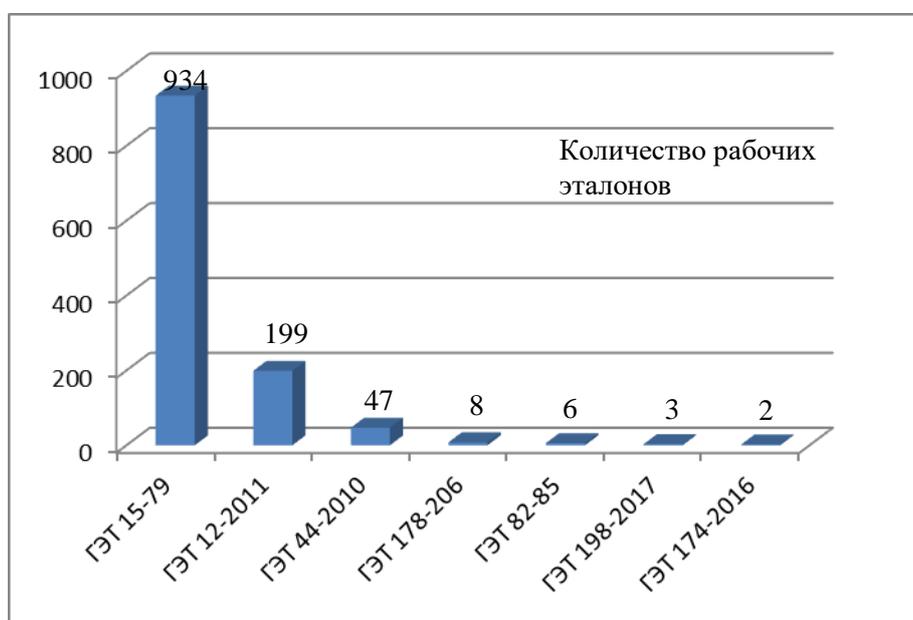


Рис.7.Количество рабочих эталонов, восходящих к ГПЭ.

Как видно из рис. 7, эталон единицы индуктивности ГЭТ 15-79, в основу которого заложен мостовой метод измерений индуктивности, является самым востребованным по прослеживаемым рабочим эталонам. Интересно заметить, что в международных сличениях участвовали лишь эти два наиболее востребованных эталона: ГЭТ 15-79 и ГЭТ 12-2011.

ГЛАВА 3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основными силовыми характеристиками магнитного поля являются векторные величины индукции и напряженности. Современные исследования в области науки и техники связаны с измерением магнитных полей в широком диапазоне: от очень слабых магнитных полей порядка $10^{-14} \dots 10^{-9}$ Тл до средних и больших полей свыше 2 Тл – в широком частотном диапазоне. В настоящее время рынок средств измерений магнитных характеристик широко представлен большим количеством наименований техники отечественного и зарубежного производства.

В целях исследования уровня востребованности СИ магнитных характеристик, они были разбиты на 3 группы, в соответствии с принципом работы. К первой, самой распространенной группе, были отнесены тесламетры и миллитесламетры на основе эффекта Холла, ко второй по востребованности группе были отнесены феррозондовые магнитометры, чувствительным элементом которых является феррозонд – электрическая катушка с сердечником, а к третьей группе были отнесены остальные типы СИ: индукционные, прецизионные, на основе магниторезистивных датчиков, а также СИ, основанные на квантовых эффектах и явлениях, возникающих при взаимодействии микрочастиц с магнитным полем, например: оверхаузеровские магнитометры, протонные магнитометры и магнитометры на основе ЯМР, реализующие метод свободной и вынужденной прецессии ядер.

В рамках настоящей работы был исследован отечественный и зарубежный сегменты рынка СИ магнитных величин.

3.1 Средства измерений, зарегистрированные в Госреестре

3.1.1 Тесламетры на основе эффекта Холла

В настоящее время известно много разнообразных приборов и способов для измерения магнитной индукции, магнитного потока и напряженности магнитного поля. Как правило, прибор для измерения магнитных величин состоит из двух частей — измерительного преобразователя, назначением которого является преобразование магнитной величины в величину иного вида (электрическую, механическую), более удобную для дальнейших операций, и измерительного устройства для измерения выходной величины измерительного преобразователя. [10] Наиболее распространенными средствами измерений являются тесламетры, основанные на эффекте Холла. Данные приборы широко используются благодаря простоте, удобству эксплуатации и экономичности. Их принцип действия основан на измерении индукции магнитного поля с помощью первичного измерительного датчика Холла, преобразующего величину магнитной индукции в электрический сигнал, пропорциональный значению магнитной индукции.

В таблице 4 представлены тесламетры, прошедшие стадию утверждения Росстандартом, применяемые в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (ГРОЕИ), зарегистрированные в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (Госреестр СИ) [9] (<https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>), [10].

Таблица 4. Основные технические характеристики и параметры тесламетров Холла

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Номер в госреестре и срок действия	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Миллитесламетры портативные модульные трёхкомпонентные МПМ-2	Магнитная индукция	0,01 – 199,9 мТл	16372-08, 901.01.2014	ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская обл. пгт Менделеево, 82 300 – 87 600 руб.
Миллитесламетры портативные универсальные ТП2-2У	Магнитная индукция	0,001 мТл – 1,99 Тл; 2 – 19,9 Тл	16373-08, 01.08.2013	ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская обл. пгт Менделеево, 58 000 руб
Измерители напряжённости магнитного поля ИМАГ-400Ц	Напряжённость	1 – 700 А/м или 0,1 – 88 мТл	25588-09, 01.06.2014	ЗАО НПО «Интротест», г. Екатеринбург, 42 800 руб.
Измерители напряжённости магнитного поля ИМП-6	Напряжённость	Тл10 – 19990 А/м	26812-04, 01.01.2015	ЗАО НПО «Интротест», г. Екатеринбург, 43 000 руб.
Миллитесламетры портативные универсальные ТПУ (с модификациями)	Магнитная индукция	0,001 мТл – 1,99 Тл; 2 – 19,9 Тл	28134-12, 08.02.2017	ЗАО «НПЦентр», Москва, Зеленоград, 90 000 руб.
Миллитесламетры Ш1-15У	Магнитная индукция	0,1 мкТл – 1,99 Тл; 2 – 19,99 Тл	37751-08, 01.06.2013	ООО «НПП Омега инжиниринг», Москва, 54 600 руб.
Измерители напряжённости магнитного поля МФ-117	Напряжённость	10 – 200000 А/м	36194-07, 01.12.2012	ООО «Микро - акустика», г. Екатеринбург, 118 400 руб.
Измерители напряжённости магнитного поля МФ-207	Напряжённость	10 – 300000 А/м	48407-11, 06.12.2016	ООО «Микро- акустика», г. Екатеринбург, 159 100 – 201 900 руб.
Тесламетры-веберметры универсальные ТПУ-2В	Магнитная индукция	1 мкТл – 100 Тл	61082-15 14.07.2020	ЗАО «НПЦентр», г. Москва 521 000 – 601 800 руб.
Миллитесламетры портативные модульные ТПМ-250	Магнитная индукция и напряженность	0,001 – 4 мТл	70377-18 19.02.2023	ООО «Завод электронной техники» (ЗЭТ), г. Москва 82 700 руб.
Магнитометры многоканальные М-Лайнер	Магнитная индукция	0,02 – 2 Тл	61671-15, 15.09.2020	ООО «Перспективные магнитные технологии и консультации», г.Москва
Магнитометры трехкомпонентные малогабаритные МТМ-02	Напряженность	± 200 кА/м	69952-17 12.12.2022	ООО «НТМ-Защита», г.Москва, 79 900 руб.
Магнитометры GM04	Напряженность	0 – 2037 кА/м	40091-08, 01.01.2014	«MAGNAFLUX», Великобритания, г. Суиндон

* На момент написания работы стоимость некоторых СИ еще не была определена изготовителем ввиду недавнего ввода приборов в эксплуатацию

Самые распространенные миллитесламетры – модели **ТПУ**, просты в изготовлении с возможностью применения в качестве приставки к мультиметру. Состоят из датчика Холла и стабилизатора питания для него. При изменении магнитного поля меняется напряжение на выходе датчика, которое и подается на вход мультиметра. Миллитесламетры **МММ-2**, **ТП2-У** и **Ш1-15У** удобны для эксплуатации как в помещениях, так и в полевых условиях. Миллитесламетры **ИМП-6** являются наиболее дешевыми, переносными СИ на основе эффекта Холла, однако обладают погрешность измерений порядка ± 10 А/м.



Значительная часть производства СИ, отвечающих современным критериям качества и точности измерений, на сегодняшний день сосредоточена в Москве. Согласно последним обновлениям базы утвержденных СИ Росстандарта (<https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> на 08.05.2018), новейшими СИ малых магнитных полей

не являются миллитесламетры портативные модульные **ТПМ-250** (рис. 8), стоимостью порядка 80 000 руб.

В диапазоне больших полей (до 100 Тл) наиболее современными СИ являются тесламетры-веберметры универсальные **ТПУ-2В** (рис. 9), стоимостью порядка 520 000 руб.



Рис. 9 ТПУ-2В

Единственным представителем утвержденных зарубежных СИ является магнитометр **GM04** (рис. 10), английского производства, предназначенный для измерения плотности магнитного потока в магнитах и намагниченных для технического контроля деталях. Принцип действия также основан на преобразовании Холловского напряжения.



Рис. 10 GM04

3.1.2 Феррозондовые магнитометры

Магниточувствительным элементом феррозондового магнитометра является феррозонд – электрическая катушка с сердечником из ферромагнитного материала, питаемая переменным током, которая чувствительна к величине и направлению внешнего магнитного поля. Если феррозонд расположен вдоль поля, он воспринимает полное значение поля, когда под углом – соответствующую проекцию вектора индукции магнитного поля на ось чувствительности. В процессе работы сердечник перемагничивается переменным полем возбуждения, а амплитуда сигнала, снимаемого с измерительной обмотки, пропорциональна внешнему измеряемому магнитному полю.

В таблице 5 представлены современные феррозондовые магнитометры, также прошедшие стадию утверждения РОССТАНДАРТОМ.

Таблица 5. Основные технические характеристики и параметры феррозондовых магнитометров

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Номер в Госреестре, срок действия	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Магнитометры цифровые трехкомпонентные сканирующие СТЫК-ЗД	Магнитная индукция	0 – 50 мТл	39035-08, 28.10.2018	ООО "Децима", г. Москва 102 180 руб.
Магнитометры МХ-10	Магнитная индукция	0,1 – 100 мТл	55280-13, 21.10.2018	ЗАО "НИИ интроскопии МНПО "СПЕКТР", г.Москва, 43 500 руб.

Магнитометры дифференциальные, МФ-34ФМ АКASKAN	Магнитная индукция	± 2000 мкТл	60946-15, 18.06.2020	ООО "АКА-Скан", г.Москва 100 000 руб.
Магнитометры МТ-5	Магнитная индукция	$\pm 100\ 000$ нТл	61800-15, 08.05.2018	ООО "Криомаг", г.С.-Петербург
Магнитометры МГРФ	Магнитная индукция	± 100 мкТл	68907-17, 23.10.2022	ООО "Феникс", г.С.- Петербург

* На момент написания работы стоимость некоторых СИ еще не определена изготовителем ввиду недавнего ввода приборов в эксплуатацию

В зарубежной литературе феррозонд называют Flux-gate – потокопропускающий, потоковосприимчивый. Устройства относятся к наиболее распространенным СИ слабых магнитных полей. Общий принцип действия подобен принципу действия магнитного усилителя, у которого управляющая электрическая цепь заменена разомкнутой магнитной цепью. При определенных геометрических размерах сердечника, коэффициент размагничивания может быть настолько мал, что при помещении сердечника во внешнее магнитное поле размагничивающее поле будет практически отсутствовать.

Последним утвержденным российским СИ в сфере феррозондовых магнитометров является разработка петербургской лаборатории ООО «Феникс» – трехкомпонентный магнитометр МГРФ (рис. 11 и 12)



Рис. 11 Общий вид магнитометра (в кожухе)



Рис. 12 Общий вид блока феррозондовых датчиков с блоком управления

Основное назначение МГРФ – проведение контроля всех национальных промысловых, транспортных и магистральных трубопроводов различной протяженности и конструкции с диаметром выше 60 мм с высокой производительностью измерений – до 5 км/день. Регистрируются измерения горизонтальных и вертикальных составляющих постоянного магнитного поля в шести точках пространства. Для этого в магнитометре предусмотрена жёсткая система направляющих цилиндрической формы длиной 420 мм, на концах которой закреплены трехкомпонентные феррозондовые датчики.

На основе анализа баз данных утвержденных СИ хочется отметить, что за последний период основной прирост и совершенствование имеющихся моделей магнетометров отечественного производства связано с недоступностью зарубежных аналогов. Центральные регионы являются основными регионами производства современных СИ.

3.1.3 Магнитометры других типов

В данном разделе будут поэтапно представлены утвержденные СИ магнитных характеристик, не входящие в первые две группы.

Магнитометры на основе магниторезистивных датчиков

Чувствительным элементом магнитометров данного типа являются магниторезистивные датчики, общий вид которых представлен на рис. 13. Сенсоры отличаются высокой чувствительностью и способны измерять



Рис. 13 Общий вид магниторезистивного датчика

самые малые изменения магнитного поля. Их основные задачи: определение угловых координат, положение объекта относительно магнитного поля земли, измерение частоты вращения редукторных двигателей и т.д.

Принцип работы магниторезистивных датчиков основан на изменении направления намагниченности внутренних доменов слоя пермаллоя (NiFe) под воздействием внешнего магнитного поля. В зависимости от угла между направлением тока и вектором намагниченности изменяется сопротивление пермаллоевой пленки. Под углом 90° оно минимально, угол 0° соответствует максимальному значению сопротивления.

Современные СИ на основе магниторезистивных датчиков представлены тремя производителями и указаны в таблице 6.

Таблица 6. Основные технические характеристики и параметры магнитометров на основе магниторезистивных датчиков

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Номер в Госреестре, срок действия	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Магнитометры бесконтактные ДМ-002	Магнитная индукция	0 – 600 мкТл	38456-08, 01.09.2013	ГОУ ВПО "Самарский Государственный аэрокосмический университет", г.Самара
Магнитометры универсальные Техномаг	Магнитная индукция	1 – 300 мкТл	68599-17, 28.10.2018	ООО "НПП "Техприбор", г.Энгельс, 55 900 руб.
Магнитометры трехкомпонентные малогабаритные МТМ-01	Напряженность	$\pm (0,5...200) \text{ А/м}$ $\pm (628...250000) \text{ нТл}$	35950-07, 17.08.2022	ООО "НТМ-Защита", г.Москва, 88 500 руб.

Индукционные магнитометры

Индукционные измерители магнитного поля представлены в Госреестре СИ тремя приборами: ИМП-04, ИМП-05 и ИМП-1 А, представленные в таблице 7. В настоящее время среди утвержденных типов СИ не появляются новые индукционные магнитометры, а большинство

старых сняты с производства. Их производство не является рентабельным, ввиду широко использования тесламетров на основе эффекта Холла.

Принцип работы индукционных магнитометров основан на известном явлении электромагнитной индукции — возникновении ЭДС в измерительной катушке при изменении проходящего сквозь её контур магнитного потока.

Таблица 7. Основные технические характеристики и параметры индукционных магнитометров

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Номер в Госреестре, срок действия	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Измерители магнитного поля ИМП-04	Магнитная индукция	0,01 – 199,9 мТл	15527-02, 01.08.2012	ФГУП "НПП "Циклон-Тест", г.Фрязино, 45 990 руб.
Измерители магнитного поля ИМП-05	Магнитная индукция	7 – 1990 нТл	17289-03, 23.08.2018	ФГУП "НПП "Циклон-Тест", г.Фрязино, 50 200 руб.
Измерители магнитного поля ИМП-1А	Магнитная индукция	0,2 – 199,9 мкТл	35949-07, Зав. № 03, 04, 05	ООО "Криомаг", г.С.-Петербург

В следующем разделе будут рассмотрены квантовые СИ, основанные на взаимодействиях микрочастиц с магнитным полем.

Оверхаузеровские магнитометры

Данный тип СИ представлен единственными в своем роде абсолютными протонными магнитометрами **POS-1** и **POS-2** (рис. 14 и 15), принцип действия которых основан на эффекте Оверхаузера, разрабатываемыми лабораторией квантовой магнитометрии УГТУ-УПИ (Уральский государственный технический университет – УПИ) [11].



Прибор предназначен для геологоразведочных наземных работ, магнитных обсерваторий и мер индукции слабого магнитного поля 1-го разряда. Технические параметры прибора соответствуют и превосходят по ряду параметров иностранные аналоги (диапазон измерений 20000 – 100000 нТл, абсолютная погрешность $\pm 0,5$ нТл, чувствительность



0,01 – 0,05 нТл при цикле измерений 3-1 секунда). Магнитометр POS-2 является двухканальной градиенто - метрической) модификацией POS-1,

Рис. 14 Процессорный оверхаузеровский магнитометр

которая фактически включает в себя

два первичных преобразователя POS-1, объединенных общим блоком электроники. Принцип действия: прецессионный ЯМР измеритель модуля магнитного поля на эффекте Оверхаузера с поляризацией постоянным ВЧ-полем.

Таблица 8. Основные технические характеристики POS-1,2

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Номер в Госреестре, срок действия	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Магнитометры POS-1 и POS-2	Магнитная индукция	20000 – 100000 нТл	44807-10, 01.08.2015	ГОУ ВПО "УГТУ-УПИ", г. Екатеринбург

Прецизионные магнитометры

Магнитовариационная трехкомпонентная станция **МВС** предназначена для измерений значений приращений составляющих вектора магнитной индукции поля Земли (вариаций) на сети магнитных обсерваторий. Разработкой занимается институт ИЗМИРАН им. Н. В.

Пушкова Российской академии наук (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн). Область применения МВС – выполнение наземных магниторазведочных, поисковых, прогностических, научно-исследовательских и специальных работ. МВС может использоваться в условиях необслуживаемых или редко обслуживаемых пунктов наблюдений, а также в лабораторных, обсерваторских и полевых условиях.

Принцип действия МВС: на кварцевой растяжке вместе закреплены магнит и зеркало, которые отклоняются при изменении магнитной индукции; свет от излучающего светодиода отражается зеркалом на дифференциальный фотоприёмник, а система отрицательной обратной связи с помощью катушки магнитной индукции стремится вернуть зеркало в нулевое положение. Значение тока в катушке обратной связи пропорционально изменению магнитной индукции.

В таблице 9 представлены характеристики единственных существующих в настоящее время утвержденных измерительных прецизионных приборов.

Таблица 9. Основные технические характеристики станции МВС

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Номер в Госреестре, срок действия	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Станция трёхкомпонентная цифровая магнитовариационная МВС	Приращения магнитной индукции	± 2000 нТл	35089-07, зав. № 1	ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, г. Троицк, Москва

Последними СИ магнитных характеристик, утвержденными и представленными в базе данных РОССТАНДАРТА, являются узкоспециализированные магнитоизмерительные установки МК-3Э (таблица 10), предназначенные для автоматического измерения магнитных характеристик кольцевых образцов магнитно-мягких материалов и

протяженных образцов.

Принцип работы установки заключается в перемагничивании образца по петле гистерезиса и намагничивании по основной кривой намагничивания в постоянном поле по задаваемому режиму, измерении магнитной индукции и напряженности поля в точках петли гистерезиса и кривой намагничивания посредством коммутации намагничивающего поля и последующем вычислении магнитных характеристик измеряемого образца.

Таблица 10. Основные технические характеристики МК-3Э

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Номер в Госреестре, срок действия	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Установки магнитоизмерительные МК-3Э	Магнитная индукция, напряженность	0,001...2 Тл; 0...40000 А/м	39751-09, 01.01.2014	ЗАО НПО "Интротест", г. Екатеринбург, от 696 200 руб.

Анализ базы данных утвержденных типов СИ показал, что в настоящее время на государственном уровне наша страна обладает хорошо развитой собственной сетью национальных производств различных типов СИ, с успехом проходящих процедуры поверки Росстандарта. В сфере государственного регулирования особенно заметна потребность в совершенствовании средств магнитных измерений, что можно наблюдать на примере появления на рынке новых изготовителей магнитных СИ, а также на примере активного обновления баз данных уже существующих СИ.

Также возможно, что почти полное отсутствие утвержденных СИ зарубежного производства в последнее время послужило импульсом для развития отечественных аналогов, успешно справляющихся с возложенными на них задачами.

3.2 Средства измерений, находящиеся вне Госреестра

Возможность использования неутвержденных Росстандартом СИ в сфере ГРОЕИ (государственного регулирования обеспечения единства измерений) [12] (<http://www.rostest.ru/page3.php>) ограничена, так как таким устройствам запрещено проходить процедуру поверки. Если СИ нет в базе данных Госреестра, оно обязано пройти процедуру калибровки в любом ЦСМ (центре стандартизации и метрологии) с получением сертификата о калибровке (пример: рис. 15).

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«АВТОПРОГРЕСС-М»
(ООО «Автопрогресс-М»)

**СЕРТИФИКАТ
о калибровке**

Средство измерений Стандартный образец для
наименование и тип (если в состав средства измерений
ультразвуковой дефектоскопии СО-ЗР
входит несколько автономных блоков, то приводятся их перечни)

пределы измерений _____

заводской номер (номера) _____

изготовитель ООО _____
принадлежащее ООО _____
наименование юридического (физического) лица, ИНН
ИНН _____

Условия калибровки в соотв. с ГОСТ 8.395

Калибровка проведена по методике ГОСТ 18576-96
наименование или номер нормативного документа

В качестве эталона применен УИМ-23, ПГ±(1+L/100) мкм, № _____;
наименование, заводской номер, разряд, класс или погрешность
Плита поверочная класса 0, 630x400, № _____;
Штангенрейсмас Mitutoyo, ц.д. 0,01 мм, диан. [0-300] мм;
Ультразвуковой толщиномер А1209, № _____

Калибровочное клеймо

Руководитель лаборатории _____
Подпись фамилия, инициалы

« » февраля 2015 г.

АПМ № _____

Рис. 15 Образец сертификата о калибровке СИ

Сертификат о калибровке - документ, удостоверяющий факт и результаты калибровки средства измерений, который выдается

организацией, осуществляющей калибровку. Источник: Закон РФ от от 26.06.2008 N 102-ФЗ (последняя редакция) "Об обеспечении единства измерений" [13] (http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904).

Любой сертификат о калибровке должен содержать информацию об эталонах, с помощью которых выполнена калибровка и их идентификация, данные об аттестации с указанием прослеживаемости к ГПЭ единиц величин, а при их отсутствии - к национальным эталонам единиц величин иностранных государств. После получения данного сертификата СИ готово к использованию.

Наиболее перспективные зарубежные СИ, не внесенные в базы Госреестра, в основном используются для проведения наземных геофизических исследований на больших площадях, где невозможно использование обычных тесламетров, веберметров или феррозондовых магнитометров. Российским конкурентно способным аналогом СИ данного типа является екатеринбургский магнитометр POS-1, упомянутый выше. В данном разделе будут рассмотрены наиболее перспективные зарубежные СИ, не внесенные в базы Госреестра, но доступные на территории РФ.

Квантовый магнитометр с оптической накачкой паров калия



Рис. 16 GSMP-35

Магнитометр / градиентометр **GSMP-35** (рис. 16) канадского производства предназначен для геофизических исследований месторождений полезных ископаемых. По ряду технических характеристик превосходит отечественный аналог (см. табл. 11).

Таблица 11. Основные технические характеристики GSMP-35

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Квантовый магнитометр с оптической накачкой паров калия GSMP-35	Магнитная индукция, напряженность	10000 –350000 нТл	GEM Systems, Canada

Датчик магнитометра состоит из стеклянной колбы, содержащей пары щелочного металла. В соответствии с принципами квантовой теории существует распределение валентных электронов на энергетических уровнях в атомах щелочных металлов. Эти электроны расположены на двух энергетических уровнях (1 и 2), как показано на рис.17.



Рис. 17 Энергетические уровни в атоме К

Световое излучение определенной длины волны, приложенное к парам щелочного металла, возбуждает электроны и заставляет их перемещаться со 2 на 3 энергетический уровень. Этот процесс, поляризация, сокращает количество атомов, содержащих электроны на 2-м уровне. Колба перестает поглощать свет и из матовой становится прозрачной. Электроны третьего уровня нестабильны и спонтанно перемещаются обратно на 2-й и 1-й уровни. В итоге, 1-й уровень перенаселяется, а электронов на 2-м уровне почти не остается.

После этого происходит процесс деполяризации. Приложенное магнитное поле высокой частоты с длиной волны, соответствующей энергетической разнице между 1-м и 2-м уровнями, приводит к стандартному распределению электронов между уровнями. Важность процесса деполяризации в том, что разница энергий между 1 и 2 уровнями (частота деполяризующего поля) прямо пропорциональна магнитному полю. Система регистрирует флуктуацию интенсивности света, связанную с изменением прозрачности колбы. Частота флуктуации преобразовывается в напряженность магнитного поля.

Цезиевый магнитометр CS-VL

Одним из самых известных поставщиков канадских магнитометров являются Scintrex. Цезиевый магнитометр **CS-VL** (рис. 18, таблица 12). Магниточувствительный датчик реализует автоколебательную систему с



разделенным пучком, на основе паров цезия (его нерадиоактивного изотопа Cs-133).

Принцип работы является типичным для СИ подобного типа и заключается в преобразовании ларморовской частоты прецессии, пропорциональной

напряженности магнитного поля.

Рис. 18 Цезиевый магнитометр CS-VL

Таблица 12. Основные технические характеристики CS-VL

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Цезиевый магнитометр CS-VL	Магнитная индукция, напряженность	15000 –105000 нТл	Scintrex, Canada

Каротажный зонд - магнитометр с датчиком Оверхаузера Magnum

Магнитометр реализует принцип динамической поляризации ядер, физический смысл которой заключается в явлении ларморовской прецессии магнитных моментов во внешнем магнитном поле. Определение модуля магнитной индукции возможно благодаря наличию фундаментальной связи между величиной поля и периодом свободной прецессии суммарного вектора ядерной намагниченности рабочего вещества вокруг направления вектора измеряемого поля. Технические характеристики зонда приведены в таблице 13.

Таблица 13. Основные технические характеристики зонда Magnum

Наименование и тип СИ МВ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Изготовитель, ориентировочная стоимость
Каротажный зонд - магнитометр с датчиком Оверхаузера	Магнитная индукция, напряженность	20000 –120000 нТл	Magnum, Canada

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения современного уровня магнитных измерений в России были исследованы характеристики средств измерения, внесенные и невнесенные в Госреестр. Для этого средства измерения, внесенные в Госреестр, были разбиты на 3 группы, в соответствии с принципом работы. К первой группе, были отнесены тесламетры на основе эффекта Холла, ко второй группе были отнесены феррозондовые магнитометры, а к третьей группе были отнесены остальные типы СИ: индукционные, прецизионные, на основе магниторезистивных датчиков, а также СИ, основанные на квантовых эффектах и явлениях, возникающих при взаимодействии

микрочастиц с магнитным полем, например: оверхаузеровские магнитометры, протонные магнитометры и магнитометры на основе ЯМР, реализующие метод свободной и вынужденной прецессии ядер.

Анализ базы данных утвержденных типов средств измерений магнитных величин показал, что в настоящее время наша страна обладает собственной сетью национальных производств различных типов средств измерений. Большинство приборов для магнитных измерений, внесенных в Госреестр, сделаны в России. На рынке не только появляются новые производители, но и ведется работа по обновлению баз данных уже существующих средств измерений. Среди приборов, вне Госреестра по своим характеристикам выделяются квантовый магнитометр с оптической накачкой паров калия и цезиевый магнитометр. Эти приборы зарубежного производства и отечественных аналогов пока не имеют.

О высоком уровне отечественной метрологии в области магнитных измерений и ее признании в мире свидетельствует тот факт, что именно российский ВНИИМ им. Д.И. Менделеева стал инициатором международных сличений индукции магнитного поля.

В основе будущего развития средств измерений магнитных величин во всем мире лежит стратегия Консультативного Комитета по электромагнитным измерениям, согласно которой современная точность измерений, принятая в мире, уже находится на пределе возможностей. Поэтому следующий этап развития метрологии – это не только доступность точных измерений для широкого круга потребителей, но и проведение измерений в реальном времени.

ВЫВОДЫ

Таким образом, новейшими и наиболее перспективными СИ магнитных характеристик являются СИ, основанные на квантовых эффектах и явлениях, возникающих при взаимодействии микрочастиц с магнитным полем (оверхаузеровские магнитометры, протонные магнитометры и магнитометры на основе ЯМР, реализующие метод свободной и вынужденной прецессии ядер).

В сравнении с зарубежными аналогами, РФ в настоящее время обладает конкурентно способным СИ на основе квантовых эффектов – оверхаузеровский магнитометр POS-1, производства г. Екатеринбург.

Вне Госреестра рынок СИ представлен множеством наименований, однако с точки зрения спецификации устройств, зарубежные аналоги предоставляют больший выбор и большие измерительные возможности.

Список использованной литературы

1. <http://www.bipm.org> – официальный сайт BIPM
2. https://www.bipm.org/utills/en/pdf/BIPM-Work-Programme_2016-2019_final.pdf – стратегия развития CCEM
3. <http://www.coomet.org/> – официальный сайт COOMET
4. Н.И.Ханов, Ю.А. Кустиков, А.Б. Дятлев: Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Метрологическое обеспечение экономики в современных условиях», 23-25 сентября 2015 г., ФБУ «Тест – С.-Петербург», 2015 г.
5. <https://www.bipm.org/utills/en/pdf/CCEM-strategy-summary.pdf> – отчет о работе CCEM к 22.09.2017
6. Красовский В.В: О метрологии – коротко, Минск БелГИМ, 2012 г. – 84 с
7. <http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,ETALON> – Реестр ГПЭ России
8. http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,ETLN_EV – Области измерений, прослеживаемость к ГПЭ
9. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> – Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Сведения об утвержденных типах средств измерений
10. В.Н. Заболотнов, В.Т. Минлигареев: Средства измерений магнитных величин: аналитический обзор, журнал «Мир измерений», 2013 г.
11. В.А.Сапунов, А.Ю.Денисов, Д.В.Савельев, С.Ю. Хомутов, О.А. Кусонский, Ю.К.Доломанский, J.L.Rasson: Абсолютный оверхаузеровский магнитометр POS-1 и опыт его применения на магнитных обсерваториях, 2003 г.
12. <http://www.rostest.ru/page3.php> - Сфера государственного регулирования обеспечения измерений
13. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904 - Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ (последняя редакция)