

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 681.5:004.9:658.512.8

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-124-138>



Тенденции развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом усложнения их функциональности

В. Ш. Сулаберидзе¹ , А. Г. Чуновкина^{1, 2} , А. Н. Пронин¹ ,
А. А. Неклюдова^{1, 2} , К. А. Томский¹

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия
 a.a.tsurko@vniim.ru

² ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Архитектура и функциональность измерительных систем непрерывно усложняются. Вслед за тем неуклонно возрастает необходимость в совершенствовании их метрологического обеспечения, включая разработку новых подходов к поверке, калибровке и оцениванию неопределенности измерений в условиях динамического и интеллектуального взаимодействия компонентов. На основе анализа публикаций сформулированы ключевые этапы и тенденции развития измерительных систем, обусловленные процессами информатизации, автоматизации и повышения их функциональной многозадачности.

Показано, как внедрение современных цифровых технологий, методов предиктивной аналитики и искусственного интеллекта трансформирует роль измерительных систем в управлении технологическими процессами, обеспечивая не только точный контроль параметров, но и активное участие в их регулировании и оптимизации.

Особое внимание уделено влиянию этих изменений на повышение качества выпускаемой продукции за счет более глубокой и оперативной аналитики.

Также затронуты актуальные вопросы терминологической согласованности, возникающие в результате интеграции информационных и измерительных технологий, что требует унификации понятийного аппарата в метрологии и смежных областях.

Подчеркивается важность междисциплинарного подхода для обеспечения достоверности, воспроизводимости и сопоставимости измерений в современных цифровых производственных средах. Работа направлена на формирование основы для дальнейшего развития метрологической инфраструктуры в условиях цифровой трансформации промышленности.

Ключевые слова: измерительная система, информатизация, автоматизация, многофункциональность, метрологическое обеспечение

Для цитирования: Тенденции развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом усложнения их функциональности / В. Ш. Сулаберидзе [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 124–138. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-124-138>

Статья поступила в редакцию 15.11.2025; одобрена после рецензирования 09.12.2025; принята к публикации 25.12.2025.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

Development Trends in Metrological Support for Measuring Systems Amidst their Growing Functional Complexity

Vladimir Sh. Sulaberidze¹ , Anna G. Chunovkina^{1,2} , Anton N. Pronin¹ ,
Anastasia A. Nekliudova^{1,2}  , Konstantin A. Tomskiy¹ 

¹ D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
 a.a.tsurko@vniim.ru

² Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia

Abstract: As the architecture and functionality of measuring systems grow increasingly complex, there is a corresponding and steady rise in the need to enhance their metrological support. This necessitates the development of new methods for verification, calibration, and measurement uncertainty assessment under conditions of dynamic and intelligent interaction between elements.

Analysis of the literature has identified the key stages and current trends in the development of measurement systems, which are driven by informatization, automation, and the growth of their multifunctional capabilities. The article demonstrates how modern digital technologies, predictive analytics, and artificial intelligence are transforming the role of measurement systems in process control. It ensures not only precise parameter monitoring but also active participation in their regulation and optimization.

The study highlights how these transformations enhance product quality by enabling more in-depth and real-time analytics.

The study also examines the emerging terminological inconsistencies caused by the convergence of IT and measurement technologies, highlighting the need for a unified conceptual framework across metrology and related areas.

The study underscores the necessity of an interdisciplinary approach to ensure measurement reliability, reproducibility, and comparability within modern digital production settings.

The work aims to establish the foundation for the further development of the metrological infrastructure in the context of the digital transformation of industry.

Keywords: measuring system, informatization, automation, multifunctionality, metrological support

For citation: Sulaberidze VSh, Chunovkina AG, Pronin AN, Nekliudova AA, Tomskiy KA. Development trends in metrological support for measuring systems amidst their growing functional complexity. *Measurement Standards. Reference Materials.* 2025;21(4):124–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-124-138>

The article was submitted 15.11.2025; approved after reviewing 09.12.2025; accepted for publication 25.12.2025.

Введение

Измерительные системы (ИС) стремительно эволюционируют. С ростом разнообразия объектов, целей и задач измерений усложняется

функционал ИС, увеличивается их номенклатура. Широкое применение ИС в народном хозяйстве неизбежно стимулирует совершенствование их метрологического обеспечения во всей

полноте этого явления: от законодательного определения и понятийного аппарата – до модернизации методической и материальной базы.

С развитием ИС на первый план выходит вопрос о соответствии возможностей метрологов потребностям эксплуатационников ИС в метрологическом сопровождении таких систем. Прогнозирование тенденций развития метрологического обеспечения измерительных систем может иметь решающее значение для решения этого вопроса.

Авторы настоящей статьи поставили цель систематизировать хронологически направления развития ИС с учетом усложнения их функциональности. С этой целью планируется исследовать два вопроса:

I. Отвечает ли определение измерительной системы в ГОСТ Р 8.596-2002 современному уровню развития измерительных систем?

II. Какие подходы к метрологическому обеспечению таких систем применяются?

В рамках исследования предстоит:

– оценить понятийный аппарат государственных общероссийских стандартов (ГОСТ) за два с половиной предшествующих десятилетия;

– проанализировать публикации в отраслевой учебной и научной литературе;

– представить эволюцию ИС;

– обобщить подходы к метрологическому обеспечению ИС;

– систематизировать особенности метрологического обеспечения ИС.

Главным результатом должен стать прогноз тенденций развития технологии и процессов метрологического обеспечения современных ИС.

Признаки и последовательность развития ИС

Появление в 1960-х годах ИС оценивается как результат системного подхода к управлению данными в процессе измерений. Развитие этих систем и расширение областей их применения тесно связано с развитием вычислительной техники, автоматизацией управления процессами. Следствием этого процесса стали подъем эффективности и снижение затрат при автоматизации процессов измерения и обработки данных, повышение качества

и надежности измерений, что немаловажно практически во всех сферах деятельности и отраслях экономики.

В вопросах признаков и последовательности развития ИС однозначное понимание пока окончательно не сформировалось. Публикации на эту тему содержат несколько вариантов описания эволюции ИС, в том числе версию, сгенерированную искусственным интеллектом ИИ.

Представим обобщенное видение истории ИС.

Хронологический подход

1-й этап (1960–1980 гг.) – внедрение ИС в бухгалтерию, автоматизация управления, использование ЭВМ для обработки данных;

2-й этап (1980–2000 гг.) – повышение вычислительной мощности, расширение сферы применения, развитие стандартов с требованиями к ИС;

3-й этап (с 2000 г. по настоящее время) – использование технологий Cloud Computing (или Cloud Technologies – «облачные технологии»), Big Data («большие данные»), Artificial Intelligence (AI, он же ИИ – «искусственный интеллект»), Sensor Networks («сенсорные сети»).

Поколенческий подход

Первое поколение (конец 1950-х – начало 1960-х гг.) было ориентировано на формирование научной концепции ИИС и установление принципов совместного функционирования компонентов, отвечающих за сбор, обработку и трансляцию измерительных данных. На этом этапе преобладали централизованные системы циклического сбора информации, содержащие вычислительные элементы. Математический аппарат, применяемый при разработке и анализе таких систем, базировался на детерминированных моделях, что позволило обозначить этот период как эру детерминизма в теории ИИС.

Второе поколение (1970-е гг.) характеризуется внедрением адресной схемы сбора информации и обработкой данных посредством встроенных вычислительных устройств. Элементная база систем этого поколения была представлена микроэлектронными компонентами малой и средней степени интеграции. Указанный период отмечен развитием теоретико-системных подходов на основе методов теории случайных

процессов и математической статистики, что дало основание называть его периодом стохастичности в развитии ИИС.

Третье поколение (1980-е – начало 1990-х годов) ознаменовалось массовым внедрением больших интегральных схем (БИС), микропроцессорных компонентов, мини-ЭВМ и стандартизованных промышленных функциональных модулей. Ключевой особенностью было обеспечение функциональной и метрологической совместимости между компонентами по информационным, конструктивным, энергетическим и эксплуатационным параметрам, а также развитие архитектур с распределенной обработкой информации и адаптивным управлением процессами.

Четвертое поколение (1990-е – начало 2000-х гг.) отличается появлением гибких, переконфигурируемых ИИС с программируемой функциональностью. В отличие от предыдущих поколений, функциональное назначение системы определяется не только конструктивными решениями производителя, но и устанавливается конечным пользователем в соответствии с его задачами. Это стало возможным благодаря развитию вычислительной техники и внедрению микросхем с высокой и сверхвысокой степенью интеграции, позволяющих выполнять сложные вычислительные и логические операции на уровне отдельных компонентов системы.

Пятое поколение (с 2000-х гг. по настоящее время) характеризуется массовым развитием адаптивных, интеллектуальных и виртуализированных архитектур ИИС, построенных на базе универсальных вычислительных платформ (персональных компьютеров, промышленных контроллеров) и современного программного обеспечения. Интеллектуализация систем проявляется во встроенных функциях самодиагностики, предиктивного анализа состояния компонентов и адаптации параметров работы к изменяющимся условиям функционирования [1, 2].

Эволюция метрологического сопровождения ИС

Близкая по содержанию классификация этапов эволюции измерительных систем и соответствующие изменения в подходах к их метрологическому сопровождению (комплексная

проверка, поэлементная проверка и др.) даны в работе [3].

Несмотря на некоторые различия в трактовке истории развития ИИС, общие представления о важных признаках их эволюции не противоречат друг другу. Естественно, что по мере развития ИИС возрастает и их разнообразие. В целом можно сказать, что это разнообразие определяется соответствующим разнообразием объектов (в общем смысле) измерений во всей полноте и многообразии областей деятельности. Перечень областей деятельности, в которых увеличивается потребность в использовании современных ИИС, достаточно широк – это системы контроля климата, энергообеспечения, электроснабжения, безопасности, учета ресурсов, снабжения, логистики, мониторинга транспорта, управления дорожным движением, диагностики и прогнозирования отказов, контроля качества продукции и т. д.

Находящиеся в развитии и быстро прогрессирующие области научных исследований или технологий, в которых широко применяются измерения, наполняют новым содержанием основополагающие метрологические понятия и требуют соответствующих уточнений терминологии.

Измерительная система может входить в состав информационно-измерительной системы или систем контроля, диагностики и т. д. Но объектом метрологического обеспечения является именно измерительная система.

Разнообразие структурных схем ИС

ИС объективно отличаются по ряду признаков, отражающих области применения, способы комплектования, структуру, типы входных и выходных сигналов, виды измерений и режим работы [4]. Не говоря уже о потенциально различных областях их применения, таких как научные исследования, испытания и контроль сложных изделий, управление технологическими процессами. Различные у них и объекты исследований¹.

ИС часто функционирует в рамках двух взаимодополняющих целевых установок:

¹ Тема № 5. Информационно-измерительные системы. Основные понятия, классификация, обобщенная структура, состав. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/4200172/page:9/> (дата обращения: 12.06.2025).

- обеспечения оптимальности и надежности собственного измерительного процесса;
- предоставления вышестоящим системам управления достоверной информационной поддержки.

Указанным целевым установкам соответствует набор приданых им функций, представленных нами в последовательности:

→ восприятие объекта и сбор информации о нем → преобразование этой информации и ее обработка → кодирование информации в передаваемый формат и/или визуализация для оператора → сохранение в памяти системы → выработка управляющих команд для регулирования технологических параметров.

В литературе описаны попытки предложить упрощенные системы классификации ИС, например, по таким признакам, как связь с другими ИС, физическая природа измеряемого параметра, методы сбора и обработки информации, методы преобразования сигнала в измерительных преобразователях [5].

Характеристики ИС определяются, прежде всего, спецификой объекта контроля. Помимо основной функции получения информации от объекта, система дополнительно обеспечивает вышестоящие системы управления достоверными данными, что расширяет ее функциональный профиль за счет операций обработки, передачи, архивирования и предоставления информации. Эффективность такой системы оценивается по совокупности показателей: точность, помехоустойчивость, надежность, производительность, сохранность данных, адаптивность и др.

В случае, когда основной целью применения ИС является контроль и управление параметрами техпроцесса, реализуемого на конкретной установке, данные от ИС используются для регулирования параметров техпроцессов в рамках АСУТП.

Таким образом, разнообразие существующих ИС в значительной степени определяется разнообразием входящих в нее компонентов, и не только. Приведенный к статье перечень научных и учебных изданий многократно встречаются варианты классификации ИС по различным признакам. Однако до сих пор единой, всеобщей и общепринятой классификация ИС нет. Причины отсутствия всеобщей

классификации ИС имеют объективный характер. Кстати говоря, важным признаком является такая особенность ИС – относится ли она к системам ближнего или дальнего действия. Это принципиально с той точки зрения, являются ли линии связи и передачи информации в данной ИС проводными или радио-телеинформационными.

Архитектура ИС демонстрирует значительное структурное разнообразие в последовательности элементов, начиная от измерительных преобразователей и заканчивая устройствами обработки и визуализации данных. В практике проектирования выделяют несколько базовых структур: так называемые ниточные, централизованные и распределенные.

Ниточная структура характеризуется наличием самостоятельного измерительного канала для каждой контрольной точки. Основным недостатком данного подхода является значительный объем используемого оборудования, что приводит к высокой стоимости создания ИС. В связи с этим, ниточная структура находит применение преимущественно в системах с ограниченным количеством контролируемых параметров.

При возрастании числа точек контроля становится целесообразным применение ИС с централизованной структурой. В системах данного типа измерительные сигналы от первичных преобразователей через коммутационное устройство поступают на единое центральное вычислительное устройство. Такое устройство выполняет комплекс задач: преобразует данные в значения физических величин. Проводит их сравнение с заданными уставками, формирует управляющие сигналы для устройств сигнализации, выводит информацию на централизованный дисплей и координирует работу всех детектирующих устройств системы.

Альтернативной, позволяющей минимизировать протяженность кабельных соединений, является распределенная структура, реализация которой предполагает двухуровневую организацию сбора информации. Система контроля сегментируется на отдельные функциональные блоки, в каждом из которых установлена локальная станция сбора данных, аккумулирующая

информацию с измерительных преобразователей, размещенных в пределах определенного помещения или технологического участка. Децентрализация управления позволяет не только сократить и упростить кабельную инфраструктуру, но и облегчает процессы монтажа, настройки, регулировки и ввода системы в эксплуатацию. Кроме того, повышает удобство проведения периодических проверок и отказоустойчивость системы в целом.

Цифровизация как фактор эволюции ИС

Стоит отметить, что эволюцию ИС во многом определило внедрение вычислительной техники, в частности промышленных компьютеров, а также применение микропроцессоров и микроконтроллеров для построения измерительных преобразователей. Наделение первичных преобразователей функциями интеллектуальной обработки данных и возможностью обмена по стандартным шинам позволило не только повысить метрологические и эксплуатационные характеристики аппаратуры, но и существенно снизить затраты на создание информационно-кабельной сети.

Цифровизация в технических областях деятельности, в частности, технологических процессов, реализуемых техническими системами, приводит к необходимости создания цифровых моделей систем, техпроцессов и собственно результата реализации техпроцесса (продукта, изделия). Потребность в установлении влияния параметров техпроцесса на характеристики продукта с целью регулирования и поддержания значений параметров в допустимых диапазонах неизбежно приводит к необходимости автоматизации действий по регулированию параметров, что в цифровых системах означает создание предиктивных автоматизированных технических систем. А это, в свою очередь, естественным образом стимулирует и создание цифровых автоматизированных измерительных систем, причем, реализующих не только процедуры контроля параметров техпроцессов и характеристик продукта, но и контроля соответствия средств измерений, входящих в состав автоматизированной измерительной системы, требованиям к точности измерений (в более общем плане – к метрологической надежности средств измерений). Из этого следует, что для

адекватного контроля и регулирования параметров техпроцесса, реализуемого автоматизированной технической системой, и, следовательно, характеристик конечного продукта, требуется наличие автоматизированной измерительной системы такого же уровня цифровизации. В обеих этих системах для обеспечения эффективного их функционирования неизбежно привлечение к процессам контроля, регулирования и прогноза состояния (с точки зрения соответствия требованиям) искусственного интеллекта (ИИ).

Таким образом, реализация на практике автоматизированных технических систем с функциями контроля, регулирования и предсказания параметров техпроцессов и характеристик продукта неизбежно приводит к потребности в автоматизированных измерительных системах такого же уровня цифровизации, т. е. средств измерений, реализующих помимо функций контроля параметров еще и функции предсказания характеристик метрологической надежности входящих в состав измерительной системы СИ. В конечном итоге это и означает наличие цифровых автоматизированных измерительных систем, содержащих в своем составе автоматизированные средства измерений с искусственным интеллектом, адаптированные к конкретной автоматизированной технической системе.

Внедрение предиктивных методов и ИИ в управлении и регулировании технологическими процессами (техпроцессами), реализуемыми техническими системами, и обеспечивающими производство продукта с требуемыми характеристиками неизбежно должно сопровождаться развитием систем контроля и регулирования параметров техпроцессов до соответствующего уровня. Иными словами, измерительные системы, обеспечивающие контроль и регулирование параметров техпроцессов, должны соответствовать уровню цифровизации технических систем.

Следовательно, измерительные системы должны соответствовать требуемому уровню внедрения предиктивного анализа как элемента цифровизации в анализе рисков при оценке метрологической надежности средств измерений (ГОСТ Р 71562–2024²).

² ГОСТ Р 71562–2024. Средства измерений на основе искусственного интеллекта. Метрологическое обеспечение. Общие требования.

Рассматривая подходы к решению обсуждаемой в статье проблемы метрологического обеспечения (МО) современных ИС, подчеркнем: нас интересует обусловленная этим развитием трансформация МО.

В этой связи возникают два вопроса, ответы на которые будут рассмотрены в следующих главах статьи.

Вопрос I:
отвечает ли определение измерительной системы в ГОСТ Р 8.596–2002 современному уровню развития измерительных систем

Опорным документом для формирования терминологической базы стал ГОСТ Р 8.596-2002³, устанавливающий определение ИС как предмета настоящего исследования⁴.

По мнению авторов, определение измерительной системы, данное в ГОСТ Р 8.596-2002, соответствует современному развитию измерительных систем, т. е. многообразие существующих измерительных систем есть развитие их компонентов, где, возможно, вычислительный компонент претерпел наиболее существенную трансформацию.

В то же время, некоторая неоднозначность усматривается в формулировке: «ИС обладают основными признаками средств измерений и являются их разновидностью⁵». Несомненно, можно согласиться, что ИС обладает признаками СИ, если под признаками понимать наличие установленных метрологических характеристик. Но утверждение, что ИС является разновидностью СИ, требует комментирования следующих определений компонентов ИС, представленных в ГОСТ Р 8.596–2002:

- Измерительный канал ИС⁶;
- Компонент ИС⁷;
- Измерительный компонент ИС⁸;

³ ГОСТ Р 8.596-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.

⁴ Там же : разд. 3.1.

⁵ Там же.

⁶ Там же: разд. 3.2.

⁷ Там же : разд. 3.3.

⁸ Там же : разд. 3.3.1.

- Связующий компонент ИС⁹;
- Вычислительный компонент ИС¹⁰.

Анализ приведенных выше определений показывает, что измерительный компонент является компонентом ИС и определен как средство измерений. Следовательно, трудно согласиться, что ИС является разновидностью СИ. При применении ИС ее можно рассматривать как единое целое, но в задачах исследований ИС (утверждение типа, поверка, калибровка и др.) необходима декомпозиция системы на составляющие для выбора подходов к метрологическому обеспечению таких систем.

Задача, решаемая современными ИС, в определенной мере обратна задаче отдельного измерительного устройства: не декомпозировать объект измерений на набор его отдельно исследуемых свойств с целью их выделения и измерения по отдельности, а объединить данные о всех главных свойствах (параметрах) объекта измерений с целью их совместного анализа, выявления взаимосвязей и создать тем самым достаточно полное описание объекта и повысить точность измерительной информации о данном объекте. Таким образом, характерными особенностями ИС является одновременное совместное измерение многих параметров объекта (т. е. многоканальность) и передача измерительной информации в виде, наиболее удобном для последующей обработки пользователем [4, 5].

Измерительная система может входить в состав информационно-измерительной системы или систем контроля, диагностики и т. д. Но объектом метрологического обеспечения является именно измерительная система.

Вопрос II:
какие подходы к метрологическому обеспечению ИС применяются

П.1 Теоретические основы и нормативная база метрологического обеспечения ИС

Метрологическому обеспечению ИС посвящено множество научных работ [5, 7], учебных пособий [2] и нормативных документов¹¹.

Задачи и содержание работ по метрологическому обеспечению ИС довольно подробно

⁹ Там же : разд. 3.3.2.

¹⁰ Там же : разд. 3.3.3.

¹¹ ГОСТ Р 8.596–2002... Основные положения.

описаны в книге [4], где рассмотрены проблемы фундаментальные, прикладные, организационные и правовые. Там же подробно изложены методы определения метрологических характеристик ИИС. В данном аспекте разделяем точку зрения авторов. В качестве доказательной базы по данному разделу приведем аргументацию из данного источника.

С учетом темы нашей публикации наибольший интерес представляет та часть т. н. фундаментальных и прикладных проблем, в которой решаются вопросы: оценки метрологических характеристик ИС в процессе эксплуатации, создания методов синтеза структур ИС с заданными метрологическими характеристиками, разработки методов испытаний, калибровки, поверки, метрологических исследований ИС. В силу практически бесконечного разнообразия ИС, обусловленного множеством объектов, целей, задач, функций, структур и компонент, не приходится рассчитывать на полное, всеобъемлющее и окончательное решение перечисленных проблем.

Однако на любой стадии развития ИС вопросы их метрологического обеспечения должны иметь конкретные практические решения, несмотря на то, что, по мнению авторов рассматриваемой нами работы [4], сложность МО ИС многократно возрастает из-за необходимости учета вариативности и других особенностей их функционального назначения.

В этом же источнике подробно рассмотрена динамика изменения (уточнения) термина МО ИС, начиная с ГОСТ 1.25–76 и МИ 2438–97¹². В окончательно предлагаемой формулировке МО ИИС предпринята попытка в определении учесть так называемые «неизмерительные» функции ИИС. То есть, предпринята попытка учесть особенность ИИС, заключающуюся в том, что по сравнению с обычной ИС, помимо измерительных функций в ИИС реализуются функции обработки, хранения и передачи измерительной информации. И в этой связи наиболее точным с нашей точки зрения представляется определение МО ИИС, сформулированное в работе [7]: «МО ИИС – система научной,

¹² ГОСТ 1.25–76 Метрологическое обеспечение. Основные положения. МИ 2438–97 Системы измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

технической, правовой и организационной деятельности, направленной на достижение единства процессов преобразования информации, осуществляющей в ИИС и требуемой точности результатов ее функционирования».

В значении представленного выше определения попробуем трактовать далее источник [4], где предлагается в описании основных работ по МО ИИС учесть рекомендации, содержащиеся в МИ 2438–97 в части МО ИИС:

- нормирование метрологических характеристик на этапе проектирования по единым требованиям;
 - разработка специализированных методов и средств, необходимых для достоверного контроля установленных метрологических характеристик;
 - проведение метрологической экспертизы техническое документации на всех стадиях жизненного цикла ИИС;
 - организация испытаний в целях утверждения типа ИИС (как серийных, так и единичных образов) в целях обеспечения единства измерений и достоверности измерительной информации;
 - оценка соответствия ИИС утвержденному типу;
 - системный анализ текущего состояния метрологического обеспечения ИИС и разработка на основе комплексных программ путей совершенствования эталонной базы;
 - осуществление государственного метрологического контроля (надзора) за состоянием и правилами эксплуатации ИИС;
 - организация и выполнение поверки и/или калибровки измерительных каналов ИС;
 - аттестация алгоритмов сбора и обработки измерительной информации, используемого программного обеспечения в составе ИИС.
- Раскрывая суть нормативной базы, обратимся к тексту действующего ГОСТ Р 8.596-2002, в нем определены следующие виды деятельности по МО ИС (п. 4.4):
- нормирование, расчет метрологических характеристик измерительных каналов ИС;
 - метрологическая экспертиза технической документации на ИС;
 - испытания ИС в целях утверждения типа; утверждение типа ИС и испытания на соответствие утвержденному типу;

- сертификация ИС;
- поверка и калибровка ИС;
- метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением ИС.

При этом МО устанавливается для каждого измерительного канала ИС и при необходимости для комплексных и измерительных компонентов ИС (п. 5.1).

Очевидные изменения в эксплуатации и обслуживании ИИС, обусловленные внедрением цифровых и облачных технологий, искусственного интеллекта, цифровых копий изделий, автоматизированного контроля и самоконтроля СИ и элементов ИИС, обеспечивающих передачу, хранение, обработку данных, внедрением методов предиктивной аналитики и т. д., неизбежно приводят к необходимости совершенствования и даже модернизации методов и средств МО современных ИИС на стадии эксплуатации.

II. 2 Особенности метрологического обеспечения различных конфигураций ИИС

Говоря об особенностях МО, рассмотрим несколько схем и обсудим компоненты ИИС, начиная от выходного сигнала измерительного преобразователя (ИП) и до компоненты обработки, представления и хранения результата измерений, условно говоря, до пользователя.

То есть в настоящей публикации не рассматриваются и не оцениваются объекты измерений и связанные с этим особенности ИИС. То же относится и к ИП, поскольку, как это следует из практики, радикальные изменения в режимах их функционирования практически невозможны в подавляющем большинстве технических систем, в основном из-за требований по непрерывности реализации техпроцесса. Иными словами, системы и методы МО размещенных в объекте ИП практически не подвергаются радикальным изменениях, в отличие от упомянутых выше компонентов ИИС.

Процедуры обеспечения метрологической исправности элементов современных ИИС, как и интеллектуальных датчиков, включающие в себя самоконтроль, промежуточные

сравнения с мерой или опорным значением и др. нормированы в действующих НД [6, 7, ГОСТ¹³].

Далее представим схемы (графические модели) ИС в развитии и кратко прокомментируем каждую.

Схема на рис. 1 – ИС так называемого второго поколения, МО которых полностью нормировано и описано в ГОСТ Р 8.596–2002. С точки зрения функционирования ИС это фактически означает, что контроль метрологической исправности соответствующих элементов ИС производится периодически, как правило, с прерыванием техпроцесса, реализуемого объектом измерений.

Схема на рис. 2 – ИС с возможностью подключения калибраторов к отдельным элементам ИС в целях их метрологической проверки. В остальном отличий в принципах и методах МО от схемы (рис. 1) нет.

Схема на рис. 3 – ИС с возможностью контроля метрологической исправности ее элементов путем ввода опорного значения величины. В этой схеме подразумевается периодический контроль метрологической исправности всей цепочки составляющих ИС, начиная с выходного сигнала ИП. При этом сам ИП относится к СИ с функцией самоконтроля, а проверка всех остальных компонент ИС вплоть до «пользователя» осуществляется путем подачи цифрового опорного значения (генерируемого специальным устройством). Данная схема в большинстве случаев используется ИС

¹³ ГОСТ Р 8.673–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

ГОСТ Р 8.674–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования к средствам измерений и техническим системам, и устройствам с измерительными функциями.

ГОСТ Р 8.734–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.

ГОСТ Р 8.818–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений и системы измерительные виртуальные. Общие положения.

ГОСТ Р 7.825–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний.

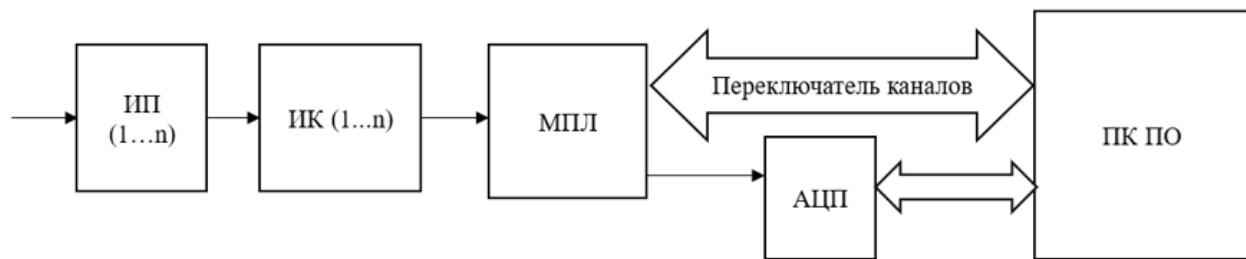


Рисунок заимствован из источников [3, 4] и адаптирован авторами / The figure is reproduced from [3, 4] and adapted by the authors
 Рис. 1. Схема ИС, характерная для конца 1970-х гг.: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; ИК – измерительный канал; МПЛ – мультиплексор

Fig. 1. Block diagram of a measuring system typical for the late 1970s: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; IC – Measuring Channel; MPX – Multiplexer

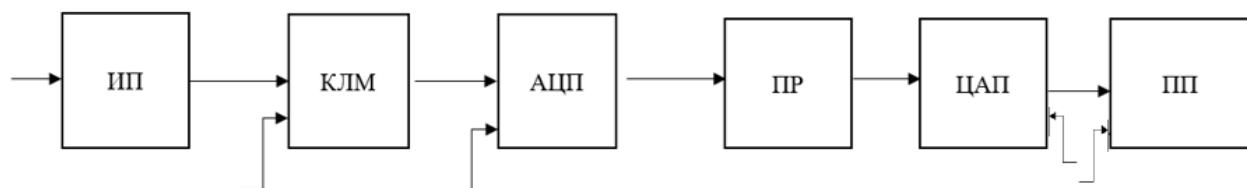


Рисунок заимствован из источников [3, 4] и адаптирован авторами / The figure is reproduced from [3, 4] and adapted by the authors
 Рис. 2. Схема ИС с возможностью подключения калибраторов к отдельным элементам системы в целях их поверки: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; КЛМ – клеммник; ПП – показывающий прибор; ПР – процессор; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

Fig. 2. Block diagram of a measuring system featuring provisions for connecting calibrators to individual elements for verification purposes: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; TK – Terminal Block; DP – Display Device; PROC – Processor; DAC – Digital-to-Analog Converter

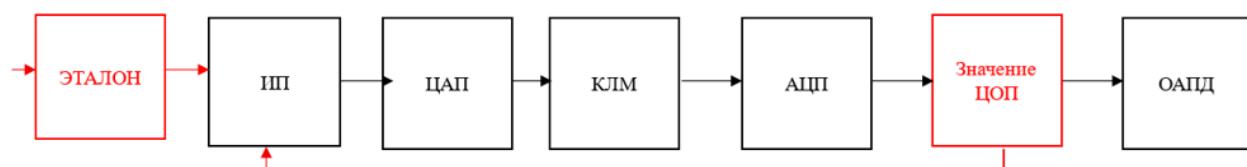


Рисунок заимствован из источников [3, 4] и адаптирован авторами / The figure is reproduced from [3, 4] and adapted by the authors
 Рис. 3. Схема ИС с возможностью контроля метрологической исправности ее элементов путем ввода ЦОП: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; КЛМ – клеммник; ОАПД – обработка и анализ передаваемых данных; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЦОП – цифровое опорное значение

Fig. 3. Block diagram of a measuring system with the capability for monitoring the metrological integrity of its elements by introducing a digital reference value: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; TK – Terminal Block; OAD – Data Processing and Analysis; DAC – Digital-to-Analog Converter; DREF – Digital Reference Value

нереализуема вследствие особенностей функционирования объекта измерений, доступности ИП в штатном режиме работы объекта и даже из-за требований по непрерывности его функционирования.

Схема на рис. 4 – ИС с линией передачи генерируемого в среде LabVIEW опорного сигнала. Генерация опорных значений, проверенных с помощью значения сигнала с применением современного машинного

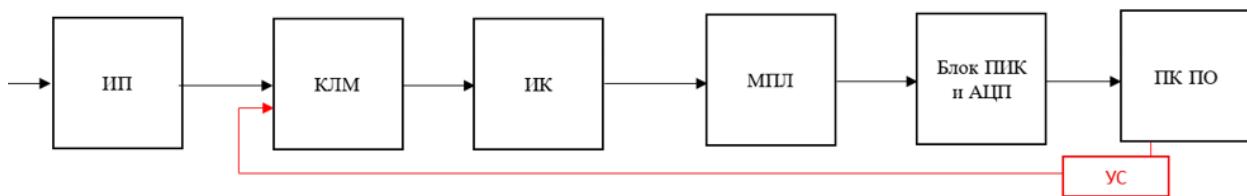


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. Схема ИС с линией передачи генерируемого в среде LabVIEW опорного сигнала: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; ИК – измерительный канал; МПЛ – мультиплексор; КЛМ – клеммник; ПИК – переключатель измерительных каналов; ПК ПО – персональный компьютер с комплектом прикладного программного обеспечения (LabVIEW); УС – устройство сравнения сигнала, генерируемого ПК ПО с опорным значением

Fig. 4. Block diagram of a measuring system with a transmission line for a LabVIEW-generated reference signal: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; IC – Measuring Channel; MPX – Multiplexer; TK – Terminal Block; PIC – Measuring Channel Switch; PC SW – Personal Computer with a set of application software (LabVIEW); CS – Signal Comparison Unit (compares signal generated by PC SW with reference value)

моделирования, имитирующего работу ИС на данном объекте контроля (например, с помощью графического моделирования элементов ИС, с помощью программного обеспечения LabVIEW и ей подобных реально существующих и во многих отраслях применяемых прикладных программ).

Схема на рис. 5 также несколько упрощена, но в логике обсуждавшегося развития ИС, в том числе и с реализуемой в процессе штатной работы ИС функцией контроля метрологической исправности системы передачи сигнала от измерительного прибора к устройству регистрации, хранения и обработки информации.

Схемы, как на рис. 5, с беспроводной передачей измерительного сигнала, как правило, реализуются в общественно значимых областях контроля и регулирования особо важных

или даже потенциально опасных параметров технических объектов или среды в целом. Подобные системы регистрации и передачи данных могут носить характер от условно локальных до разветвленных и условно глобальных (например, система управления спутниковой связью).

Когда речь идет о подобной дистанционной ИС, то с точки зрения требований МО и гарантий правильности и достоверности передаваемых дистанционно значений измеряемых величин важно обеспечить контроль правильности передаваемого по беспроводной связи значения измеряемых величин, в том числе и соответствие требованиям по их по точности. Для этих целей в оборудовании такой дистанционной ИС должны быть предусмотрены возможности по обработке передаваемых дистанционно (левая часть схемы на рис. 5) и регистрируемых

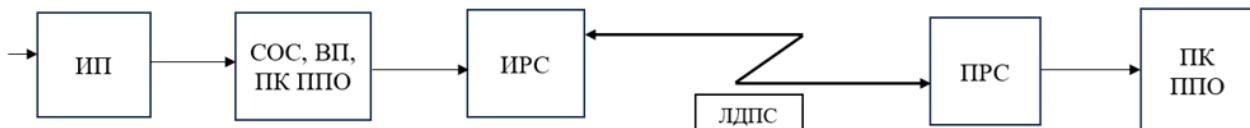


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 5. Схема с беспроводной передачей измерительного сигнала: ИП – измерительный преобразователь; ИРС – излучатель радиосигнала; ПРС – приемник радиосигнала; ПК ППО – персональный компьютер с прикладным программным обеспечением; СОС – система обработки сигнала; ВП – вторичный прибор; ЛДПС – линия дистанционной передачи сигнала

Fig. 5. Scheme with wireless transmission of the measurement signal: IP – Measuring Transducer; IRS – Radio Signal Transmitter; PRS – Radio Signal Receiver; PC SW – Personal Computer with Application Software; SOS – Signal Processing System; SP – Secondary Instrument; LTS – Long-Distance Signal Transmission Line

«пользователем» числовых значений величин. Т. е. должна оцениваться их точность, правильность, воспроизводимость, синхронность (при одновременной обработке сигналов от разных ИП ИС). Для этих целей компьютеры должны быть оснащены прикладным ПО, позволяющим производить математическую обработку результатов, включая оценку показателей их точности.

II. 3 Требования к программному обеспечению и современные методы метрологического обеспечения ИИС

В данном аспекте речь идет об особых требованиях к ПО, применяемому в ИИС. Достаточно подробно эти вопросы проанализированы в обзоре [6]. Поскольку эти системы гибкие, то нормировать показатели точности для всех возможных условий измерений не предоставляется возможным. Однако необходимо установить требование к ПО, в соответствии с которым ПО должно вычислять показатели точности результатов. Соответственно, при сертификации (валидации) ПО необходимо выполнить проверку этого требования.

На схемах 1–5 указаны компоненты, отображающие важные составляющие преобразования измерительного сигнала, относительно которых требуется подтверждение их метрологической исправности.

Что касается левой и правой частей ИС (рис. 5), то МО этих составляющих системы подобно тому, что характерно для схем на рис. 1–4.

Следует также подчеркнуть, что в схемах на рис. 3 и 4 благодаря наличию ПК и соответствующего ПО возможно и реализуемо МО с предиктивной аналитикой, позволяющей управлять техпроцессами, реализуемыми на техническом объекте контроля с целью обеспечения требуемого уровня качества конечного продукта, и это важно для ИС, функционирующих совместно с системой АСУ ТП данного объекта.

Разумеется, для реализации таких возможностей применяемое ПО должно проходить соответствующую аттестацию, в частности, на соответствие требованиям действующих в этой области нормативных документов (ГОСТ Р 8.654–2009).

Заключение

В статье предпринята попытка прогноза тенденций развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом усложнения их функциональности. Ключом к исследованию стала оценка соответствия имеющихся возможностей метрологов потребностям эксплуатационников ИС в метрологическом сопровождении таких систем.

Анализ содержания законодательных документов (ГОСТ) и близких по теме публикаций показал: определение «измерительная система» отвечает современному уровню развития ИС.

Основные признаки прогресса ИС заключаются в применении информационных технологий, интеллектуальных устройств и искусственного интеллекта, прикладного программирования в областях создания виртуальных приборов и систем, а также в сфере обработки, хранения и передачи данных пользователю.

Главный вывод исследования заключается в том, что технологии и процессы метрологического обеспечения современных ИС включают не только вопросы метрологической исправности элементов систем. Неотъемлемая часть данного процесса – прикладное программирование, необходимое (а) при создании виртуальных аналогов приборов и линий передачи данных; (б) для обработки и анализа данных о значениях измеренных величин, их достоверности и точности, в том числе и в целях обоснованной корректировки параметров техпроцессов в системах АСУ ТП.

Появление в 60-е годы XX века современных ИС стало результатом системного подхода к управлению данными в процессе измерений. Такого подхода придерживались и авторы исследования, подчеркивая важность междисциплинарного взаимодействия в обеспечении достоверности, воспроизводимости и сопоставимости измерений в современных цифровых производственных средах. Разнообразие разрабатываемых и внедряемых ИС велико – от локальных до глобальных систем, в том числе и разветвленных систем с беспроводной передачей данных в удаленные точки системы одновременно по нескольким каналам связи. Прогресс в ИС характеризуется применением интеллектуальных систем, интеллектуальных датчиков, искусственного интеллекта.

Указанные процессы не всегда и не совсем однозначны даже с точки зрения упорядочения и гармонизации терминологии, что также отмечено в данной статье.

Практика показывает, что ИС расширяют присутствие во всех сферах деятельности и областях измерений. Выводы данной статьи требуют проверки временем. Однако на их основе могут быть сформулированы предложения для дальнейшего развития метрологической инфраструктуры в условиях цифровой трансформации промышленности.

Конфликт интересов: Пронин А. Н. занимает должность генерального директора организации-учредителя журнала «Эталоны. Стандартные образцы». Чуновкина А. Г. входит в состав редакционного совета данного издания. Однако ни одно вышеуказанное лицо не имеет отношения к принятию решения о публикации настоящей статьи. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Conflict of interest: Pronin A. N. is the General Director of the founding organization of the journal «Measurement Standards. Reference Materials». Chunovkina A. G. serves on its Editorial Board. Neither was involved in the decision to publish this manuscript. This article was

subject to the journal's standard peer-review procedure. No other potential conflicts of interest were reported by the authors. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов: Все авторы внесли вклад в концепцию и дизайн исследования. Сулаберидзе В. Ш. – разработка и проектирование методологии исследования, проведение исследовательского процесса (сбор данных, визуализация); Чуновкина А. Г. – концептуализация, методология; Пронин А. Н. – руководство исследованием; Неклюдова А. А. – создание черновика рукописи, редактирование; Томский К. А. – валидация.

Contribution of authors: All authors contributed to the concept and design of the study. Sulaberidze V. Sh. – development and design of research methodology, conducting a research and investigation process (specifically data collection); Chunovkina A. G. – conceptualization, methodology; Pronin A. N. – supervision; Neklyudova A. A. – creation of the published work, editing; Tomsky K. A. – validation.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: The research did not receive any specific grant from any organization in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В. А., Волегов А. С. Метрологическое обеспечение измерительных систем : учебное пособие для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 27.03.01, 27.04.01 «Стандартизация и метрология»: в двух частях. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. 168 с.
2. Данилин А. А., Лавренко И. С. Измерения в радиоэлектронике : учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 408 с.
3. Данилов А. А. Метрологическое обеспечение измерительных систем : 4-е изд., перераб. и дополн. Санкт-Петербург : Политехника-Принт, 2017.
4. Паракуда Р. Н., Литвинов Б. Я. Информационно-измерительные системы: письменные лекции. Санкт-Петербург : СЗТУ, 2002. 76 с.
5. Шенброт И. М., Гинзбург М. Я. Расчет точности систем централизованного контроля. М. : Энергия, 1970. 408 с.
6. Метрологическое обеспечение измерительных информационных систем (теория, методология, организация) / Е. Т. Удовиченко [и др.]. М. : Изд-во стандартов, 1991. 190 с.
7. Automation in sensor network metrology: An overview of methods and their implementations / A. P. Vedurmudi [et all.] // Measurement: Sensors. 2025. Vol. 38, Supplement. P. 101799. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101799>
8. Емельянов В. А., Афонин Д. В. Особенности метрологического обеспечения информационно-измерительных систем // Мир измерений. 2012. № 11. С. 42–45.
9. Ильин В. А. Телеконтроль и телеуправление : учебное пособие для вузов. М. : Энергия, 1969. 343 с.

10. Солопченко Г. Н. Измерительные информационные системы: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров «Системный анализ и управление». Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 200 с.

REFERENCES

1. Zakharov VA, Volegov AS. *Metrological support of measuring systems: a textbook for universities*. In 2 vol. Yekaterinburg: Ural University Publishing House; 2018. 168 p. (In Russ.).
2. Danilin AA, Lavrenko IS. *Measurements in radio electronics: a textbook for universities*. St. Petersburg: Lan; 2022. 408 p. (In Russ.).
3. Danilov AA. *Metrological support of measuring systems*: 4th ed. St. Petersburg: Politekhnika-Print; 2017. (In Russ.).
4. Parakhuda RN, Litvinov BYa. *Information and measuring systems: written lectures*. St. Petersburg: SZTU; 2002. 76 p. (In Russ.).
5. Shenbrot IM, Ginzburg MYa. *Calculation of the accuracy of centralized control systems*. Moscow: Energy; 1970. 408 p. (In Russ.).
6. Udovichenko YeT, Bragin AA, Semenyuk AL et all. *Metrological support of measurement information systems (theory, methodology, organization)*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1991. 190 p. (In Russ.).
7. Vedurmudi AP, Miličević K, Kok G, Yong BX, Xu L, Zheng G et all. Automation in sensor network metrology: An overview of methods and their implementations. *Measurement: Sensors*. 2025;38(Supplement):101799. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101799>
8. Yemelyanov VA, Afonin DV. Specifics of measurement support of data measuring systems. *Measurements World*. 2012;11:42–45. (In Russ.).
9. Ilyin VA. *Telecontrol and telemanagement: a textbook for universities*. Moscow: Energia; 1969. 343 p. (In Russ.).
10. Solopchenko GN. *Measuring information systems: a textbook for universities*. St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta; 2010. 200 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сулаберидзе Владимир Шалвович – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории теоретической метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: sula_vlad@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5882-3160>

Чуновкина Анна Гурьевна – д-р техн. наук, руководитель отдела метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»; профессор кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: a.g.chunovkina@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6222-5884>

Пронин Антон Николаевич – генеральный директор ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: info@vniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Sh. Sulaberidze – Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Leading Researcher of the Research Laboratory of Theoretical Metrology, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: sula_vlad@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5882-3160>

Anna G. Chunovkina – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Metrology Department, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology; Professor of the Department of Metrological Support for Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: a.g.chunovkina@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6222-5884>

Anton N. Pronin – General Director, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: info@vniim.ru

Неклюдова Анастасия Александровна – канд. техн. наук, главный метролог, доцент кафедры теоретической и прикладной метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»; доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: a.a.tsurko@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0005-0472-6962>
ResearcherID O-3887-2018

Anastasia A. Nekliudova – Cand. Sci. (Eng.), Chief Metrologist, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Metrology, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology; Associate Professor of the Department of Metrological Support for Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: a.a.tsurko@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0005-0472-6962>
ResearcherID O-3887-2018

Томский Константин Абрамович – д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической и прикладной метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: tka46@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9868-1531>

Konstantin A. Tomskyi – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Theoretical and Applied Metrology, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: tka46@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9868-1531>