

# Совершенствование технологии калибровки средств измерения электрических величин на базе модульных приборов в системе Интернета измерений (IoM)

О.В. Стукач<sup>1,2</sup>, И.А. Ершов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Аннотация** – Рост количества программируемых средств измерений и спроса на метрологические услуги приводит к развитию концепции дистанционной калибровки, позволяющей значительно сократить финансовые, логистические затраты и рабочее время сотрудника калибровочной лаборатории, повысить эффективность работы метрологических служб и в конечном итоге значительно усовершенствовать систему передачи физических величин. Для обеспечения выполнения графика калибровки оборудования внедрение системы дистанционной калибровки актуально для крупных предприятий с территориально распределёнными филиалами. Основная особенность дистанционной калибровки заключается в автоматизации процесса и управлении средствами измерений по сети. Дано описание программно-аппаратного комплекса дистанционной калибровки через Ethernet на базе шасси для модульных приборов PXI в среде LabVIEW компании National Instruments. Простота интерфейса программного управления различными средствами измерений позволяет использовать разработанную систему с другими средствами измерений без значительных изменений в программах. Описаны ключевые особенности процедуры дистанционной калибровки программируемых вольтметров. Результаты использованы для разработки методики дистанционной калибровки программируемых вольтметров. На основе действующих законов и нормативных документов приведены рекомендации для практического использования предложенной системы.

**Ключевые слова** – средство измерений, поверка, программно-аппаратный комплекс, методика калибровки, интеллектуальная информационно-измерительная система, дистанционная калибровка, законодательная метрология, нормативная база, электрические величины, интеллектуальный датчик, Интернет измерений, Internet of Measurement, IoM, LabVIEW, измерение, измерительная процедура, метрологическая прослеживаемость, мера метрологической достоверности, неопределённость измерений, Аршин, транспортирование эталона, цифровой двойник, метрология 4.0, метрологическое облако, цифровая метрология, цифровизация.

## ВВЕДЕНИЕ

Закон «Об обеспечении единства измерений» обязывает изготовителей средств измерений (СИ) обеспечивать их периодическую поверку [1]. На сегодняшний день ежегодно поверяется несколько миллионов СИ, что приводит к их отрыву от производства на длительное время, большим денежным и временным затратам. Поверка у заказчика возможна не для всех видов СИ и связана с транспортировкой эталонов. Для экономии средств изготовители обосновывают непричастность СИ к сфере государственного обеспечения единства измерений или напрямую нарушают закон, хотя в условиях конкуренции изготовители заинтересованы в повышении качества, что напрямую зависит от достоверных показаний СИ. Несмотря на активное развитие информационных систем, повсеместно продолжает использоваться ручная поверка приборов и передача данных на бумажном носителе. Это свидетельствует о том, что система обеспечения единства измерений безнадежно устарела. Говорят даже о неоправданной затратности и кризисе всей системы традиционной метрологии [2], о необходимости смены её парадигмы [3], минимизации бюрократических процедур, о разработке новых методов передачи физической величины, в том числе автоматизированных, переходе от периодических процедур к адаптивным без участия человека [4].

Тем не менее, развитие сетевых технологий, распределённых измерительных информационных систем [5], средств автоматизации измерений, промышленного Интернета вещей [6–8] и цифровая трансформация открывают большие возможности в области оптимизации рутинных, однообразных и предельно регламентированных метрологических работ [9]. Использование революционных технологий связи позволяет организовать удалённое сличение метрологических характеристик СИ непосредственно в местах их эксплуатации [10, 11]. Автоматизация

позволяет в значительной степени уменьшить трудозатраты при калибровке и поверке выпускаемой продукции, даёт возможность проводить измерения низкоквалифицированному персоналу предприятия, что в свою очередь уменьшает стоимость выпускаемой продукции.

## I. ДИСТАНЦИОННАЯ КАЛИБРОВКА

Отечественный и зарубежный опыт [12] свидетельствует, что наиболее эффективным и современным решением передачи единиц электрических величин является дистанционная калибровка [13], имеющая давнюю историю [14–16], но не нашедшая пока широкого применения [17]. В её основе лежит использование программируемых СИ, которые позволяют управляться по Интернету в режиме реального времени [18], автоматизировать многие операции, такие как подача эталонных сигналов, проведение многократных измерений, фиксация показаний СИ, обработка полученных результатов, установление пригодности СИ и внесение данных в информационную систему “Аршин” [19] в существующем или расширенном виде [20] или в метрологическое облако [21]. Актуальность дистанционной калибровки возрастает с увеличением количества используемых программируемых СИ [22].

В статье [23] представлен метод проведения дистанционной калибровки СИ через Интернет, рассматриваются вопросы внедрения данного метода в аккредитованных лабораториях. Отмечено, что широкое внедрение дистанционной калибровки зависит от признания результатов этой метрологической услуги и выдвигает новые требования к самим СИ и к методам обработки результатов.

Системы дистанционной калибровки уже внедрены на ряде предприятий для конкретных СИ [24–26]. Но они зачастую предназначены для использования только на определённых предприятиях с целью калибровки конкретных приборов, а адаптация программного обеспечения к другому оборудованию невозможна или является затруднительной и дорогостоящей. Основной целью создания системы калибровки является возможность контроля и надзора за удалёнными эталонами и СИ, которые используются в процессе калибровки в условиях, определённых в соответствии с международным стандартом ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2006 [25]. Эта система состоит из транспортируемого устройства калибровки высокой точности, который управляется персональным компьютером на стороне поставщика услуг (сервера) и приложения на стороне сервера, которое управляет и контролирует весь процесс калибровки.

Дистанционная калибровка может быть реализована при помощи клиент-серверной архитектуры, состоящей из двух различных приложений, соответствующих калибруемому СИ и эталону [26]. При этом калибруемое и эталонное СИ должны быть

расположены в одном месте и подключены к клиентской системе, которая принимает команды от программы-сервера, установленной на оборудовании калибровочной лаборатории, и пересылает их на эти устройства через выбранный интерфейс. Затем она фиксирует показания прибора и передает их на сервер через Интернет. Все операции для подготовки сертификата о калибровке выполняются на стороне сервера.

Клиент-серверная часть является важной частью системы дистанционной калибровки [27]. В статье [28] после демонстрации простой архитектуры клиент-сервер утверждается, что использование мобильных многоагентных технологий решит большинство проблем безопасности, работая так же хорошо и эффективно, как традиционная архитектура клиент-сервер без агентов. Разработаны общий алгоритм функционирования, структурная и функциональная схемы системы. Архитектура построена с применением среды LabVIEW компании National Instruments, описана модель измерения и проведен анализ составляющих общей неопределённости измерений. Для считывания и распознавания показаний приборов предлагается использовать машинное обучение и распознавание образов [29]. Особенно это актуально для объектов энергосистемы, не имеющих подходящего интерфейса для передачи данных и которые не могут возвращать информацию для поправки калибровочной функции.

Для широкого спектра задач дистанционная калибровка требует синхронизации между клиентской и серверной сторонами. В работе [30] продемонстрирован прототип синхронной системы. Требования к синхронизации учтены и в алгоритме адаптивного динамического синхронного планирования. С помощью комплексных имитационных экспериментов подтверждена эффективность предложенного метода и его производительность с точки зрения общего времени выполнения калибровки.

Наиболее популярным приложением рассматриваемой технологии является энергетика [31], в частности, дистанционная калибровка счётчиков электрической энергии на основе облачных технологий и беспроводной связи [32–34]. Разработанная для удовлетворения растущих требований к калибровке счётчиков электроэнергии, самая эффективная и совершенная распределённая система, объединяющая несколько узлов, находится на ранней стадии разработки, но имеет потенциал масштабируемости [35]. В ней решается проблема распределения ресурсов для синхронной калибровки между распределёнными узлами путем внедрения гибридного генетического алгоритма, который оптимизирует планирование и управление ресурсами. Эксперименты показывают, что предложенный алгоритм превосходит другие сопоставимые подходы в распределённых системах калибровки.

Калибровка энергетического оборудования стала важной задачей в современных энергосистемах. В статье [36] предлагается прототип распределённой дистанционной калибровки, основанный на облачной архитектуре, объединяющей интеллектуальные датчики, технологии Интернета вещей и вычислительные технологии. Используется высокоточный модуль преобразования частоты в напряжение, использующий спутниковые сигналы для решения задач отслеживания и передачи измерений, тем самым обеспечивая надёжность и стабильность на протяжении всего процесса. Модуль мониторинга окружающей среды отслеживает температуру, влажность и электромагнитные помехи. В сочетании с системой видеонаблюдения и оптическим распознаванием символов это обеспечивает интеллектуальную сквозную запись и автоматическое извлечение данных во время калибровки. Реализован алгоритм планировки для передачи вычислительных задач в метрологическое облако, что позволяет максимально эффективно использовать ресурсы в рамках совместной работы и повышает качество обслуживания. Прототип расширяет существующие облачные платформы совместной работы, объединяя СИ и датчики в сеть, тем самым повышая интеллектуальность и точность калибровки на нескольких уровнях. Интегрированная облачная система управления обеспечивает стандартизированную обработку данных и безопасную совместную работу нескольких пользователей. Это решение не только повысило интеллектуальность и точность дистанционной калибровки, но и обеспечивает мощную техническую поддержку для обеспечения точности измерений и соответствия эксплуатационным характеристикам.

К другим приложениям в энергетике можно отнести калибровку измерительных трансформаторов в реальных условиях, когда температура в разных географических точках может существенно отличаться [37], релейной защиты и вторичных систем подстанций [38], где устройство для тестирования удалённого терминала, основанное на стандарте IEC 61850, обеспечивает удалённую подачу тестовых сигналов и стандартизированное взаимодействие с данными из нескольких источников.

В настоящее время несколько международных институтов проводят исследования, связанные с дистанционной калибровкой, легко организуемой с использованием компьютерных сетей. Это, например, Национальный институт стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology, NIST), Национальный институт измерений Японии (National Measurement Institute of Japan, NMIJ), Федеральный физико-технический институт (Federal Institute of Physics and Technology, FIPT), Национальная физическая лаборатория (National Physical Laboratory, NPL) Великобритании и многие другие.

Вопрос обеспечения метрологической прослеживаемости не остаётся без внимания. В работе [39] предложен метод частотно-временной калибровки, в которой в качестве калибратора использовался атомный рубидиевый стандарт частоты. Это позволило лучше решить проблему отслеживания времени на транспорте.

Важной сферой использования дистанционной калибровки является железнодорожный транспорт, где транспортировка эталонов связана с большими затратами [40] и рисками [41]. Иногда транспортировка эталонов вообще не используется, например, при калибровке вагонных весов с использованием весопроверочного вагона [42]. Условия эксплуатации СИ диктуют острую необходимость калибровки на месте без отправки в аккредитованные центры. С программируемыми СИ технические проблемы решаемы наиболее простыми способами. Но даже если средство измерения не является программируемым, как например путевой шаблон, в работе [43] найден изящный выход из положения и предложена система калибровки с наблюдением по видеокамерам. Отмечено, что для того чтобы откалибровать шаблоны так, как это принято сейчас, необходимо иметь подменный фонд, а каждый шаблон стоит примерно 250000 рублей в ценах 2023 года. Необходимо оплачивать командировочные расходы работнику и водителю, использовать автотранспорт, что, например, в условиях Крайнего Севера более чем накладно финансово. Хороший анализ и расчёты по сравнению затрат при классической и дистанционной калибровке выполнен авторами статьи [40]. Внедрение калибровки с удалённым доступом даёт значительную экономию средств, но конечно требуется признание результатов метрологической услуги.

Предлагается система дистанционной калибровки, основанная на глобальной системе позиционирования GPS [44]. Система реализует дистанционную калибровку источника постоянного напряжения и решает проблему дополнительных ошибок на месте калибровки. Значение напряжения на стороне заказчика и стороне калибровочной лаборатории дистанционно сравнивается по измерению отклонения во времени между импульсным сигналом, преобразованным из напряжения, и синхронным тактовым сигналом GPS. Измеряется разность напряжений между двумя сторонами и выполняется дистанционная калибровка источников постоянного напряжения. Расхождение между результатами дистанционной калибровки и традиционного метода находится в допустимых пределах и согласуются в оценке уровня точности.

В последние годы сфера применения дистанционной калибровки постепенно расширяется. Создана полностью автоматизированная система измерения сопротивления в среде LabVIEW, в которой не требуется низкая неопределённость [45]. Предложен

метод дистанционной калибровки ваттметра с хорошей точностью калибровки в случае типичных потерь мощности в сети [46] при условии, что характеристики среды постоянны в течение короткого периода калибровки. В статье [47] предложен метод калибровки серводвигателей для предотвращения выхода их из-под контроля, где с помощью ПЛИС можно быстро организовать обратную связь для управления калибровкой с функциями удалённого мониторинга и управления параметрами. Разработан измеритель коэффициента мощности с использованием Интернета вещей [48] и соответствующая платформа, напоминающая Интернет Измерений (IoM), которая может обеспечить повышение коэффициента мощности, удалённый мониторинг и регистрацию данных [49]. Разработана система калибровки промышленного термометра [50], стандарта давления [51, 52], многоспектральных датчиков, обычно используемых для дистанционного зондирования [53], видеокамер, исправляющих изображения [54, 55], тепловизионной системы [56], прецизионных спектрометров [57], спектральной аппаратуры [58], в том числе для беспилотных летательных аппаратов [59], датчиков качества воздуха [60], температуры и влажности окружающей среды [61] и даже устройств мониторинга теплиц [62].

## II. РЕШЕНИЕ ПО ДИСТАНЦИОННОЙ КАЛИБРОВКЕ

Устройство калибровки должно иметь интерфейс связи (например, USB, LAN или GPIB) для того, чтобы подключить его к компьютеру клиента, управляющего калибровкой. Приложение на стороне поставщика услуг по калибровке выполняет процедуру калибровки без помощи человека на стороне заказчика. Кроме того, оборудование на стороне клиента должно самостоятельно распознавать и производить автоматическую настройку доступных интерфейсов, связывающих СИ и эталоны. Оператор на стороне клиента должен лишь обеспечивать корректную связь между оборудованием, которое проходит процедуру калибровки, и эталонным оборудованием. Следовательно, исчезает необходимость в специализированных инженерах или техниках в лабораториях на предприятии-клиенте.

Во время внешнего осмотра в первую очередь проверяется маркировка, комплектность, отсутствие повреждений, исправность и чистота разъёмов. Калибруемое СИ подготавливается к использованию в соответствии с руководством по эксплуатации. Проводится проверка нормального функционирования прибора. Далее программно-аппаратный комплекс подключается к калибруемому СИ и Интернету через сетевой коммутатор.

В качестве примера рассмотрим схему дистанционной калибровки цифрового вольтметра (Рис. 1). Сотрудник лаборатории при помощи

программного обеспечения на своём персональном компьютере формирует необходимую информацию для генерации сигнала. Эта информация далее поступает на персональный компьютер, подключённый к аппаратному комплексу, в лаборатории заказчика. Генерация сигнала для калибруемого СИ происходит после поступления команды на аппаратный комплекс.

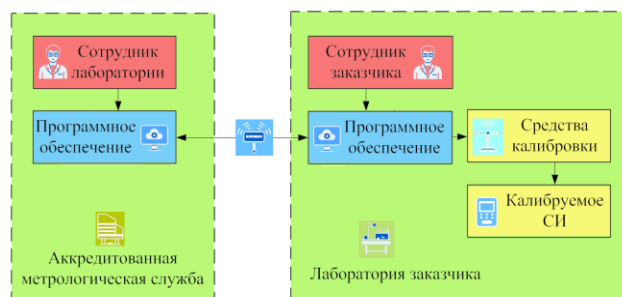


Рис. 1. Схема дистанционной калибровки

Программное обеспечение должно обеспечивать защиту от стороннего вмешательства: у сотрудника заказчика не должно быть возможности управлять средством калибровки. Для подключения программно-аппаратного комплекса к калибруемому СИ и сети требуется сотрудник с базовыми навыками работы с персональным компьютером. Он должен будет запустить программу комплекса и ввести туда IP-адреса компьютера с управляющей программой и калибруемого СИ.

В качестве аппаратного обеспечения был использован программно-аппаратный комплекс PXI компания National Instruments [63] с контроллером NI PXI-8102 и генератором сигналов NI PXI-5421 под управлением программного обеспечения LabVIEW [64]. Вольтметр получает сигнал от генератора, который подключён к контроллеру через шасси.

Управление генерацией эталонного сигнала производится через Ethernet с помощью управляющей программы (Рис. 2). Интерфейс управляющей программы представлен на Рис. 3. Для обеспечения последовательности операций используется структура «Flat Sequence». В первом блоке программа передаёт данные, необходимых для генерации сигнала – форма сигнала, амплитуда и частота до момента их получения. Во втором блоке программа ожидает формирования массива результатов измерений с PXI, который записывается в файл. Дистанционный контроль условий окружающей среды осуществляется с помощью термогигрометров с цифровым выходом и возможностью подключения к контроллеру: в третьем блоке программа записывает результаты измерений с подключённого к PXI датчика температуры и влажности HS-2000D для дистанционного контроля условий проведения калибровки. Программа в среде LabVIEW совместима с продуктами других изготовителей.

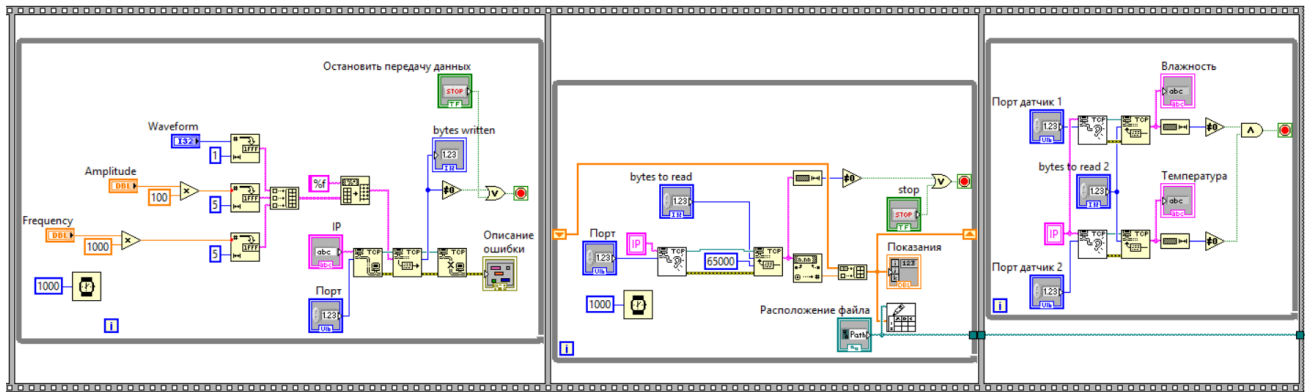


Рис. 2. Управляющая программа

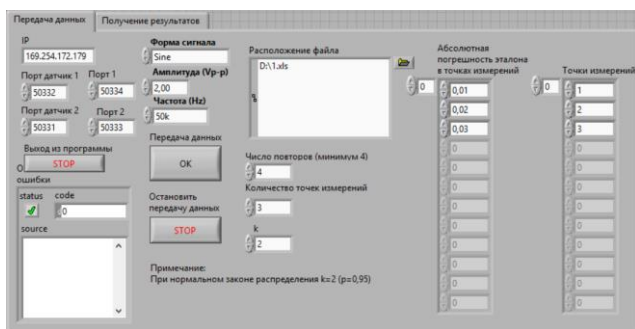


Рис. 3. Интерфейс управляющей программы

Пользователь вводит необходимые параметры генерируемого сигнала, IP-адрес аппаратной системы и порт TCP, затем кнопкой «Передача данных» запускает отправку данных. К этому моменту в лаборатории заказчика уже должны быть проведены все подготовительные операции: калибруемый СИ подключён к системе, соответствующая программа запущена, и сотрудник готов к работе. Сигнал поступает на калибруемое СИ, после чего сотрудник считывает показания, останавливает генерацию сигнала и отправляет показания сотруднику аккредитованной лаборатории. Поскольку программа дистанционной калибровки должна обеспечить невозможность изменения генерируемого сигнала сотрудником заказчика, во время процедуры калибровки сотрудник лаборатории имеет возможность только остановить генерацию сигнала.

Программа имеет простой интерфейс и ограниченный функционал. Это сделано с целью исключения возможности повлиять на процесс калибровки, поскольку управление процессом должно производиться исключительно управляющей программой. Сотруднику необходимо только выбрать используемые устройства.

На Рис. 4 представлен интерфейс программы. Все подключённые устройства PXI определяет автоматически. Чтобы управление генератором производил только сотрудник аккредитованной организации с компьютера, подключённого по Ethernet, функционал ограничен отправкой полученных

результатов измерений и остановкой генерации сигнала. В процессе калибровки владелец СИ будет вводить показания с калибруемого СИ и отправлять их управляющей программе. Горящий красный индикатор сообщает о наличии ошибки. Описание ошибки выводится на экран. При передаче данных управляющей программе загорится зелёный индикатор. В расширенных настройках имеется возможность изменить используемые в процессе обмена данными порты.

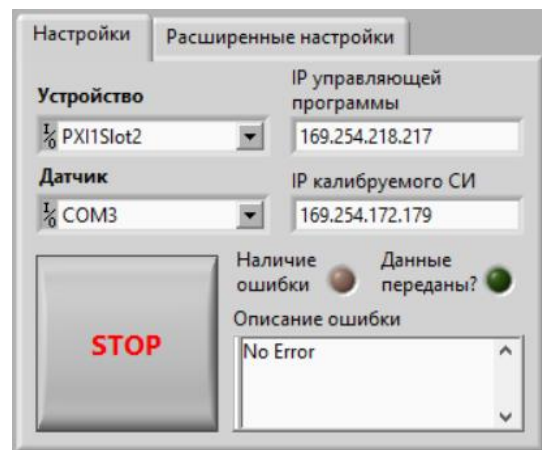


Рис. 4. Интерфейс программы на PXI

Рассмотренные операции повторяются для каждого измерения, необходимого для составления калибровочной таблицы. Список и количество контрольных точек должны быть приведены в методике калибровки. Информация о методах обработки результатов прямых многократных измерений приведена в ГОСТ Р 8.736-2011 [65]. Результаты записываются в протокол, затем оформляется сертификат о калибровке, подписанный электронной цифровой подписью.

На Рис. 5 показана упрощённая схема алгоритма без взаимодействия программы с аппаратной частью, таких, как инициализация, конфигурация, выключение и т.д. Жёлтым цветом обозначены действия, выполняемые управляющей программой, зелёным – управляемой, фиолетовым – калибруемым СИ.

Сформированный файл используется в процедуре расчёта неопределённости измерений, что связано с требованиями к содержанию методик калибровки [66]. В результате выполнения программы формируется файл с результатами измерений, температуры и влажности, при которых проводилась калибровка, даётся рассчитанная неопределённость и абсолютная погрешность измерений в заданных точках. Наиболее подробная информация о понятии «неопределённость» и о методах её расчёта приведена в JCGM 100:2008 [67].

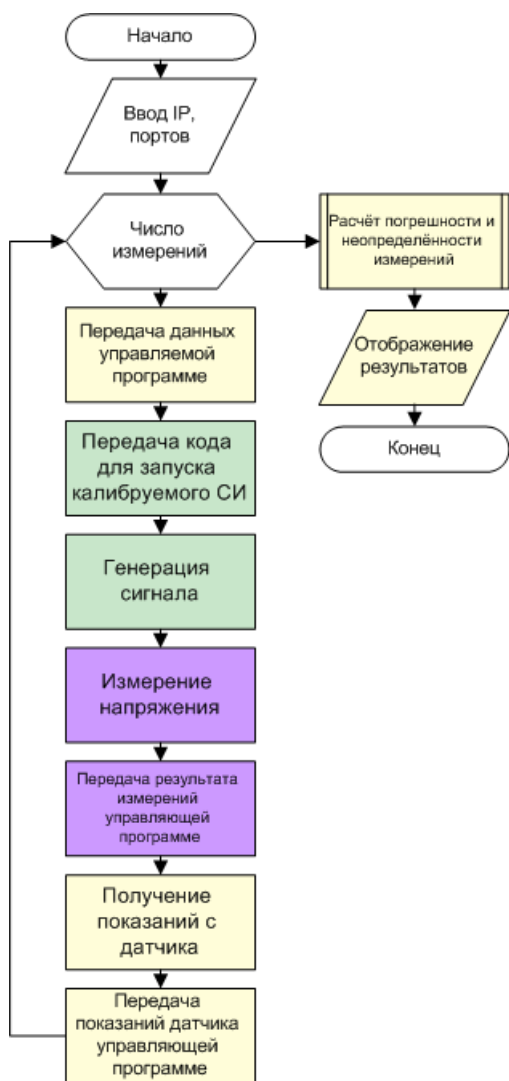


Рис. 5. Алгоритм калибровки

В идеальном случае дистанционная калибровка предполагает программирование как эталонного, так и калибруемого СИ. Тогда появится возможность полностью автоматизировать процесс калибровки путём управления двумя СИ одновременно, то есть синхронно во времени. Для этой цели существуют технические решения со встроенным или съёмным контроллером или контролем по GPS [44]. Контроллер будет управлять передачей эталонного сигнала на калибруемое СИ, а подключённое к контроллеру

калибруемое СИ будет передавать полученные результаты измерений в реальном времени [49].

### III. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Для проведения калибровки требуется использовать СИ утверждённого типа [68]. На сегодняшний день подавляющее большинство используемых СИ за редким исключением не имеют возможности передачи результатов измерений в реальном времени, из-за чего система требует ввод показания СИ вручную. В связи с этим невозможно использование данного способа в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [1]. Но вне сферы государственного регулирования данный способ прекрасно подходит. Именно к ней относятся калибровка, которая поименована только в одной статье закона [1].

При разработке методики калибровки требуется учитывать «Положение о российской системе калибровки» [69] и «Порядок организации деятельности российской системы калибровки» [70]. Данные документы были разработаны ФГУП «ВНИИМС», актуализируют нормативную базу системы калибровки и вводятся взамен документов, которые были введены в действие ранее.

Метрологическая сопоставимость результатов измерений обеспечивается благодаря использованию методик для проведения калибровки. Они содержат не только описание процедуры калибровки, но и требования к вспомогательному оборудованию, квалификации сотрудников, условиям проведения калибровки и формулы для расчёта метрологических характеристик. Необходимость в многообразии методик возникла в первую очередь из-за постоянного увеличения количества СИ с уникальными свойствами. Общие требования к содержанию и изложению методик калибровки приведены в ГОСТ Р 8.879-2014, на основании которого и была разработана методика дистанционной калибровки. Данный ГОСТ разработан на основе ГОСТ ИСО/МЭК 1725-2009 [71], который был заменен на ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [72]. Несмотря на конкретный перечень разделов, которые должна содержать методика, в пункте 4.3 указано, что в обоснованных случаях допускается объединять, добавлять или исключать разделы. Благодаря этому данные требования легко использовать для разработки методик калибровки.

В настоящее время калибровка СИ, не предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, является добровольной. Более того, выполняющие калибровку СИ юридические лица и предприниматели могут быть не аккредитованы в области обеспечения единства измерений. Используемые для калибровки СИ должны быть утверждённого типа и иметь действующие

свидетельства о поверке [68]. Данное условие всегда выполняется, поскольку крупные компании, занимающиеся производством программируемых СИ, утверждают их как тип. Требуется только проведение регулярной поверки СИ, обеспечивающих передачу размеров единиц средствам измерений.

При отсутствии аккредитации на проведение калибровки нет никаких подтверждений достоверности результатов. Из-за этого не удастся избежать проблем с заказчиками, которые не признают достоверность результатов калибровки без соответствующего документа, выданного аккредитованной лабораторией. Данные результаты нельзя признать при поверке СИ [73]. Также в ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 [72] указано, что признание результатов калибровки разными странами будет достигнуто в случае, если лаборатория аккредитована органами по аккредитации, признанными с подобными органами других стран. Данный ГОСТ относится к системе менеджмента качества, из-за чего использование результатов калибровки неаккредитованной лаборатории может быть недопустимо.

Одним из удачных примеров сферы применения дистанционной калибровки является образование [74, 75]. На сегодняшний день СИ образовательных учреждений не входят в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений. Приближённое к вандализации использование лабораторных СИ повышает погрешность и неопределённость до недопустимых значений, а регулярная закупка нового оборудования – это редкость в настоящее время. Использование технологии дистанционной калибровки позволит составить калибровочные таблицы, которые в дальнейшем будут использоваться при измерениях. Данное решение поможет уменьшить неопределённость СИ до значений, присущих использованному средству калибровки [76]. Таким образом, удастся избежать значительных расходов на обновление оборудования, при этом усовершенствовав аппаратное обеспечение организации.

На текущий момент в стране не существует полностью функционирующей программно-аппаратной системы дистанционной калибровки СИ и соответствующей методики. Проведение аккредитации лаборатории – это крайне длительное и затратное мероприятие, на которое ни одна организация не пойдёт без весомой причины. Поэтому дистанционная калибровка является выходом из положения. В первую очередь это связано со сложными требованиями к калибровочной лаборатории [70]. Прослеживаемость результатов измерений [10] до государственных эталонов решается использованием СИ утверждённого типа, а разработка новой методики калибровки является выполнимой задачей. На этапе разработки методики калибровки требуется учесть, в каких условиях СИ обычно используются, указав

соответствующие условия проведения калибровки. Проблему хранения средств калибровки можно решить на основе соглашения между предприятием и аккредитованной лабораторией: в первом случае хранение средства калибровки осуществляется в аккредитованной лаборатории, а при необходимости оно транспортируется к заказчику, во втором – необходимо наличие у заказчика специального помещения, обеспечивающего необходимые условия хранения эталона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расширение арсенала программируемых СИ открывает новые возможности для совершенствования способов передачи единиц электрических величин. Из-за высокого роста спроса на метрологические услуги, обусловленные повышением количества используемых СИ, аккредитованные центры не могут справляться с таким количеством СИ без усовершенствования действующей системы передачи единиц величин. На протяжении многих лет она не претерпевала существенных изменений, но теперь морально и технологически устарела [2–4]. Большое количество автоматических СИ, используемых на производстве, требует постоянного метрологического обслуживания, в том числе калибровки. Дистанционная калибровка является одним из наиболее перспективных направлений в автоматизации метрологических работ и предоставляет возможность своевременного мониторинга метрологических характеристик СИ, находит всё большее распространение вследствие снижения временных затрат на проведение метрологических работ, снижения их полной стоимости и решения ряда проблем, связанных с транспортировкой СИ, отправкой поверителей и рабочих эталонов. Метрологическое обеспечение предприятий в едином информационном пространстве, так называемом метрологическом облаке, должно обеспечивать постоянное повышение точности СИ для цифровой экономики, учитывать многократное возрастание количества СИ, возможность дистанционных поверок и калибровок с применением технологий цифровых двойников [21].

Будущие исследования должны быть направлены на повышение надёжности и адаптивности систем дистанционной калибровки для поддержания высокой точности, снижению рисков [41], особенно в сложных и динамичных условиях обеспечения устойчивого развития [40]. Следует изучить стандартизированные протоколы взаимодействия разнородных устройств и моделирование неопределённости для повышения надёжности системы. Следует также изучать опыт дистанционных поверок в одних отраслях для использования в других. Эти усилия могли бы способствовать развитию открытых, признанных законодательством и заинтересованными сторонами

калибровочных облачных экосистем с широким спектром приложений в точных измерениях и интеллектуальном мониторинге.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 26. – Ст. 3021.
- [2] Тауманов Р., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // Measurement. – 2010. – Vol. 43. – № 7. – Pp. 869-877.
- [3] Jun Z., Quan W., Xiwen C., Wenxuan W., Jian C., Qingjin R., Tao S. Modeling and network simulation of "Internet +" remote calibration method // Journal of Computer Applications. – 2019. – Vol. 39. – № 2. – Pp. 189-193. – JST Material Number: C2535A. – CODEN: JYIDU.
- [4] Данилов А.А. Направления совершенствования измерительных систем и их метрологического обеспечения // Измерительная техника. – 2023. – № 8. – С. 24-29. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29. – eLIBRARY ID: 54499744. – EDN: CVDWFO.
- [5] Cristaldi L., Ferrero A., Salicone S. A distributed system for electric power quality measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51. – № 4. – Pp. 776-781.
- [6] Kutuzov D., Osovsky A., Stukach O., Starov D. Modeling of IIoT Traffic Processing by Intra-Chip NoC Routers of 5G/6G Networks / 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 13-15 May 2021, Kazan, Russia. – eLIBRARY ID: 46825100. – DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874.
- [7] Osovsky A., Kutuzov D., Starov D., Bakalaeva R., Stukach O. Comparison of Machine Learning Methods for IoT and IIoT Traffic Prediction / International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – 2024. – October 02-03, Sochi, Russian Federation. – Doi: 10.1109/SED63331.2024.10741069.
- [8] Моделирование обслуживания трафика маршрутизаторами технологии Интернета вещей (IoT) / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N 2019661408. – Д.В. Кузузов, А.В. Осовский, О.В. Стукач, Д.В. Старов, Е.А. Моторина. – Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Астраханский государственный технический университет". – Заявка N 2019660265 от 19 августа 2019 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28 августа 2019 г. – eLIBRARY ID: 40880119.
- [9] Dimitrijevic B.R., Simic M.M. Remote wireless calibration of equipment in the distributed measurement systems / Proceedings of Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIS-2007. – Serbia, September 26-28, 2007. – Pp. 479-482.
- [10] Ершов И.А., Аймагамбетова Р.Ж., Стукач О.В. Технология блокчейн в обеспечении метрологической прослеживаемости // XI Междунар. IEEE научно-технич. конф. "Динамика систем, механизмов и машин". – Омск, Омский государственный технический университет, 14-16 ноября 2017. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 57-61. – Doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-57-61. – ISSN: 2310-9793. – eLIBRARY ID: 30624963).
- [11] Aimagmbetova R.Zh., Ershov I.A., Stukach O.V. Towards the problem of measurement traceability in the Internet of measurement concept / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Conference, Omsk, 14-16 Nov. 2017. – ISBN: 978-1-5386-1820-2. – Doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239425. – eLIBRARY ID: 35541726.
- [12] Воронова А.А., Супчинский О.П. Зарубежный и отечественный опыт внедрения дистанционной поверки и калибровки средств измерений / Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте. – Материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск, Омский государственный университет путей сообщения, 27-28 октября 2022. – С. 137-146. – eLIBRARY ID: 49789520. – EDN: DTWDOG.
- [13] Adibi M.M., Thome D.K. Remote Measurement Calibration // IEEE Transactions on Power Systems. – 1986. – Vol. PWRS-1. – No. 2. – May. – Pp. 194-199.
- [14] Dudley R.A., Ridler N.M. Internet calibration direct to national measurement standards for automatic network analyzers // Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2001. – Budapest, May 21-23, 2001. – Pp. 255-258.
- [15] O'Dowd R., Maxwell D., Farrell T., Dunne J. Remote characterization of optoelectronic devices over the internet / Proceedings of 4th Optical Fibre Measurement Conference. – Teddington, UK, October 24-27, 1997. – Pp. 155-158.
- [16] Baca L.B., Duda L., Walker R., Oldham N., Parker M. Internet-Based Calibration of a Multifunction Calibrator // National Conference of Standards Laboratories. – Toronto, Canada, April 12-14, 2000. – Pp. 10-12.
- [17] Панько С.П., Мишуков А.В. Технология метрологической аттестации в дистанционном режиме // Законодательная и прикладная метрология. – 2010. – № 3 (109). – С. 48-49.
- [18] Jia-Lun W., Chang P.C., Shinn-Yan L., Huang-Tien L., Chia-Shu L. Remote time and frequency calibration system for telecommunication synchronization applications / Network Operations and Management Symposium APNOMS-2011. – Taipei, September 21-23, 2011. – Pp. 1-6.
- [19] Ершов И.А. Реализация программы «Цифровая экономика» в системе обеспечения единства измерений // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 1(23). – С. 105-109.
- [20] Попов А. А. Цифровизация обеспечения метрологической прослеживаемости средств измерений и стандартных образцов через облачные технологии: современное состояние и перспективы развития // Эталон. Стандартные образцы. – 2022. – Т. 18. – № 3. – С. 57-70. – eLIBRARY ID: 50003329. – EDN: EIOJVD. – Doi: 10.20915/2077-1177-2022-18-3-57-70.
- [21] Брусакова И.А. Цифровые двойники измерительных процедур // Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем / Сб. докладов Межд. конф. С.-Петербург, 15-17 марта 2022. – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). – С. 70-72. – eLIBRARY ID: 48116498. – EDN: CELTBI.
- [22] Xu-Li W., Yu-Xiao Z. Exploit of Remote Monitoring and Control System for Bell Prover Device Based on Virtual Instrument // Proceedings of International Symposium on Computational Intelligence and Design ISCID-2012. – Hangzhou, October 28-29, 2012. – Pp. 178-181.
- [23] Толочко Т.К., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Дистанционная калибровка средств измерений // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2008. – № 1 (30). – С. 8-43.
- [24] Jurčević M., Hegeduš H., Golub M. Generic System for Remote Testing and Calibration of Measuring Instruments: Security Architecture // Measurement science review. – 2010. – Vol. 10. – № 2. – Pp. 50-55.
- [25] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote Calibration Using Mobile, Multiagent Technology // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – Pp. 24-30.
- [26] Iwama T., Kurihara N., Imae M., Suzuyama T., Kotake N., Otsuka A. Frequency Standards Calibration System and Remote Calibration System // National Institute of Information and Communications Technology. – 2003. – Vol. 54. – № 1-2. – P. 195-204.
- [27] Bertocco M., Ferraris F., Offelli C., Parvis M. A client-server architecture for distributed measurement systems // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1998. – Vol. 47. – № 5. – Pp. 1143-1148.

- [28] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote calibration using mobile, multiagent technology // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – February. – Pp. 24-30. – Doi: 10.1109/TIM.2004.838139.
- [29] Wang Q., Li H., Wang H., Zhang J., Fu J. A Remote Calibration Device Using Edge Intelligence // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – № 1. – P. 322. – Doi: 10.3390/s22010322.
- [30] Wang Q., Zhang J., Lei M., Li H., Peng K., Hu M. Toward Wide Area Remote Sensor Calibrations: Applications and Approaches // *IEEE Sensors Journal*. – 2024. – Vol. 24. – № 6. – Pp. 8991-9001. – Doi: 10.1109/JSEN.2024.3352253.
- [31] Zhao Q., Qi X., Wang Q., Wang B. Establishment of Electrical Equipment on Site Remote Calibration System / 2024 IEEE China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). – Wuhan, China, 06-08 November 2024. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/CIYCEE63099.2024.10846498.
- [32] Amicone D., Bernieri A., Ferrigno L., Laracca M. A smart add-on device for the remote calibration of electrical energy meters // 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Singapore, 05-07 May 2009. – Pp. 1599-1604. – Doi: 10.1109/IMTC.2009.5168710.
- [33] Tian W., Wang X., Yang Z., Li Q., Sun L., Wang D., Wang Z. A Remote Automatic Detection and Calibration Device for AC Watt-hour Meters // *Journal of Physics. Conf. Series*. – 2021. – Vol. 2005. – P. 012226.
- [34] Amicone D., Bernieri A., Betta G., Ferrigno L., Laracca M. On the Remote Calibration of Electrical Energy Meters / *Proc. IMEKO TC4*. – Firenze, Italy. – 2008. – <https://www.imeko.info/publications/tc4-2008/IMEKO-TC4-2008-165.pdf>
- [35] Zha Z., Ge H., Zou C., Long F., He X., Wu G., Dong C., Deng T., Xu J. Synchronous Remote Calibration for Electricity Meters: Application and Optimization // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – № 3. – P. 1259. – Doi: 10.3390/app15031259.
- [36] Wang Q., Fu J., Han X., Yin X., Zhang J., Qi X., Zhang X. Design and Implementation of a Novel Intelligent Remote Calibration System Based on Edge Intelligence // *Symmetry*. – 2025. – Vol. 17. – № 9. – P. 1434. – Doi: 10.3390/sym17091434.
- [37] Verhelst B., Rens S., Rens J., Knockaert J., Desmet J. On the Remote Calibration of Instrumentation Transformers: Influence of Temperature // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 12. – P. 4744. – Doi: 10.3390/en16124744.
- [38] Liu M., Su X., Li H., Liao H., Mo S. Remote Calibration Technology Solution for Conventional Substation Secondary Systems / 2025 5th International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE). – Guangzhou, China, 14-16 November 2025. – Pp. 851-855. – Doi: 10.1109/ICNEPE67923.2025.11384217.
- [39] Han K., Ding, C., Yu, L., Chen, Q. Research on the Application of Time and Frequency Remote Calibration Based on NIMDO // *Metrology Science and Technology*. – 2021. – Vol. 65. – Pp. 9-12.
- [40] Дривольская Н.А., Нуриев А.Г., Веледеева К.А., Денисова Е.Д. Метрологические средства измерений как элемент устойчивого развития железнодорожной отрасли // *Транспортное дело России*. – 2023. – № 6. – С. 378-380. – DOI: 10.52375/20728689\_2023\_6\_378. – eLIBRARY ID: 60016282. – EDN: QGJKZ.
- [41] Толмачев В.В. Оценка и управление рисками эталонов, участвующих в дистанционной поверке // *Законодательная и прикладная метрология*. – 2019. – № 2(159). – С. 35-38. – ISSN: 2782-5418. – eLIBRARY ID: 37711096. – EDN: PZCUUC.
- [42] Чистяков Э.Ю., Павлов А.Ю., Нуриев А.Г., Афанасьев В.В., Гренадер Я.А. Дистанционная калибровка динамических вагонных весов // *Бюллетень результатов научных исследований*. – 2024. – № 4. – С. 103-111. – DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-103-111. – eLIBRARY ID: 78869045. – EDN: PVDKHN.
- [43] Чистяков Э.Ю., Павлов А.Ю., Гренадер Я.А., Нуриев А.Г. Дистанционная калибровка шаблонов в районах крайнего севера // *Известия петербургского университета путей сообщения*. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 133-141. – DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-133-141. – eLIBRARY ID: 50389719. – EDN: XFHDDJ.
- [44] Fang L., Duan S., Li Y., Ma X., Lan K. A New Model for Remote Calibration of Voltage Source Based on GPS Common-View Method // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – Vol. 72. – Pp. 1-9. – Art 5501309. – Doi: 10.1109/TIM.2023.3239920.
- [45] Helmy M., Raouf A., Ali Rasha S.M., Gadelrab M.S. Construction and remote calibration of an automated resistance measuring system // *MAPAN*. – 2011. – Vol. 26. – Pp. 125-131. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s12647-011-0013-6>.
- [46] Nakutis Z., Saunoris M., Ramanauskas R., Daunoras V. A method for remote wattmeter calibration / 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Turin, Italy, 22-25 May 2017. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969766.
- [47] Jeang Y.L., Chen L.B., Huang C.P., Hsu Y.H., Yeh M.Y., Yang K.M. Design of FPGA-based adaptive remote calibration control system / 2003 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology (FPT). – Tokyo, Japan, 17 December 2003. – Pp. 299-302. – IEEE Cat. No.03EX798.
- [48] Gunawan T.S., Anuar M.H., Mira K., Zuriati J. Design of power factor meter using internet of things for power factor improvement remote monitoring and data logging // *Indonesia Journal of Electronics Engineering and Computer Science*. – 2020. – Vol. 17. – Pp. 700-709.
- [49] Ершов И.А. Стукач О.В. Архитектура системы дистанционной калибровки как часть концепции Internet of Measurements (IoM) / *Современные технологии поддержки принятия решений в экономике: сб. тр. III Всеросс. науч.-практ. конф., 24-25 ноября 2016 г. Юрга. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 140-142. – eLIBRARY ID: 28159635.*
- [50] Chen L., Shao Y., Fu Y., Xie M. A remote calibration system for industrial thermometers / *Proceedings of Industrial Electronics and Applications ICIEA-2013*. – Melbourne, June 19-21, 2013. – Pp. 1574-1577.
- [51] Kobata T., Kojima M., Kajikawa H. Development of remote calibration system for pressure standard // *Measurement*. – 2012. – Vol. 45. – Pp. 2482-2485. – Doi: 10.1016/j.measurement.2011.10.048.
- [52] Канаев С.А., Москаленко О.В., Хваткова А.А. Разработка автоматизированной системы для проверки и калибровки средств измерения давления // *Приборы*. – 2008. – № 6. – С. 40-42.
- [53] Mamaghani B., Salvaggio C. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – № 20. – P. 4453. – Doi: 10.3390/s19204453.
- [54] Conlin M.P., Adams P.N., Wilkinson B., Dusek G., Palmsten M.L., Brown J.A. SurfRCaT: A tool for remote calibration of pre-existing coastal cameras to enable their use as quantitative coastal monitoring tools // *SoftwareX*. – Vol. 12. – July-December 2020. – Art. 100584. – doi: 10.1016/j.softx.2020.100584.
- [55] Simarro G., Ribas F., Blvarez A., Guillin J., Chic T., Orfila A. ULISES: An open source code for extrinsic calibrations and planview generations in coastal video monitoring systems // *Journal Coast Res*. – 2017. – Vol. 335. – № 5. – P. 1217-27. – Doi: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00022.1.
- [56] Долматов А.В., Ермаков К.А., Лавриков В.В. Комплекс автоматизированной калибровки тепловизионной системы на базе Matlab // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2012. – № 2. – С. 59-63.
- [57] Dai T., De Salvo A., Diehl E., Di Mattia A., Kennedy J., McKee S., Orestano D., Pasqualucci E., Petrucci F., Rauscher F. The ATLAS MDT remote calibration centers // *Journal of Physics: Conference Series*, 2010. – Vol. 219. – Online Computing. – P. 022028. – Doi: 10.1088/1742-6596/219/2/022028.
- [58] Комаров Н.М., Кудрявцев А.В., Парышкин Ю.А. Технические решения по системе управления затвора первого зеркала и

- системе дистанционной калибровки диагностики "активная спектроскопия" / Физико-технические интеллектуальные системы (ФТИС-2024). – III Научно-практическая конференция. – Тамбов, 2024. – С. 37. – eLIBRARY ID: 62679137. – EDN: LOTHJN.
- [59] Асадов Х.Г., Алиева А.Д., Гумбатов Д.А. Вопросы радиометрической калибровки устройств дистанционного зондирования, установленных на борту БПЛА // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2024. – Т. 29. – № 2. – С. 41-50. – eLIBRARY ID: 65640308. – EDN: MOKDGX . – DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-2-41-50.
- [60] Vito S.D., Elia G.D., Ferlito S., Esposito E., Piantadosi G., Francia G.D. Remote Calibration strategies for Low Cost Air Quality Multisensors: a performance comparison / 2024 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN). – Grapevine, USA, 12-15 May 2024. – Pp. 1-4. – Doi: 10.1109/ISOEN61239.2024.10556107.
- [61] Xiujie Y., Yan C., Rong L., Yanling L., Yixi L. Development of a remote calibration system for monitoring ambient temperature and humidity // Chinese Institute of Testing Technology. – Chengdu, Sichuan, China, 610021. – Pp. 186-190. – DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2024.06.029.
- [62] Mellit A., Benghanem M., Herrak O., Messalaoui A. Design of a Novel Remote Monitoring System for Smart Greenhouses Using the Internet of Things and Deep Convolutional Neural Networks // Energies. – 2021. – Vol. 14. – Art. 5045.
- [63] Головастов А.А. Стандарт – PXI технология и оборудование для построения контрольно-измерительных систем // Современные технологии автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 132-138.
- [64] Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 / Под. ред. Бутырина П.А. – М.: ДМК Пресс. – 2005. – 264 С.
- [65] ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ. – 2013.
- [66] ГОСТ Р 8.879-2014 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – М.: Стандартинформ. – 2015.
- [67] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – JCGM, 2008. – 120 p.
- [68] ПР 50.2.016-94 ГСИ. Требования к выполнению калибровочных работ. – М.: Госстандарт России. – 1995.
- [69] РД РСК 01-2014 Положение о российской системе калибровки. – Сборник руководящих документов Российской системы калибровки. – М.: АНО «РСК-Консалтинг». – 2014.
- [70] РД РСК 02-2014 Порядок организации деятельности российской системы калибровки. – Сборник руководящих документов Российской системы калибровки. – М.: АНО «РСК-Консалтинг». – 2014.
- [71] ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Стандартинформ. – 2018.
- [72] ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Стандартинформ. – 2019.
- [73] Постановление Правительства РФ № 311 от 2 апреля 2015 года «Об утверждении Положения о признании результатов калибровки при поверке средств измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2015. – № 15. – Ст. 2272.
- [74] Spoedler H.J.W. Virtual instruments and virtual environments // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 1999. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 14-19.
- [75] Cristaldi L., Ferrero A., Piuri V. Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: What is really useful, innovative, and technically sound // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1999. – Vol. 42. – № 3. – Pp. 20-27.
- [76] De Capua C., Liccardo A., Morello R. On the web service-based remote didactical laboratory: further developments and improvements / Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2005. – Canada, Ottawa, May 16-19, 2005. – Pp. 1692-1696.

### Информация об авторах

Стукач Олег Владимирович, д.т.н., профессор кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, профессор департамента Электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, e-mail: [tomsk@ieee.org](mailto:tomsk@ieee.org), ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Ершов Иван Анатольевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, e-mail: [ershov@corp.nstu.ru](mailto:ershov@corp.nstu.ru), ORCID: 0000-0003-1524-6508.

Improvement of calibration technology for electrical measurements based on modular devices in the concept of Internet of Measurement (IoM)

Oleg Stukach <sup>1,2</sup>, Ivan Ershov <sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research University Higher School of Economics  
<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University

**Abstract** – The growth in the amount of programming measuring instruments and the demand for metrological services open the new possibilities to the development of a remote calibration concept, which significantly reduces financial, logistical costs, and working hours of a calibration laboratory employee, increases the efficiency of metrological services and, ultimately, significantly improves the system of transfer of physical units. The introduction of the remote calibration system is important for large enterprises with geographically distributed branches to ensure the fulfillment of the equipment calibration schedule. The main feature of the remote calibration is the process automation of and the network control of measuring instruments. A description of the remote calibration hardware and software via Ethernet PXI-based modular devices within LabVIEW software of National Instruments is given. The simplicity of the interface of the control programs for various measuring instruments allows to use the designed system with other measuring instruments without significant changes in the software. The key features of the procedure for the remote calibration of programmable voltmeters are described. The results were used to develop a methodology for remote calibration of programming voltmeters. Based on the current laws and

regulations, some recommendations are provided for the practical use of the proposed system.

**Keywords** – measuring instrument, verification, software and hardware complex, calibration methodology, intelligent information and measurement system, remote calibration, legislative metrology, regulatory framework, electrical quantities, intelligent sensor, Internet of Measurement, IoM, LabVIEW, measurement, measuring procedure, metrological traceability, measure of metrological reliability, uncertainty of measurements, Arshin, standard transportation, digital twin, metrology 4.0, metrological cloud, digital metrology, digitalization.

## REFERENCES

- [1] Federalnyi zakon № 102-FZ ot 26.06.2008 "Ob obespechenii edinstva izmerenii" // Sobranie zakonodatelstva RF. – 2008. – № 26. – St. 3021. (in Russian)
- [2] Taymanov R., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // Measurement. – 2010. – Vol. 43. – № 7. – Pp. 869-877.
- [3] Jun Z., Quan W., Xiwen C., Wenxuan W., Jian C., Qingjin R., Tao S. Modeling and network simulation of "Internet +" remote calibration method // Journal of Computer Applications. – 2019. – Vol. 39. – № 2. – Pp. 189-193. – JST Material Number: C2535A. – CODEN: JYIUDU.
- [4] Danilov A.A. Areas for improvement of measuring systems and their metrological support // Measurement Techniques. – 2023. – Vol. 66. – No 8. – С. 570-575. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29. – eLIBRARY ID: 54499744. – EDN: CVDWFO.
- [5] Cristaldi L., Ferrero A., Salicone S. A distributed system for electric power quality measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51. – № 4. – Pp. 776-781.
- [6] Kutuzov D., Osovsky A., Stukach O., Starov D. Modeling of IIoT Traffic Processing by Intra-Chip NoC Routers of 5G/6G Networks / 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 13-15 May 2021, Kazan, Russia. – eLIBRARY ID: 46825100. – DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874.
- [7] Osovsky A., Kutuzov D., Starov D., Bakalaeva R., Stukach O. Comparison of Machine Learning Methods for IoT and IIoT Traffic Prediction / International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – 2024. – October 02-03, Sochi, Russian Federation. – Doi: 10.1109/SED63331.2024.10741069.
- [8] Kutuzov D.V., Osovsky A.V., Stukach O.V., Starov D.V., Motorina E.A. Modeling of traffic routing by IoT / Appl. N 2019660265, August 19, 2019. – Software Reg. N 2019661408, August 28, 2019. – eLIBRARY ID: 40880119 (in Russian).
- [9] Dimitrijevic B.R., Simic M.M. Remote wireless calibration of equipment in the distributed measurement systems / Proceedings of Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIKS-2007. – Serbia, September 26-28, 2007. – Pp. 479-482.
- [10] Ershov I.A., Aimagambetova R.Zh., Stukach O.V. The blockchain technology in the metrology traceability / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2017. – Omsk State Technical University. – Omsk, Russian Federation, 2017. – Vol. 5. – No. 4. – Pp. 57-61. – DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-57-61. – ISSN: 2310-9793. – eLIBRARY ID: 30624963 (in Russian).
- [11] Aimagambetova R.Zh., Ershov I.A., Stukach O.V. Towards the problem of measurement traceability in the Internet of measurement concept / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Conference, Omsk, 14-16 Nov. 2017. – ISBN: 978-1-5386-1820-2. – Doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239425. – eLIBRARY ID: 35541726.
- [12] Voronova A.A., Supchinsky O.P. Foreign and domestic experience in introducing remote verification and calibration measurement instruments / Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport. – Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. – Omsk, Omsk State Transport University, October 27-28, 2022. – Pp. 137-146. – eLIBRARY ID: 49789520. – EDN: DTWDOG (in Russian).
- [13] Adibi M.M., Thome D.K. Remote Measurement Calibration // IEEE Transactions on Power Systems. – 1986. – Vol. PWRS-1. – No. 2. – May. – Pp. 194-199.
- [14] Dudley R.A., Ridler N.M. Internet calibration direct to national measurement standards for automatic network analyzers // Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2001. – Budapest, May 21-23, 2001. – Pp. 255-258.
- [15] O'Dowd R., Maxwell D., Farrell T., Dunne J. Remote characterization of optoelectronic devices over the internet / Proceedings of 4th Optical Fibre Measurement Conference. – Teddington, UK, October 24-27, 1997. – Pp. 155-158.
- [16] Baca L.B., Duda L., Walker R., Oldham N., Parker M. Internet-Based Calibration of a Multifunction Calibrator // National Conference of Standards Laboratories. – Toronto, Canada, April 12-14, 2000. – Pp. 10-12.
- [17] Panko S.P., Mishurov A.V. Technology of metrological attestation in remote mode // Legislative and applied metrology. – 2010. – № 3 (109). – Pp. 48-49 (in Russian).
- [18] Jia-Lun W., Chang P.C., Shinn-Yan L., Huang-Tien L., Chia-Shu L. Remote time and frequency calibration system for telecommunication synchronization applications / Network Operations and Management Symposium APNOMS-2011. – Taipei, September 21-23, 2011. – Pp. 1-6.
- [19] Ershov I.A. Implementation of the "Digital Economics" program in the state measurement unity transfer system // Automatics & software engineering. – 2018. – № 1(23). – pp. 105-109 (in Russian).
- [20] Popov A.A. Digitalization of ensuring metrological traceability of measuring instruments and reference materials through cloud-based technologies: current state and development prospects // Standard devices. – 2022. – Vol. 18. – № 3. – Pp. 57-70. – eLIBRARY ID: 50003329. – EDN: EIOJVD. – Doi: 10.20915/2077-1177-2022-18-3-57-70 (in Russian).
- [21] Brusakova I. A. Digital twins of measurement procedures // Design and quality assurance of information processes and systems / Proceedings of the International Conference, St.-Petersburg, March 15-17, 2022. – V.I. Ulyanov (Lenin) St.-Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg. – Pp. 70-72. – eLIBRARY ID: 48116498. – EDN: CELTBI (in Russian).
- [22] Xu-Li W., Yu-Xiao Z. Exploit of Remote Monitoring and Control System for Bell Prover Device Based on Virtual Instrument // Proceedings of International Symposium on Computational Intelligence and Design ISCID-2012. – Hangzhou, October 28-29, 2012. – Pp. 178-181.
- [23] Tolochko T.K., Gusinsky A.V., Kostrikin A.M. Remote calibration of measuring instruments // Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. – 2008. – № 1 (30). – Pp. 38-43 (in Russian).
- [24] Jurčević M., Hegeduš H., Golub M. Generic System for Remote Testing and Calibration of Measuring Instruments: Security Architecture // Measurement science review. – 2010. – Vol. 10. – № 2. – Pp. 50-55.
- [25] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote Calibration Using Mobile, Multiagent Technology // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – Pp. 24-30.
- [26] Iwama T., Kurihara N., Imae M., Suzuyama T., Kotake N., Otsuka A. Frequency Standards Calibration System and Remote Calibration System // National Institute of Information and Communications Technology. – 2003. – Vol. 54. – № 1-2. – P. 195-204.
- [27] Bertocco M., Ferraris F., Offelli C., Parvis M. A client-server architecture for distributed measurement systems // IEEE

- Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1998. – Vol. 47. – № 5. – Pp. 1143-1148.
- [28] Albu M.M., Ferrero A., Mihai F., Salicone S. Remote calibration using mobile, multiagent technology // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2005. – Vol. 54. – № 1. – February. – Pp. 24-30. – Doi: 10.1109/TIM.2004.838139.
- [29] Wang Q., Li H., Wang H., Zhang J., Fu J. A Remote Calibration Device Using Edge Intelligence // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – № 1. – P. 322. – Doi: 10.3390/s22010322.
- [30] Wang Q., Zhang J., Lei M., Li H., Peng K., Hu M. Toward Wide Area Remote Sensor Calibrations: Applications and Approaches // *IEEE Sensors Journal*. – 2024. – Vol. 24. – № 6. – Pp. 8991-9001. – Doi: 10.1109/JSEN.2024.3352253.
- [31] Zhao Q., Qi X., Wang Q., Wang B. Establishment of Electrical Equipment on Site Remote Calibration System / 2024 IEEE China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). – Wuhan, China, 06-08 November 2024. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/CIYCEE63099.2024.10846498.
- [32] Amicone D., Bernieri A., Ferrigno L., Laracca M. A smart add-on device for the remote calibration of electrical energy meters // 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Singapore, 05-07 May 2009. – Pp. 1599-1604. – Doi: 10.1109/IMTC.2009.5168710.
- [33] Tian W., Wang X., Yang Z., Li Q., Sun L., Wang D., Wang Z. A Remote Automatic Detection and Calibration Device for AC Watt-hour Meters // *Journal of Physics. Conf. Series*. – 2021. – Vol. 2005. – P. 012226.
- [34] Amicone D., Bernieri A., Betta G., Ferrigno L., Laracca M. On the Remote Calibration of Electrical Energy Meters / *Proc. IMEKO TC4*. – Firenze, Italy. – 2008. – <https://www.imeko.info/publications/tc4-2008/IMEKO-TC4-2008-165.pdf>
- [35] Zha Z., Ge H., Zou C., Long F., He X., Wu G., Dong C., Deng T., Xu J. Synchronous Remote Calibration for Electricity Meters: Application and Optimization // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – № 3. – P. 1259. – Doi: 10.3390/app15031259.
- [36] Wang Q., Fu J., Han X., Yin X., Zhang J., Qi X., Zhang X. Design and Implementation of a Novel Intelligent Remote Calibration System Based on Edge Intelligence // *Symmetry*. – 2025. – Vol. 17. – № 9. – P. 1434. – Doi: 10.3390/sym17091434.
- [37] Verhelst B., Rens S., Rens J., Knockaert J., Desmet J. On the Remote Calibration of Instrumentation Transformers: Influence of Temperature // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 12. – P. 4744. – Doi: 10.3390/en16124744.
- [38] Liu M., Su X., Li H., Liao H., Mo S. Remote Calibration Technology Solution for Conventional Substation Secondary Systems / 2025 5th International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE). – Guangzhou, China, 14-16 November 2025. – Pp. 851-855. – Doi: 10.1109/ICNEPE67923.2025.11384217.
- [39] Han K., Ding, C., Yu, L., Chen, Q. Research on the Application of Time and Frequency Remote Calibration Based on NIMDO // *Metrology Science and Technology*. – 2021. – Vol. 65. – Pp. 9-12.
- [40] Drivolskaya N.A., Nuriev A.G., Vedeleva K.A., Denisova E.D. Metrological measuring instruments as an element of sustainable development of the railway industry // *Transportnoe delo Rossii*. – 2023. – № 6. – Pp. 378-380. – DOI: 10.52375/20728689\_2023\_6\_378. – eLIBRARY ID: 60016282. – EDN: QGJIKZ (in Russian).
- [41] Tolmachev V.V. Risk assessment and risk management of measurement standards in remote verification // *Legislative and applied metrology*. – 2019. – № 2(159). – Pp. 35-38. – ISSN: 2782-5418. – eLibrary ID: 37711096. – EDN: PZCUUC (in Russian).
- [42] Chistyakov E.Yu., Pavlov A.Yu., Nuriev A.G., Afanas'ev V.V., Grenader Ya.A. Remote calibration of dynamic wagon scales // *Bulletin of scientific research results*. – 2024. – No. 4. – Pp. 103-111. – DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-103-111. – eLibrary ID: 78869045. – EDN: PVDKJH (in Russian).
- [43] Chistyakov E.Yu., Pavlov A.Yu., Grenader Ya.A., Nuriev A.G. Remote calibration of templates in the Far North districts // *Izvestiya peterburgskogo universiteta putei soobsheniya*. – 2023. – Vol. 20. – No. 1. – Pp. 133-141. – DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-133-141. – eLibrary ID: 50389719. – EDN: XFHDDJ (in Russian).
- [44] Fang L., Duan S., Li Y., Ma X., Lan K. A New Model for Remote Calibration of Voltage Source Based on GPS Common-View Method // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – Vol. 72. – Pp. 1-9. – Art 5501309. – Doi: 10.1109/TIM.2023.3239920.
- [45] Helmy M., Raouf A., Ali Rasha S.M., Gadelrab M.S. Construction and remote calibration of an automated resistance measuring system // *MAPAN*. – 2011. – Vol. 26. – Pp. 125-131. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s12647-011-0013-6>.
- [46] Nakutis Z., Saunoris M., Ramanauskas R., Daunoras V. A method for remote wattmeter calibration / 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Turin, Italy, 22-25 May 2017. – Pp. 1-5. – Doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969766.
- [47] Jeang Y.L., Chen L.B., Huang C.P., Hsu Y.H., Yeh M.Y., Yang K.M. Design of FPGA-based adaptive remote calibration control system / 2003 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology (FPT). – Tokyo, Japan, 17 December 2003. – Pp. 299-302. – IEEE Cat. No.03EX798.
- [48] Gunawan T.S., Anuar M.H., Mira K., Zuriati J. Design of power factor meter using internet of things for power factor improvement remote monitoring and data logging // *Indonesia Journal of Electronics Engineering and Computer Science*. – 2020. – Vol. 17. – Pp. 700-709.
- [49] Ershov I.A., Stukach O.V. Arhitektura sistemy distancionnoj kalibrovki kak chast koncepcii Internet of Measurements (IoM) / *Sovremennye tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenij v ekonomike: sbornik trudov III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. – 24-25 November 2016, Yurga. – Tomsk: TPU. – 2016. – pp. 140-142 (in Russian).
- [50] Chen L., Shao Y., Fu Y., Xie M. A remote calibration system for industrial thermometers / *Proceedings of Industrial Electronics and Applications ICIEA-2013*. – Melbourne, June 19-21, 2013. – Pp. 1574-1577.
- [51] Kobata T., Kojima M., Kajikawa H. Development of remote calibration system for pressure standard // *Measurement*. – 2012. – Vol. 45. – Pp. 2482-2485. – Doi: 10.1016/j.measurement.2011.10.048.
- [52] Kanaev S.A., Moskalenko O.V., Khvatkova A.A. Development of an automated system for verification and calibration of pressure measuring instruments // *Pribori*. – 2008. – No 6. – Pp. 40-42 (in Russian).
- [53] Mamaghani B., Salvaggio C. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – № 20. – P. 4453. – Doi: 10.3390/s19204453.
- [54] Conlin M.P., Adams P.N., Wilkinson B., Dusek G., Palmsten M.L., Brown J.A. SurfRCaT: A tool for remote calibration of pre-existing coastal cameras to enable their use as quantitative coastal monitoring tools // *SoftwareX*. – Vol. 12. – July-December 2020. – Art. 100584. – doi: 10.1016/j.softx.2020.100584.
- [55] Simarro G., Ribas F., Blvarez A., Guillin J., Chic T., Orfila A. ULISES: An open source code for extrinsic calibrations and planview generations in coastal video monitoring systems // *Journal Coast Res*. – 2017. – Vol. 335. – № 5. – P. 1217-27. – Doi: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00022.1.
- [56] Dolmatov A.V., Ermakov K.A., Lavrikov V.V. The complex of automated calibration of a thermal imaging system based on Matlab // *Bulletin of Yugorsky State University*. – 2012. – No. 2. – Pp. 59-63 (in Russian).
- [57] Dai T., De Salvo A., Diehl E., Di Mattia A., Kennedy J., McKee S., Orestano D., Pasqualucci E., Petrucci F., Rauscher F. The ATLAS MDT remote calibration centers // *Journal of Physics: Conference Series*, 2010. – Vol. 219. – Online Computing. – P. 022028. – Doi: 10.1088/1742-6596/219/2/022028.

- [58] Komarov N.M., Kudryavtsev A.V., Paryshkin Yu.A. Technical solutions for the shutter control system of the first mirror and the remote calibration diagnostic system "active spectroscopy" / Physico-technical intelligent Systems (FTIS-2024). – III Scientific and Practical Conference. – Tambov, 2024. – P. 37. – eLibrary ID: 62679137. – EDN: LOTHJN (in Russian).
- [59] Asadov H.G., Alieva A.D., Gumbatov D.A. Issues of radiometric calibration of remote sensing devices installed on board UAVs // Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies. – 2024. – Vol. 29. – No. 2. – Pp. 41-50. – eLibrary ID: 65640308. – EDN: MOKDGX. – DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-2-41-50 (in Russian).
- [60] Vito S.D., Elia G.D., Ferlito S., Esposito E., Piantadosi G., Francia G.D. Remote Calibration strategies for Low Cost Air Quality Multisensors: a performance comparison / 2024 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN). – Grapevine, USA, 12-15 May 2024. – Pp. 1-4. – Doi: 10.1109/ISOEN61239.2024.10556107.
- [61] Xiujie Y., Yan C., Rong L., Yanling L., Yixi L. Development of a remote calibration system for monitoring ambient temperature and humidity // Chinese Institute of Testing Technology. – Chengdu, Sichuan, China, 610021. – Pp. 186-190. – DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2024.06.029.
- [62] Mellit A., Benhanem M., Herrak O., Messalaoui A. Design of a Novel Remote Monitoring System for Smart Greenhouses Using the Internet of Things and Deep Convolutional Neural Networks // Energies. – 2021. – Vol. 14. – Art. 5045.
- [63] Golovastov A.A. Standard – PXI technology and equipment for control and measuring systems // Modern automation technologies. – 2012. – No. 3. – Pp. 132-138 (in Russian).
- [64] Automation of physical research and experiment: computer measurements and virtual instruments based on LabVIEW 7 / Ed. Butyrin P.A. – Moscow: DMK Press. – 2005. – 264 p. (in Russian).
- [65] GOST R 8.736-2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij (GSI). Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenij. Osnovnye polozheniya. – Moscow: Standartinform. – 2013 (in Russian)
- [66] GOST R 8.879-2014 Gosudarstvennaya sistema obes-pecheniya edinstva izmerenij (GSI). Metodiki kalibrovki sredstv izmerenij. Obshchie trebovaniya k sodержaniyu i izlozheniyu. – Moscow: Standartinform. – 2015 (in Russian).
- [67] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – JCGM, 2008. – 120 p.
- [68] PR 50.2.016-94 GSI. Trebovaniya k vypolneniyu kalibrovchnyh rabot. – Moscow: Gosstandart Rossii. – 1995 (in Russian).
- [69] RD RSK 01-2014 Polozhenie o Rossijskoj sisteme kalibrovki. – Sbornik rukovodyashchih dokumentov Rossijskoj sistemy kalibrovki. – Moscow: ANO «RSK-Konsalting» – 2014 (in Russian).
- [70] RD RSK 02-2014 Poryadok organizacii deyatel'nosti Rossijskoj sistemy kalibrovki // Sbornik rukovodyashchih dokumentov Rossijskoj sistemy kalibrovki. – Moscow: ANO «RSK-Konsalting». – 2014 (in Russian).
- [71] GOST ISO/MEK 17025-2009 Obshchie trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nyh i kalibrovchnyh laboratorij – Standartinform. – 2018 (in Russian).
- [72] GOST ISO/MEK 17025-2019 Obshchie trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nyh i kalibrovchnyh laboratorij. – Standartinform. – 2019 (in Russian).
- [73] Postanovlenie pravitel'stva RF No. 311 of April 2, 2015 "Ob utverzhenii polozheniya o priznanii rezul'tatov kalibrovki pri poverke sredstv izmerenii v sfere gosudarstvennogo regulirovaniya obespecheniya edinstva izmerenii. – Sobranie zakonodatel'stva RF. – 2015. – No. 15. – st. 2272 (in Russian).
- [74] Spoedler H.J.W. Virtual instruments and virtual environments // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 1999. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 14-19.
- [75] Cristaldi L., Ferrero A., Piuri V. Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: What is really useful, innovative, and technically sound // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1999. – Vol. 42. – № 3. – Pp. 20-27.
- [76] De Capua C., Liccardo A., Morello R. On the web service-based remote didactical laboratory: further developments and improvements / Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC-2005. – Canada, Ottawa, May 16-19, 2005. – Pp. 1692-1696.

### Information about the authors

Oleg V. Stukach is with National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia; Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: [tomsk@ieee.org](mailto:tomsk@ieee.org), ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Ivan A. Ershov is with Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: [ershov@corp.nstu.ru](mailto:ershov@corp.nstu.ru), ORCID: 0000-0003-1524-6508.