

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Научная статья


УДК 621.317.7.089.6

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-94-104>



Моделирование процесса функционирования средств измерений со встроенной функцией мониторинга точности измерений с целью метрологического обеспечения неизвлекаемых средств измерений*

Р. А. Тетерук  

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

Аннотация: Метрологическое обеспечение средств измерений, периодическая поверка и калибровка которых затруднены или невозможны (так называемых неизвлекаемых средств измерений), ограничено первичной поверкой до ввода в эксплуатацию. С развитием современного приборостроения такие средства измерений становятся все более востребованными, в особенности – на опасных производственных объектах.

Однако отсутствует методология контроля точности измерений, проводимых при помощи неизвлекаемых средств измерений. Как следствие, отсутствуют и механизмы прогнозирования технического состояния и метрологического отказа таких средств измерений.

Цель работы – ревизия современных подходов к оценке метрологических характеристик неизвлекаемых средств измерений и построение на их основе функциональной модели процесса функционирования средств измерений со встроенной функцией мониторинга точности измерений, позволяющей спрогнозировать метрологический отказ и повысить достоверность результатов измерений.

Автор провел анализ ключевых нормативных документов. Методическим материалом послужили МИ 3676–2023 «ГСИ. Рекомендации по определению интервалов между поверками средств измерений. Основные положения»; ГОСТ Р 8.673–2009 «ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения»; ГОСТ Р 8.734–2011 «ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля».

В итоге построена обобщенная модель функционирования средств измерений со встроенной функцией мониторинга точности измерений.

Полученные результаты позволяют провести моделирование процесса функционирования разрабатываемых средств измерений со встроенной функцией мониторинга точности измерений с целью определения необходимых параметров проектирования и значений нормированных метрологических характеристик.

* Публикация подготовлена на основе доклада, представленного на Международной научно-технической конференции «Механометрика 2025. Механические измерения и испытания», которая прошла 1–3 июля 2025 года во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д. И. Менделеева. Статья была принята к публикации после доработки рукописи и прохождения процедуры рецензирования.

Статья ориентирована на практическое применение разработчиками, испытателями и конечными потребителями средств измерений со встроенной функцией мониторинга точности измерений.

Ключевые слова: средство измерений, неизвлекаемые средства измерений, метрологические характеристики средств измерений, достоверность результатов измерений, точность измерений, мониторинг точности, моделирование средств измерений, моделирование процессов, метрологическое обеспечение

Для цитирования: *Тетерук Р. А.* Моделирование процесса функционирования средств измерений со встроенной функцией мониторинга точности измерений с целью метрологического обеспечения неизвлекаемых средств измерений // *Эталон. Стандартные образцы.* 2026. Т. 22, № 1. С. 94–104. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-94-104>

Статья поступила в редакцию 21.11.2025; одобрена после рецензирования 01.02.2026; принята к публикации 25.03.2026.


MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Research Article

Modeling the Operation Process of Measuring Instruments with a Built-In Measurement Accuracy Monitoring Function for the Purpose of Metrological Assurance of Non-Removable Measuring Instruments

Roman A. Teteruk  

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 r.a.teteruk@vniim.ru

Abstract: Metrological assurance of measuring instruments for which periodic verification and calibration are difficult or impossible (so-called non-removable measuring instruments) is limited to initial verification prior to commissioning. With the development of modern instrumentation, such measuring instruments are becoming increasingly in demand, particularly at hazardous production facilities. However, there is no methodology for monitoring the accuracy of measurements performed using non-removable measuring instruments. As a consequence, there are also no mechanisms for predicting the technical condition and metrological failure of such measuring instruments. The aim of this work is to review modern approaches to evaluating the metrological characteristics of non-removable measuring instruments and, based on them, to construct a functional model of the operation process of measuring instruments with a built-in measurement accuracy monitoring function. This model will make it possible to predict metrological failure and improve the reliability of measurement results. The author analyzed key regulatory documents. The methodological materials included MI 3676–2023 “State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Recommendations for determining calibration

intervals for measuring instruments. Basic provisions”; GOST R8.673–2009 “State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions”; GOST R8.734–2011 “State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Methods of metrological self-checking”.

As a result, a generalized model of the operation of measuring instruments with a built-in measurement accuracy monitoring function has been constructed.

The obtained results make it possible to simulate the operation process of developed measuring instruments with a built-in measurement accuracy monitoring function in order to determine the necessary design parameters and the values of normalized metrological characteristics.

The article is intended for practical application by developers, testers, and end users of measuring instruments with a built-in measurement accuracy monitoring function.

Keywords: measuring instrument, non-removable measuring instruments, metrological characteristics of measuring instruments, reliability of measurement results, measurement accuracy, accuracy monitoring, modeling of measuring instruments, process modeling, metrological assurance

For citation: Teteruk RA. Modeling the operation process of measuring instruments with a built-in measurement accuracy monitoring function for the purpose of metrological assurance of non-removable measuring instruments. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(1):94–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-94-104>

The article was submitted 21.11.2025; approved after reviewing 01.02.2026; accepted for publication 25.03.2026.

Введение

Обеспечение метрологической надежности средств измерений (СИ) остается перво-степенной задачей системы метрологического обеспечения [1, 2]. Один из аспектов данного направления деятельности – метрологическое обеспечение СИ, периодическая поверка или калибровка которых затруднена или невозможна. В качестве примера можно привести датчики давления и температуры, устанавливаемые в скважинное оборудование, датчики для мониторинга толщины трубопроводов, средства измерений на кораблях, подводных лодках, метеорологические СИ, эксплуатируемые в труднодоступных районах, СИ в атомных реакторах, на космических кораблях и тому подобное. Кроме того, на многих производствах необходимость технического обслуживания СИ, используемых в технологическом процессе, может привести к существенным убыткам из-за необходимости остановки производства для проведения поверки или калибровки СИ.

В связи с этим для некоторых типов СИ испытательные центры при утверждении типа рекомендуют устанавливать только первичную поверку до ввода в эксплуатацию. Фактически

это означает, что во время всего остального жизненного цикла СИ метрологически не обеспечено, достоверные сведения о его фактической точности измерений у эксплуатирующих лиц отсутствуют.

Цель данного исследования – найти подходы к устранению несоответствия существующей системы метрологического обеспечения требованиям промышленности путем разработки модели функционирования СИ с встроенной функцией мониторинга точности измерений. Такой результат позволит получить теоретическую основу мониторинга точности измерений и, как следствие, повысить достоверность измерений неизвлекаемых СИ.

В соответствии с целью предстоит:

- проанализировать комплекс нормативных документов, публикаций в области метрологической надежности СИ;
- проанализировать состояние метрологического обеспечения СИ, для которых периодическая поверка и калибровка затруднены или невозможны;
- рассмотреть и проанализировать средства и объекты измерений как систему;
- описать основы физико-математического моделирования функционирования СИ

с встроенной функцией мониторинга точности измерений (ВФМТИ);

– построить модель процесса функционирования СИ с ВФМТИ, применимую для решения различных задач метрологической надежности, в том числе – для определения интервалов между поверками или калибровками СИ с ВФМТИ.

Материалы и методы

Анализ нормативной базы и публикаций

Одно из решений проблемы предложено в МИ 3676-2023¹ [3]. Для неизвлекаемых СИ предлагается нормировать погрешность в зависимости от времени эксплуатации. Однако для определения вида этой зависимости требуются достаточно длительные и дорогостоящие испытания. Кроме того, такое решение по-прежнему не позволяет определять, исправно СИ в текущий момент времени или нет.

В работах [4, 5] и нормативных документах^{2,3} сформулирована концепция метрологического самоконтроля. В рамках этой концепции разработана классификация СИ с метрологическим самоконтролем, сформулирован ряд определений. Однако научно-методический аппарат разработки, испытаний и эксплуатации таких СИ не приведен. Кроме того, метрологический самоконтроль подразумевает некий контроль метрологической исправности самого СИ, но не позволяет получить данные о точности проводимых измерений.

Таким образом, можно сделать вывод, что достоверность измерительной информации, получаемой от СИ, периодическая поверка или калибровка которого невозможна, зачастую является недостаточной. Особенно эта проблема актуальна для опасных производственных объектов.

Более того, даже периодическая поверка или калибровка СИ не гарантирует его исправность в течение интервала между поверками или

калибровками, поскольку метрологический отказ может наступить в любой момент на интервале между поверками или калибровками.

Необходимо отметить, что в последние два десятилетия в результате развития технологий современное приборостроение обрело следующие особенности [6–10]:

– значительный рост возможностей автоматизации СИ и обмена информацией с потребителем измерительных данных;

– значительный рост вычислительных возможностей и средств моделирования позволяет разрабатывать и эксплуатировать цифровые двойники для значительной номенклатуры типов СИ;

– ввиду глобальной информатизации (сети Интернет) и широкого использования встроенного программного обеспечения появилась возможность проведения удаленной диагностики (поверки, калибровки);

– современные производственные технологии (использование сложного обрабатываемого оборудования и аддитивных технологий) позволяют реализовать сложные механические системы в конструктивно едином исполнении.

Таким образом, возможности современных СИ в плане автоматизации и информатизации неуклонно растут. Потенциально это позволяет реализовать в самом СИ функции мониторинга точности измерений. В данном случае под мониторингом точности измерений будем понимать процесс наблюдения за результатами измерений, оценивание показателей точности этих измерений с целью принятия управляющих решений (о корректировке показаний СИ, ремонте и других). Такие измерительные системы и оборудование незаменимы в скважинах, реакторах, на кораблях, подводных лодках и так далее, где к ним затруднен или невозможен доступ для проведения технического обслуживания.

Однако при этом должны быть соблюдены следующие требования.

1. Должна быть обеспечена прослеживаемость измерений к государственным первичным эталонам.

2. Средства мониторинга точности измерений должны обладать свойством инвариантности, то есть их свойства должны не зависеть или слабо зависеть от времени.

¹ МИ 3676-2023 ГСИ. Рекомендации по определению интервалов между поверками средств измерений. Основные положения.

² ГОСТ Р 8.673–2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

³ ГОСТ Р 8.734–2011 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.

3. Методика мониторинга точности измерений должна быть опробована в процессе эксперимента.

СИ с ВФМТИ позволяет:

- получать оперативную информацию о текущих показателях точности измерений;
- корректировать показания СИ в соответствии с данными мониторинга;
- проводить дистанционную поверку СИ (под дистанционной поверкой будем понимать поверку СИ, в процессе которой поверитель не присутствует непосредственно рядом с поверяемым СИ, а находится на значительном удалении);
- реализовать концепцию цифрового двойника;
- использовать СИ в качестве эталона в измерительной системе для поверки, калибровки и градуировки рабочих СИ в данной измерительной системе.

Реализация функции мониторинга точности измерений может быть различной в зависимости от многих параметров: вида и способа измерений, конструкции СИ, наличия дополнительной диагностической информации, возможности оказания тестовых воздействий и др. Одним из способов мониторинга точности измерений является контроль с помощью тестовых воздействий и сравнения измеренных результатов воздействия с некоторыми опорными значениями, определенными в ходе испытаний или рассчитанными исходя из известных зависимостей. По аналогии с терминами, приведенными в РМГ 76–2014⁴, результаты таких воздействий будем называть контрольными измерениями.

Вместе с тем, научно-методическое обеспечение для проектирования, создания, проведения испытаний в целях утверждения типа и эксплуатации таких СИ практически отсутствует. Хотя очевидно, что на всех стадиях жизненного цикла такие СИ существенно отличаются от обычных СИ.

Основная метрологическая задача – определение текущих значений показателей точности измерений на основе исходной информации (значений параметров случайных внешних

и тестовых воздействий, измерительной информации, описания внутренних процессов и др.). То есть необходимо создать некую модель процесса функционирования СИ. Однако определить показатели точности измерений не всегда достаточно, – как правило, необходимо определить еще и текущие метрологические характеристики СИ. Соответственно, необходима также модель, которая позволяет преобразовывать выходные данные из функциональной модели в текущие метрологические характеристики СИ. Если нормируемой метрологической характеристикой является погрешность, то необходимо иметь модель погрешности СИ с ВФМТИ.

Модель измерений СИ с ВФМТИ отличается возможностью определения значений показателей точности измерений путем сравнения значений откликов датчика на тестовые воздействия с опорными (определенными при выпуске из производства).

Особенности СИ с ВФМТИ:

- наличие конструктивных возможностей осуществлять тестовые воздействия на СИ;
- встроенная возможность определения значений параметров отклика СИ на тестовые воздействия;
- СИ позволяет для мониторинга показателей точности измерений применять не зависящие или слабо зависящие от времени тестовые воздействия;
- наличие зависимости показателей точности СИ от значений параметров отклика СИ на тестовые воздействия;
- необходимо проводить исследования при испытаниях в целях утверждения типа, направленные на подтверждение применимости методик мониторинга точности измерений;
- номенклатура нормируемых показателей точности может быть шире, чем для аналогичного СИ без функции мониторинга точности измерений;
- эксплуатация СИ с ВФМТИ требует наличия дополнительных технических средств и более высокой квалификации обслуживающего персонала.

Основным отличием функциональной модели СИ с ВФМТИ является наличие зависимостей откликов СИ на тестовые воздействия. Причем, в случае автоматического

⁴ РМГ 76-2014 ГСИ. Внутренний контроль качества результатов количественного химического анализа.

мониторинга точности такие воздействия может осуществлять само СИ. В связи с этим для СИ с ВФМТИ необходимо разрабатывать также модель контрольных измерений.

Методология исследования

Рассмотрим СИ и объекты измерений как систему, имеющую некоторый набор параметров на выходе, подверженную внешним случайным воздействиям и управляющим воздействиям оператора. В общем виде модель функционирования такой системы может быть представлена в виде функции

$$Z(t) = F(t, U(t), X(t), Y(t), \varphi(t), \psi(t)), \quad (1)$$

где t – момент времени; $U(t)$ – вектор воздействий, сознательно оказываемых на СИ; $X(t)$ – вектор собственных параметров СИ или параметров происходящих в нем процессов; $Y(t)$ – вектор истинных значений измеряемых величин; $\psi(t)$ – вектор внешних воздействий; $\varphi(t)$ – вектор условий окружающей среды; $Z(t)$ – вектор выходных параметров СИ; $F(t)$ – оператор преобразования.

Опишем подробнее компоненты формулы (1).

Под t подразумевается момент времени, в который происходит воздействие, измерение или наблюдение, при этом $t \in [t_0; T_{\text{ср}}]$, где t_0 – момент окончания стадии изготовления⁵; $T_{\text{ср}}$ – средний ресурс СИ. При этом на интервале $[t_0; T_{\text{ср}}]$ есть множество моментов времени, характерных для каких-либо событий, происходящих с СИ. Например, моментов отказов, проверок, калибровок, тестовых воздействий и др.

$U(t)$ описывает все воздействия, которые намеренно оказываются на СИ (действия оператора, воздействия автоматизированной управляющей системы и др.). В общем случае это могут быть любые воздействия, цель которых – получение некоего отклика от СИ. Например, градуировка (настройка) или тестовые процедуры.

$X(t)$ – вектор параметров, который описывает все или наиболее важные внутренние процессы, происходящие в СИ. Определение набора этих параметров и законов их изменения и является основной задачей моделирования СИ

или, в частном случае, задачей создания цифровых двойников СИ.

Вектор $\psi(t)$ описывает воздействия, которые происходят независимо от СИ. Как правило, эти воздействия имеют случайный характер. Причем, они могут привести к различным последствиям. В худшем случае – к возникновению метрологического отказа СИ сразу в момент воздействия. В случае кумулятивного характера процесса накопления повреждений отказ может наступить через какой-то период или при совокупности различных воздействий.

Вектор условий окружающей среды (t) содержит данные о параметрах окружающей среды. Набор параметров может быть различным: температура, атмосферное давление, влажность, запыленность и др.

Вектор $Y(t)$ в идеальном случае представляет собой вектор истинных значений измеряемых величин, однако в реальности он содержит ряд данных либо неизвестных, либо измеренных с помощью некоего внешнего эталона.

Вектор Z выходных параметров СИ содержит значения измеряемых величин, служебную информацию, индицируемую самим СИ, и др. Этот вектор можно рассматривать как реакцию на случайные и намеренные воздействия, а также на подаваемые на вход СИ истинные значения измеряемых величин.

$F(t)$ – в общем случае неизвестный оператор преобразования, зависящий от времени; Этот параметр в каждый момент времени t ставит набору параметров $U(t), X(t), Y(t), \psi(t), \varphi(t)$ в соответствие вектор выходных параметров $Z(t)$.

Стоит считать такую систему многомерной. В общем случае она может быть нестационарной или стационарной, нелинейной или линейной. Моделирование линейных стационарных систем достаточно полно описано в [11]. Моделирование нелинейных нестационарных систем является более сложной задачей, однако методы решения таких задач также известны [11].

Если предположить, что входные сигналы влияют на процессы старения и износа внутри СИ, то описываемая система является причинно-обусловленной, поскольку значение выходного сигнала в произвольный момент времени зависит от значений входного сигнала в более ранние моменты времени до текущего момента включительно [11].

⁵ ГОСТ 15.000–2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения.

Чаще всего значения всех перечисленных векторов неизвестны. В лучшем случае можно определить лишь усеченные вектора. И тем более практически всегда неизвестен оператор $F(t)$. Однако при решении задач, связанных с определением характеристик СИ, чаще всего требуется использовать не весь набор указанных векторов, а часть из них. Так, при калибровке для расчета неопределенности измерений достаточно полного или усеченного вектора выходных параметров $Z(t)$, а именно значения измеренных величин, а также вектор или усеченный вектор $Y(t)$. Кроме того, в процессе калибровки также используется вектор $\varphi(t)$.

Естественно предположить, что текущее техническое состояние СИ полностью определяется вектором его параметров $X(t)$. А зная зависимости $U(t)$ и $\psi(t)$, можно также решать и задачу прогнозирования его технического состояния и, как следствие, прогнозирования метрологического отказа.

В графическом представлении модель процесса функционирования СИ представлена на рис. 1.

Классификация моделей анализа СИ

При решении задачи прогнозирования метрологической исправности СИ набор исходных данных может достаточно сильно варьироваться в зависимости от различных факторов. Поэтому невозможно ограничиться какой-либо одной моделью для анализа этих данных.

В связи с этим можно разделить модели анализа данных на следующие классы.

Аналитические модели. Аналитическая модель СИ может быть построена, если известен механизм внутренних взаимодействий элементов СИ. Такие модели строятся, как правило, только с участием разработчиков СИ, поскольку для корректного моделирования необходимы сведения не только о принципе действия СИ, но и о конструкции и применяемых материалах. Применение этих моделей целесообразно на всех стадиях жизненного цикла СИ от проектирования до вывода из эксплуатации. Они являются наиболее сложными, но и позволяют обеспечить наибольшую достоверность прогнозирования метрологической исправности.

Статистические модели данных об условиях эксплуатации. Такие модели можно получить на основе экспериментальных данных, полученных с внешних регистрирующих устройств (например, с регистратора параметров окружающей среды), а также с помощью встроенных в СИ средств контроля (например, встроенного в многофункциональный калибратор журнала регистрации параметров сети питания). Статистические модели данных об условиях эксплуатации можно в дальнейшем использовать для прогнозирования значений параметров условий эксплуатации. Такие модели могут использоваться в период эксплуатации и хранения СИ. Они наиболее актуальны при

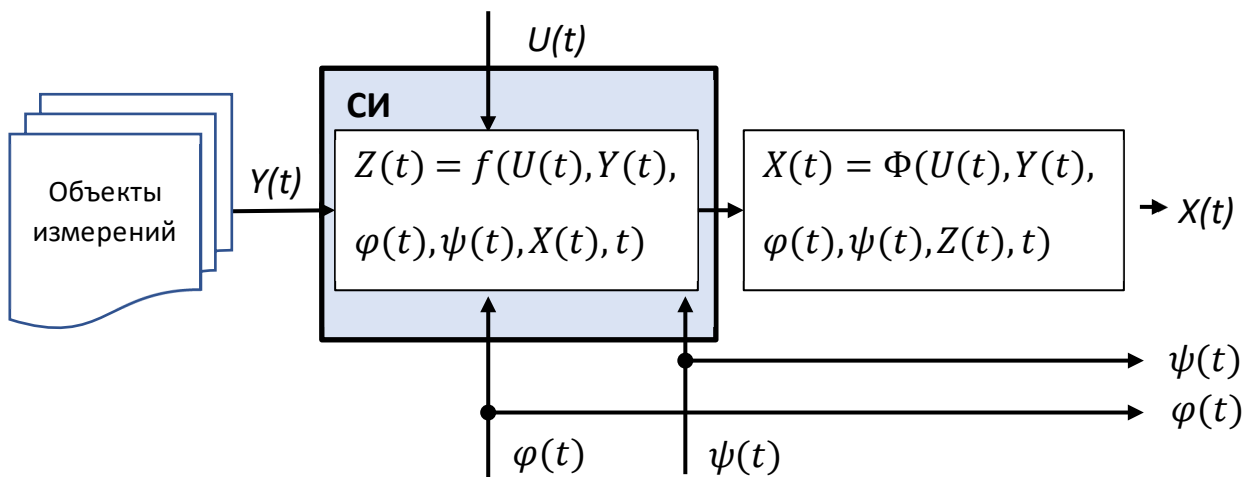


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Система «СИ – объекты измерений»

Fig. 1. The “Measuring instrument – measurements objects” system

прогнозировании метрологической исправности эталонов, поскольку эталоны, как правило, наиболее чувствительны к изменениям параметров окружающей среды.

Статистические модели связи условий эксплуатации и значений параметров СИ. Такие модели в том или ином виде описывает модель $X(t) = \phi(\psi(t))$. Могут быть использованы регрессионные, корреляционные модели, модели на основе условных вероятностей, байесовского подхода и др. Эти модели могут быть построены при наличии достаточно репрезентативной выборки данных результатов наблюдения за условиями эксплуатации и техническим состоянием СИ или эталона. По этой причине они предпочтительны при прогнозировании метрологической исправности эталонов, поскольку для СИ такой набор исходных данных, как правило, не доступен.

Статистические модели связи выходных сигналов $Z(t)$ и параметров СИ $X(t)$ могут быть разработаны в результате анализа данных, полученных в ходе испытаний СИ. При этом наиболее предпочтительными являются испытания до метрологического отказа. В дальнейшем модель может использоваться в процессе эксплуатации СИ для прогнозирования метрологической исправности.

Логические модели. Логические модели могут быть использованы, например, когда тестовые сигналы предназначены для определения значений какого-либо параметра технического состояния СИ, принимающего значения из бинарного множества.

Простейший случай – представление о СИ как о «черном ящике». $X(t)$, как правило, неизвестен. Набор исходных данных: истинные значения измеряемых величин, набор выходных сигналов, значения управляющих воздействий (возможно), условия окружающей среды.

При решении задачи прогнозирования технического состояния СИ наибольшее значение имеет прогнозирование метрологического отказа. Формально эта задача может быть отнесена к классу оптимизационных задач и сформулирована следующим образом: найти такое максимальное значение времени функционирования СИ (время до метрологического отказа):

$$t_{MO} = \operatorname{ar\,gmax} f(X(t), U(t), \varphi(t), \psi(t)), \quad (2)$$

при котором соблюдаются ограничения:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &< \Delta_1^{\text{don}} \\ \Delta_2 &< \Delta_2^{\text{don}}, \quad (3) \\ \Delta_N &< \Delta_N^{\text{don}} \end{aligned}$$

где Δ_i – i -й показатель точности измерений; Δ_i^{don} – заданное предельное значение i -го показателя точности; N – количество показателей точности измерений, $i \in [1; N]$.

Обозначим Y_{uzm} – вектор измеренных значений величин, который является подмножеством компонент вектора Z . Тогда выражение

$$Y_{uzm} = F(t, X, Y, \varphi, \psi) \quad (4)$$

является моделью измерений СИ.

В то же время очевидно, что значения всех векторов в процессе эксплуатации СИ могут меняться, поэтому корректно будет записать формулу (4) в следующем виде:

$$Y_{uzm}(t) = F(t, X(t), Y(t), \varphi(t), \psi(t)). \quad (5)$$

На рис. 2 изображена функциональная модель СИ при проведении контрольных измерений.

Поскольку модель контрольных измерений обязательно включает в себя тестовые воздействия, запишем:

$$Y_{KII}(t) = F(t, U(t), X(t), Y(t), \varphi(t), \psi(t)), \quad (6)$$

где $Y_{KII}(t)$ – вектор измеренных значений величин при контрольном измерении, который является подмножеством компонент вектора $Z(t)$.

Запишем уравнение для показателя точности контрольных измерений. Когда предполагается, что используется один и тот же измерительный преобразователь, точность контрольных измерений связана с точностью измерений и вектором измеренных значений. Кроме того, поскольку контрольные измерения чаще всего проводятся не одновременно с основными измерениями, а периодически, то ввиду непрерывного случайно дрейфа метрологических характеристик СИ для связи между точностью измерений и контрольных измерений необходимо учитывать время, когда эти измерения проводятся. Таким образом:

$$\Delta_{KII}(t) = f(Y_{uzm}(t), \Delta_{uzm}(t), t). \quad (7)$$

Очевидно, что обратным преобразованием формулы (7) можно получить выражение

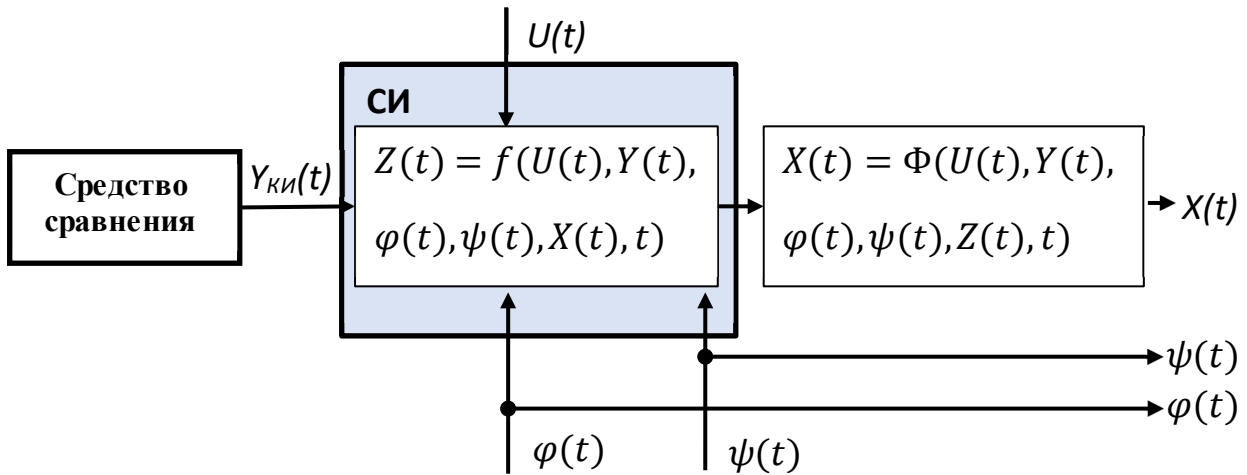


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Система «СИ – средство сравнения»

Fig. 2. The “Measuring instrument – comparison tool” system

для показателя точности измерений, оцененного по результатам контрольных измерений:

$$\Delta_{изм}(t) = g(Y_{изм}(T), \Delta_{КИ}(t), t). \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что существует принципиальная возможность оценить фактические значения показателей точности СИ на основе оценки показателей точности контрольных измерений.

Кроме того, применяя к формулам (5) и (6) подход, описанный в ГОСТ 34100.3–2017⁶, также можно получить неопределенности измерений и неопределенности контрольных измерений. При этом необходимо учитывать, что коэффициенты чувствительности в выражениях для оценки неопределенности являются заданными или оцениваются экспериментально.

Результаты и обсуждение

В качестве модельного примера возможно применения формул (5)–(8) рассмотрим датчик давления с функцией мониторинга показателей точности. Предположим, что в качестве инварианта используется некоторое воздействие, выражающееся в повышении давления на известное значение P_U^0 , которое является постоянным во времени. Также введем предел погрешности контрольных измерений Δ_{lim} .

⁶ ГОСТ 34100.3–2017 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

Тогда (3) вырождается в критерий исправности $\Delta_{КИ} < \Delta_{lim}$.

Далее вектор воздействий принимает вид $U(t) = P_U^0$.

Модель измерений (5) принимает вид $Y_{изм}(t) = P_{изм}(t)$.

Вектор параметров окружающей среды $\varphi(t) = [T_{окр}(t); h_{окр}(t); P_{атм}(t)]$.

Значения вектора $X(t)$ неизвестны, поскольку встроенных средств диагностики данные датчики не имеют. Значения вектора $\psi(t)$ также неизвестны, поскольку датчики, как правило, эксплуатируют в условиях, при которых случайные воздействия не регистрируются.

Предположим, что модель дрейфа метрологических характеристик рассматриваемых датчиков линейная вида $\Delta_{изм}(t) = A + Bt$, при этом существует возможность корректировки нуля непосредственно перед контрольными измерениями. A и B – коэффициенты, которые в общем случае неизвестны, но могут быть определены экспериментальным путем. Таким образом, погрешность датчика в момент контрольных измерений может быть представлена в виде $\Delta_{изм}(t) = Bt$.

Запишем уравнение (6) для указанных исходных данных:

$$Y_{КИ}(t) = F(t, P_U, P_U^0, \varphi(t)).$$

В процессе измерения сначала измеряется текущее давление в измерительной системе P_0 ,

затем, после повышения давления и паузы в несколько минут, измеряется значение давления P_1 . Измеренное значение разницы давлений P_U в этом случае рассчитывается следующим образом:

$$P_U = P_1 - P_0.$$

Подставим эти выражения в формулу (7) и получим выражение для оценки погрешности контрольных измерений (абсолютной погрешности измерения P_U):

$$\Delta_{КИ}(t) = f(P_U, P_U^0 - P_U, t).$$

Если допустить, что контрольные измерения происходят, когда дрейф метрологических характеристик пренебрежимо мал, условия окружающей среды не меняются, погрешность измерений давления не зависит от измеряемого значения давления, то

$$\Delta_{КИ} = P_U - P_U^0.$$

Если выполняется условие $|\Delta_{КИ}| < \Delta_{lim}$, можно сделать вывод о метрологической исправности датчика давления.

Необходимо отметить, что приведенный пример является наиболее простым случаем, который практически не встречается в реальности. Моделирование функционирования реальных СИ значительно сложнее, поскольку, как правило, необходимо учитывать множество разнородной информации. Кроме того, многие параметры и коэффициенты таких моделей могут быть получены только экспериментальным путем.

Заключение

В ходе исследований проведен анализ актуальных нормативных документов, публикаций в области метрологической надежности СИ. Сделан вывод об актуальности проблемы оценивания метрологической надежности СИ в процессе эксплуатации.

Проанализировано текущее состояние метрологического обеспечения измерений в случае, когда периодическая поверка и калибровка СИ затруднена или невозможна. Сделан

вывод об отсутствии такого метрологического обеспечения.

Описаны основы моделирования функционирования СИ с ВФМТИ. Показано, что на основе функциональной модели СИ могут быть разработаны:

- а) модель измерений;
- б) модель контрольных измерений;
- в) выражение для расчета показателей точности измерений и контрольных измерений.

Сделан вывод об однозначной зависимости показателей точности измерений от показателей точности контрольных измерений, что позволяет использовать этот подход при разработке, производстве, испытаниях и эксплуатации СИ с ВФМТИ.

Кроме того, описанная модель в силу общности может быть применима для решения различных задач метрологической надежности, в том числе – определения интервалов между поверками или калибровками.

Вклад автора: Автор подтверждает единичную ответственность за следующее: сбор данных, анализ и интерпретацию результатов, а также подготовку рукописи.

Contribution of the author: The author confirms sole responsibility for the following: data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Conflict of interests: The author declares no conflicts of interest relevant to this manuscript.

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

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тетерук Р. А. Современное состояние научно-методического обеспечения определения интервалов между поверками. Часть 1 // Законодательная и прикладная метрология. 2024. № 1 (187). С. 31–38.
2. Тетерук Р. А. Современное состояние научно-методического обеспечения определения интервалов между поверками. Часть 2 // Законодательная и прикладная метрология. 2024. № 2 (188). С. 22–29.
3. Пути совершенствования системы нормативно-методического обеспечения определения интервалов между поверками / А. И. Анцукова [и др.] // Законодательная и прикладная метрология. 2023. № 6 (186). С. 12–17.
4. Тайманов Р. Е., Сапожникова К. В. Метрологический самоконтроль датчиков // Датчики и системы. 2011. № 2 (141). С. 58–66.
5. Сапожникова К. В., Тайманов Р. Е., Кочугуров В. В. Метрологический самоконтроль как компонент диагностики гибких производственных систем и робототехнических комплексов // Испытания, контроль и диагностика гибких производственных систем. М. : Наука, 1988. С. 269–273.
6. Воронина В. Н. Современное российское приборостроение и проблемы государственной экономической политики // Бизнес в законе. 2012. № 6. С. 178–182.
7. Воронина В. Н. Принципы рыночной экономики и структурные изменения в российском приборостроении // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2012. Т. 3, № 4 (12). С. 88–91.
8. Ядова Н. Е., Осико С. М. Современные цифровые технологии в приборостроении: влияние на проектирование, производство и эксплуатацию ракетной техники // Вектор экономики. 2021. № 11. С. 20.
9. Корепанов Е. Н. Научное приборостроение в зеркале времени // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13, № 4. С. 2555–2564. <https://doi.org/10.18334/vinec.13.4.119673>
10. Петриченко И. А. Основные направления развития приборостроения // Главный механик. 2024. № 12.
11. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя : Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 432 с.

REFERENCES

1. Teteruk RA. Current state of scientific and methodological support for determining the intervals between verifications. Part 1. *Legal and Applied Metrology*. 2024;1(187):31–38. (In Russ.).
2. Teteruk RA. Current state of scientific and methodological support for determining the intervals between verifications. Part 2. *Legal and Applied Metrology*. 2024;2(188):22–29. (In Russ.).
3. Ancukova AI, Medvedevskih SV, Pimenova AA, Teteruk RA, Firsanov NA. Ways to improve the system of regulatory and methodological support for determining intervals between verifications. *Legal and Applied Metrology*. 2023;6(186):12–17. (In Russ.).
4. Taymanov RYe, Sapozhnikova KV. Metrological self-check of sensors. *Sensors & Systems*. 2011;2(141):58–66. (In Russ.).
5. Sapozhnikova KV, Taymanov RE, Kochugurov VV. Metrological self-control as a component of diagnostics for flexible production systems and robotic complexes. In: *Testing, monitoring, and diagnostics of flexible production systems*. Moscow: Nauka; 1988. P. 269–273. (In Russ.).
6. Voronina VN. Modern russian instrument making industry and problems of government economic politics. *Business in Law*. 2012;6:178–182. (In Russ.).
7. Voronina VN. Principles of market economy and structural changes in the russian instrument. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2012;3(4(12)):88–91. (In Russ.).
8. Yadova NE, Osiko SM. Modern digital technologies in instrument making: influence on design engineering, production and operation of rocketry. *Vector Economy*. 2021;11:20. (In Russ.).
9. Korepanov EN. Scientific instrumentation in the mirror of time. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki*. 2023;13(4):2555–2564. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/vinec.13.4.119673>
10. Petrichenko IA. Main directions of instrument engineering development. *Glavnyj mekhanik*. 2024;12. (In Russ.).
11. Lyung L. System identification. Theory for the user. Prentice-Hall. Inc.; 1987. (Russ. ed.: L'yunг L. Identifikaciya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya. Moscow: Nauka; 1991. 432 p.). (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тетерук Роман Анатольевич – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательского отдела госэталонов в области измерений давления ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: r.a.teteruk@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8057-5220>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Roman A. Teteruk – Cand. Sci. (Engin.), Head of the Research Department of State Measurement Standards in the field of pressure measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: r.a.teteruk@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8057-5220>