СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ.

Матякубова Парогат Майлиевна
ТГТУ имени Ислама Каримова, профессор кафедры «МТРСС»
Шеина Наталия Евгеньевна
ТГТУ имени Ислама Каримова, доцент кафедры «МТРСС»

Аннотация. Статья посвящена исследованию современного состояния и перспектив развития математического моделирования в области квантовой метрологии. Рассмотрены основные направления применения математических моделей для описания квантовых измерительных процессов, оценки неопределенности измерений, повышения точности и воспроизводимости результатов. Особое внимание уделено моделированию квантовых сенсоров, атомных и оптических часов, квантовых стандартов единиц физических величин, а также применению методов статистического анализа, теории вероятностей, численного моделирования и методов Монте-Карло. Проанализированы современные подходы к учету квантовых эффектов, систематических погрешностей и источников неопределенности при проведении высокоточных измерений. Определены перспективы использования искусственного интеллекта, машинного обучения и цифровых двойников для совершенствования математического обеспечения квантовых измерительных систем. Показано, что дальнейшее развитие математического моделирования является важным условием повышения точности, надежности и метрологической прослеживаемости квантовых измерений и формирования новых эталонов физических величин.

Ключевые слова: квантовая метрология, математическое моделирование, квантовые измерения, неопределенность измерений, квантовые сенсоры, квантовые стандарты, численное моделирование, метод Монте-Карло, искусственный интеллект, метрологическая прослеживаемость.

Annotatsiya. Maqola kvant metrologiyasi sohasida matematik modellashtirishning zamonaviy holati va rivojlanish istiqbollarini o‘rganishga bag‘ishlangan. Kvant o‘lchash jarayonlarini tavsiflash, o‘lchov noaniqligini baholash, natijalarning aniqligi va takrorlanuvchanligini oshirish uchun matematik modellardan foydalanishning asosiy yo‘nalishlari ko‘rib chiqilgan. Kvant sensorlari, atom va optik soatlar, fizik kattaliklar birliklarining kvant standartlarini modellashtirishga, shuningdek, statistik tahlil usullari, ehtimollar nazariyasi, sonli modellashtirish va Monte-Karlo usullaridan foydalanishga alohida e’tibor qaratilgan. Yuqori aniqlikdagi o‘lchovlarni o‘tkazishda kvant

ISSN 3030-3907

effektlari, tizimli xatolar va noaniqlik manbalarini hisobga olishning zamonaviy yondashuvlari tahlil qilindi. Kvant o‘lchash tizimlarining matematik ta’minotini takomillashtirishda sun’iy intellekt, mashinaviy o‘qitish va raqamli qo‘shnilarni qo‘llash istiqbollari aniqlandi. Matematik modellashtirishni yanada rivojlantirish kvant o‘lchovlarining aniqligi, ishonchliligi va metrologik izchilligini oshirish hamda fizik kattaliklarning yangi etalonlarini shakllantirishning muhim sharti ekanligi ko‘rsatildi.

Kalit so‘zlar: kvant metrologiyasi, matematik modellashtirish, kvant o‘lchovlari, o‘lchov noaniqligi, kvant sensorlari, kvant standartlari, raqamli modellashtirish, Monte-Karlo usuli, sun’iy intellekt, metrologik izchillik.

Annotation. The article is devoted to the study of the current state and prospects for the development of mathematical modeling in the field of quantum metrology. The main areas of application of mathematical models for describing quantum measurement processes, assessing measurement uncertainty, and improving the accuracy and reproducibility of results are considered. Special attention is paid to the modeling of quantum sensors, atomic and optical clocks, quantum standards of physical quantities, as well as to the application of methods of statistical analysis, probability theory, numerical modeling, and Monte Carlo methods. Modern approaches to accounting for quantum effects, systematic errors, and sources of uncertainty in high-precision measurements are analyzed. The prospects for using artificial intelligence, machine learning, and digital twins to improve the mathematical support of quantum measurement systems have been identified. It has been shown that further development of mathematical modeling is an important condition for improving the accuracy, reliability, and metrological traceability of quantum measurements and for the formation of new standards for physical quantities.

Keywords: quantum metrology, mathematical modeling, quantum measurements, measurement uncertainty, quantum sensors, quantum standards, numerical modeling, Monte Carlo method, artificial intelligence, metrological traceability.

ВВЕДЕНИЕ.

Современная метрология вступает в новый этап развития, характеризующийся переходом от преимущественно классических методов измерений к использованию фундаментальных квантовых эффектов. После пересмотра Международной системы единиц SI в 2019 году все единицы SI были определены через фундаментальные константы природы, что создало принципиальную основу для широкого внедрения квантовых технологий в

ISSN 3030-3907

реализацию единиц измерений. Квантовая метрология использует такие свойства квантовых систем, как суперпозиция, запутанность, квантовая интерференция и сжатие квантовых состояний, для повышения точности оценки физических параметров. В отличие от классических измерительных систем, где фундаментальным ограничением часто выступает стандартный квантовый предел, использование коррелированных и запутанных состояний потенциально позволяет получить более высокую чувствительность. На рисунке 1. предоставлено математическое моделирование, которое в данном случае приобретает особое значение.



Рис. 1. Математическое моделирование квантовой метрологии

Оно позволяет ещё до проведения физического эксперимента определить потенциальную чувствительность измерительной системы, исследовать влияние различных источников шума, оценить неопределённость результата и выбрать оптимальный режим измерений.

Целью настоящего исследования является систематизация современных подходов к математическому моделированию квантовых измерительных систем и определение перспектив их дальнейшего развития.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

ISSN 3030-3907



Современное состояние квантовой метрологии

В таблице1. приведено назначение каждой модели, её основные параметры и практический смысл для квантовой метрологии.

Таблица 1.

№	Математическая модель	Описание	Метрологическое значение
1	Модель изменения квантового состояния	Описывает переход исходного квантового состояния в новое состояние под воздействием измеряемого параметра.	Позволяет установить, как физическое воздействие изменяет состояние квантовой системы.
2–3	Описание процесса измерения	Измерение представляется набором возможных результатов и соответствующих операторов измерения, которые учитывают все допустимые исходы.	Задаёт математическую основу регистрации результатов квантового измерения.
4	Вероятность результата измерения	Вероятность конкретного результата определяется текущим квантовым состоянием и	Позволяет перейти от модели квантового состояния к статистически

ISSN 3030-3907

		соответствующим оператором измерения.	наблюдаемым результатам.
5	Квантовое неравенство Крамера–Рао	Определяет нижнюю границу дисперсии несмещённой оценки измеряемого параметра через число измерений и квантовую информацию Фишера.	Характеризует потенциально достижимую точность оценки параметра.
6	Модель эволюции квантового состояния	Исходное состояние преобразуется в состояние, зависящее от оцениваемого физического параметра.	Используется для моделирования реакции квантовой системы на изменение параметра.
7	Модель измерительного процесса	Вероятность получения каждого результата определяется квантовым состоянием после эволюции и выбранным оператором измерения.	Связывает физическую модель системы с результатами эксперимента.
8	Статистическая оценка параметра	Оцениваемый параметр определяется как функция совокупности полученных результатов измерений.	Позволяет получить численную оценку неизвестной физической величины по экспериментальным данным.
9	Оценка метрологической характеристики	Стандартная неопределённость оценки определяется через её статистическую дисперсию.	Используется для количественной характеристики разброса результатов измерения.
10	Модель реального квантового измерения	Идеальная модель дополняется воздействием шума, декогеренции, потерь и других внешних факторов.	Позволяет приблизить математическую модель к условиям

ISSN 3030-3907

			реального эксперимента.
11	Функциональная модель результата	Выходной результат рассматривается как функция нескольких входных величин.	Используется при анализе влияния входных параметров на итоговый результат измерения.
12	Случайные реализации входных величин	Для каждой входной величины формируются случайные значения в соответствии с заданными распределениями вероятности.	Является этапом метода Монте-Карло при оценивании неопределённости.
13	Расчёт выходной величины	Для каждой случайной совокупности входных данных вычисляется соответствующее значение выходной величины.	Формирует выборку результатов, по которой затем оцениваются характеристики распределения.
14	Модель квантового сенсора	Характеристики сенсора рассматриваются как зависящие от измеряемого параметра, температуры, магнитного поля, мощности оптического воздействия, декогеренции, времени взаимодействия и других факторов.	Позволяет исследовать влияние условий работы на характеристики квантового сенсора.
15	Чувствительность квантового сенсора	Чувствительность определяется соотношением уровня шума измерительного сигнала и изменения сигнала при изменении измеряемого параметра.	Используется для выбора режима работы, при котором достигается наилучшая чувствительность сенсора.

Представленные модели образуют последовательную структуру математического описания квантового измерения. Сначала описывается

ISSN 3030-3907

изменение квантового состояния под воздействием измеряемого параметра, затем формируется модель измерительного процесса и вероятностей возможных результатов. Полученные экспериментальные данные используются для статистической оценки параметра и определения его неопределённости.

Для реальных измерительных систем идеальная модель дополняется воздействием декогеренции, шумов, потерь, температурных воздействий, магнитных полей, вибраций и нестабильности лазерного излучения. При наличии нелинейностей и сложных корреляций целесообразно применять метод Монте-Карло: для входных величин задаются распределения вероятностей, формируются случайные реализации, а затем рассчитывается множество значений выходной величины. По полученной выборке определяются её распределение, математическое ожидание, стандартное отклонение и доверительный интервал.

Для квантовых сенсоров математическая модель учитывает одновременно измеряемый параметр и внешние условия. Оптимизация такой модели позволяет выбрать режим работы с минимальным влиянием шума и наилучшей чувствительностью. Таким образом, таблица заменяет громоздкую последовательность формул содержательным описанием их назначения и сохраняет научную логику статьи.

Математическое моделирование оптических частотных стандартов

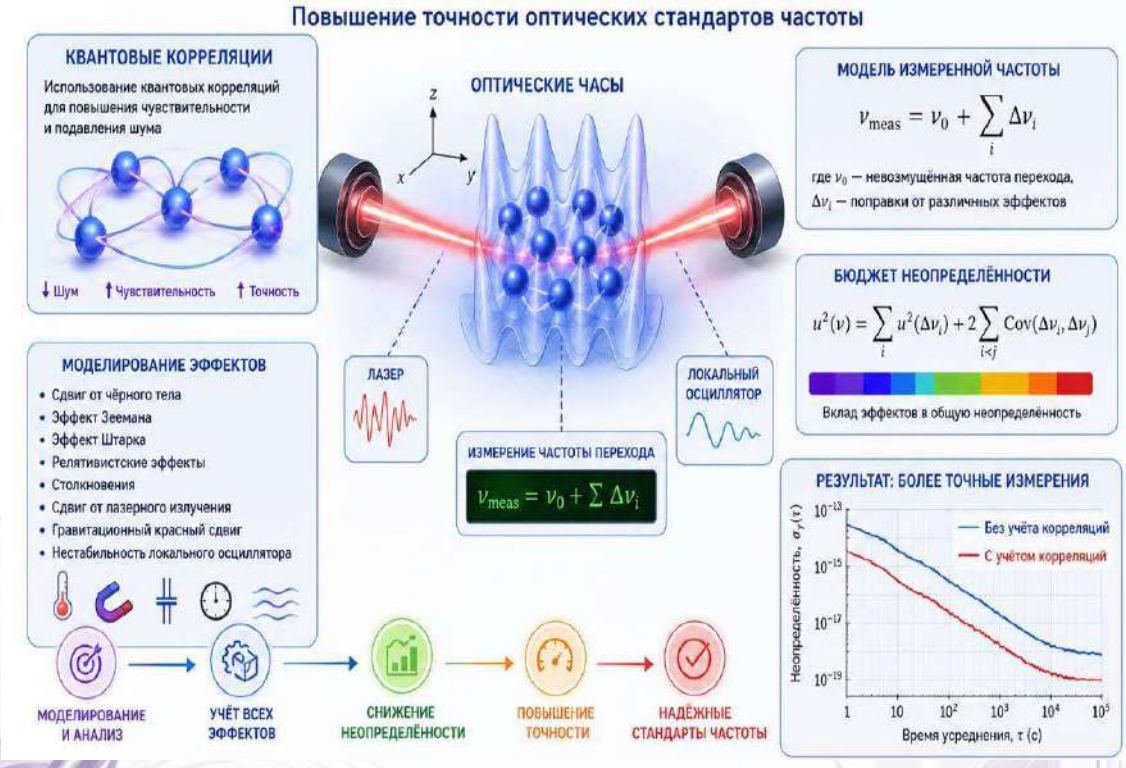


Рис. 2. Математическое моделирование и повышение точности оптических стандартов частоты.

ISSN 3030-3907

Проведённый анализ показывает, что наиболее перспективными направлениями являются методы Монте-Карло, байесовское моделирование, многопараметрическая оценка, адаптивная метрология, искусственный интеллект, физически информированное машинное обучение и цифровые двойники.

Особое значение математическое моделирование приобретает для развития оптических частотных стандартов, квантовых сенсоров и новых реализаций единиц SI. Международная метрологическая практика уже ориентируется на использование квантовых технологий для повышения точности и расширения доступности первичных реализаций единиц.

В перспективе квантовая метрология будет развиваться в направлении интеллектуальных измерительных систем, способных самостоятельно выбирать оптимальные режимы измерения, оценивать неопределённость, компенсировать внешние воздействия и адаптировать математическую модель к изменяющимся условиям эксперимента.

Таким образом, дальнейшее развитие математического моделирования следует рассматривать как необходимое условие формирования новой цифровой и квантовой метрологической инфраструктуры, обеспечивающей повышение точности, надёжности, воспроизводимости и международной сопоставимости результатов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матякубова П.М., Кулуев Р.Р., Шеина Н.Е. Метрология, и стандартизация: Учебное пособие для бакалавров. – Ташкент, 2023. – 312 с.
2. Деген К. Л., Райнхард Ф., Каппелларо П. Квантовое зондирование. Reviews of Modern Physics. 2017. Т. 89. Статья 035002.
3. ДеМилл Д., Хатцлер Н. Р., Рей А. М. и др. Квантовое зондирование и метрология для фундаментальной физики с использованием молекул. Nature Physics. 2024. Т. 20. С. 741–749.
4. Аслам Н., Чжоу Х., Урбах Э. К. и др. Квантовые сенсоры для биомедицинских приложений. Nature Reviews Physics. 2023. Т. 5. С. 157–169.
5. Фидерер Л. Дж., Браун Д. Квантовая метрология с использованием квантово-хаотических сенсоров. Nature Communications. 2018. Т. 9. Статья 1351.
6. Международное бюро мер и весов (BIPM). Международная система единиц (СИ).
7. Международное бюро мер и весов (BIPM). Часто задаваемые вопросы: переопределение секунды.
8. Шеина Н.Е. «Элементы измерительных устройств и их конструирование»: Учебное пособие для бакалавров. – Ташкент, 2026. – 251с.

ISSN 3030-3907

9. Монтенегро В., Мукхопадхьяй К., Юсефджани Р. и др. Обзор: квантовая метрология и квантовое зондирование многочастичных систем. 2024.
10. Джованнетти В., Ллойд С., МакКон Л. Достижения в области квантовой метрологии. Nature Photonics. 2011. Т. 5. С. 222–229.

ISSN 3030-3907