УДК 389.681.2

Р.-Б.Б.СТАНИСЛАВИЧЮС
Санкт-Петербургский филиал
Военно-инженерного университета

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Исследованы успехи, достигнутые при создании эталонов единиц физических величин с использованием квантовых эффектов Джозефсона и Холла. Изложены современные направления по созданию эталона массы, связанного с фундаментальными физическими константами. Показан способ перехода от централизованного метрологического обеспечения рабочих средств измерений к децентрализованному.

This paper deals with the successful results of making standards for physical units using Josephson and Hall quantum effect. It introduces the modern tendency of making standards of mass based on fundamental physical constants. We demonstrate the way to change the central metrological support of working measuring instruments into the decentralized one.

Государственные эталоны продолжают развиваться и совершенствоваться в направлении повышения точности воспроизведения ими единиц физических величин. Именно на уровне предельной точности измерений физических величин, обеспечиваемой государственными эталонами, достигается прогресс научных исследований в области естественных наук, в том числе геодезии и астрономии. Развитие эталонов обусловлено также ростом требований к метрологическому обеспечению ведущих отраслей промышленности, космической и атомной техники, военного дела, энергетики, связи. Все это требует создания принципиально новых методов измерения и аппаратуры на основе использования современных достижений естественных наук, научного приборостроения, промышленности. Если раньше образцом точности и надежности считали астрономические явления, то сейчас это квантовые явления. Применение для метрологических целей макрофизических квантовых эффектов и наиболее устойчивых природных явлений открыло широкие перспективы для создания естественных эталонов, исключающих всякую возможность их утраты.

К макроскопическим квантовым эффектам, имеющим важное метрологическое значение, относятся: квантовые вихревые нити в сверхтекучем гелии, незатухающие токи в сверхпроводниках, квантование магнитного потока в многосвязном сверхпроводнике, замораживание потока в сверхпроводящем кольце – эффекты Мейснера и Джозефсона, квантование холловского сопротивления в сильных магнитных полях при низких температурах, эффект Казимира и др.

Особенно важное значение в совершенствовании эталонов единиц физических величин, а в будущем рабочих эталонов 0-го разряда и прецизионных средств измерений, имеют квантовые эффекты Джозефсона и Холла. Эффект Джозефсона широко применяется при создании быстродействующих ЭВМ, высокочувствительных магнитометров, а в метрологии его используют для создания эталона единицы напряжения – вольта и единицы силы постоянного электрического тока – ампера. В джозефсоновской схеме, предназначенной для воспроизведения постоянного напряжения с номиналом 1 В, содержится $(2\text{-}3)10^3$ туннельных переходов. Схема, рассчитанная на воспроизведение напряжения с номиналом 10 В, уже содержит $(2\text{-}3)10^4$ туннельных переходов и является дорогостоящим уникальным прибором. Схемы такого типа изготавливаются в четырех-пяти лабораториях мира в единичных экземплярах.

В апреле 2001 г. комплекс, создающий эталон единицы напряжения третьего поколения, утвержден Госстандартом России, ему присвоен номер ГЭТ 13-01. В состав комплекса входят:

- мера напряжения для воспроизведения вольта, состоящая из криогенных преобразователей частоты в напряжении на основе эффекта Джозефсона и аппаратуры для синтеза частоты облучения криогенных преобразователей, включая стандарт частоты и времени, синтезатор и генератор СВЧ-диапазона;
- аппаратура для контроля условий измерений и неизменности воспроизводимого размера единицы;
- аппаратура для передачи размера единицы.

Метрологические характеристики государственного эталона первого, второго и третьего поколений приведены в табл.1. Интегральная джозефсоновская микросхема на основе ниобия, в которой реализованы последние достижения современной технологии, позволяет соединить последовательно десятки тысяч переходов Джозефсона*. Рабочая температура микросхемы составляет 4 К и обеспечивается путем погружения зонда с микросхемой в среду жидкого гелия.

Таблица 1

Метрологические характеристики государственного эталона единицы электродвижущей силы

Эталон	Случайная погрешность	Систематическая погрешность	Номинальное значение напряжения, В
ГЭТ 13-80	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$	1
ГЭТ 13-89	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	1
ГЭТ 13-01	$0{,}6 \cdot 10^{-9}$ $0{,}2 \cdot 10^{-9}$	$0{,}9 \cdot 10^{-9}$ $0{,}9 \cdot 10^{-9}$	1 10

Достигнута одна из самых высоких точностей для эталонов, построенных с использованием аппаратуры третьего поколения. Результаты сличения эталона вольта ВНИИМ им. Д.И. Менделеева с эталоном вольта Международного бюро мер и весов (МБМВ) и физико-технического института (ФТИ) Германии при выходном напряжении 1 В следующие:

$$V_{\text{ВНИИМ}} - V_{\text{МБМВ}} = 0{,}00 \text{ мкВ} \quad \text{при } u_c = 0{,}03 \text{ мкВ},$$

$$V_{\text{ВНИИМ}} - V_{\text{ФТИ}} = 0{,}05 \text{ нВ при } u_c = 0{,}17 \text{ нВ}.$$

Результаты международных сличений свидетельствуют о том, что метрологические характеристики ГЭТ 13-01 находятся на уровне лучших мировых аналогов.

Следует предвидеть принципиальный характер замены многих современных эталонов квантовыми. Если удастся создать эталон массы на основе возможностей ядерной физики, то, очевидно, значительная часть эталонов будет представляться «вечными» мерами. До сих пор эталоном единицы массы является макроскопический объект. Повышение точности определения числа Авогадро позволяет перейти к естественной единице – массе протона или какого-либо другого ядра. Ряд национальных метрологических институтов проводит большую работу по созданию эталона, связанного с естественными или фундаментальными константами (табл.2).

Таблица 2

Новые определения килограмма

Направления работы	Относительная погрешность на начало XXI в.
Компарирование Ватта (NIST, NPL, OFMET) Привязка к постоянной Планка	$8 \cdot 10^{-8}$
Число Авогадро (IMGC, NRLM, PTB) Привязка к постоянной Планка Монокристалл кремния	$3 \cdot 10^{-7}$
Левитация массы (NRLM) Привязка к кванту магнитного потока	10^{-5}-10^{-6}
Накопление ионов золота (PTB) Привязка к атомной единице массы	10^{-3}

Примечание. NIST – Национальный институт стандартов и технологий (США), NPL – Национальная физическая лаборатория (Великобритания), OFMET – Национальный центр метрологии (Швейцария), IMGC – Институт метрологии им. Дж.Колонетти (Италия), NRLM – Национальная исследовательская лаборатория (Япония), PTB – Физико-технический институт (Германия).

* *Катков А.С.* История создания и развития эталонов вольта России / А.С.Катков, О.П.Галахова, И.В.Короткова // Законодательная и прикладная метрология. 2002. № 5. С.53-63.

Например, в PTB ведутся два проекта из этой области: один связан с определением килограмма через число Авогадро, а другой – с привязкой к массе золота. Необходимо определить и взвесить атомы золота и к 2007 г. достичь погрешности менее $5 \cdot 10^{-8}$. Стоимость проекта составит около 5 млн долларов США.

Анализ методов и средств воспроизведения единиц физических величин в связи с успехами в вопросах реализации естественных эталонов показал, что основополагающая роль в реализации квантовых эффектов принадлежит фундаментальным физическим постоянным: квант действия h, квант электрического заряда e, скорость света в вакууме c и др. Становится вполне обоснованной перспектива разработки системы естественных эталонов, позволяющих вычислять размеры всех воспроизводимых единиц через фундаментальные физические константы, поставлены общие вопросы оптимизации выбора системы основных единиц. При этом имеется в виду, что каждая последующая система единиц физических величин должна обеспечивать возможность более точного воспроизведения основных и производных единиц и быть связанной с единицами предыдущей системы однозначными количественными соотношениями.

Предлагается система четырех основных единиц*, основанная на фундаментальных физических константах: УИЦ – единица скорости, равная 1/299 792 458 части скорости распространения в вакууме плоской электромагнитной волны; секунда – в соответствии с существующим определением; вольт – разность потенциалов, соответствующая возбуждению $4{,}83594 \cdot 10^{14}$ Гц на туннельном контакте Джозефсона; ампер – ток в квантовом элементе Холла, который вызывает увеличение напряжения Холла на 6453 В. Тогда определение единицы массы, килограмма, будет следующим: масса, кинетическая энергия которой при движении с единичной скоростью (1 уиц) эквивалентна электрической энергии 0,5 В·А/с.

Выводы

1. Высокая степень неизменности, а также способность воспроизводить единицу физической величины независимо от внешних условий, места и времени позволяет рассматривать квантовые эталоны как «вечные меры».

2. Благодаря внедрению легко воспроизводимых эталонов единиц физических величин, метрологическое обеспечение рабочих средств измерений позволит перейти от централизованного способа, привязанного к государственным эталонам, к децентрализованному. Это обеспечит повышение точности измерений и экономию значительных средств и времени, затрачиваемых на поверку в соответствии с «многоэтажной» поверочной схемой.

3. На основе использования фундаментальных физических констант возможна реализация концепции системы взаимосвязанных эталонов единиц физических величин и перспективность совершенствования системы единиц.

* *Kibble B.P.* Realization of the electrical SI units // U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 1984. № 617. P.461-464.