



Государственный



Совместный проект Управления метрологии Росстандарта и журнала "Мир измерений"

**НАЦИОНАЛЬНОЕ ДОСТОЯНИЕ:
ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ЭТАЛОНЫ И ИХ ХРАНИТЕЛИ**

Ведёт проект Н.В. Разикова,
начальник отдела законодательной метрологии

Человечество в своем развитии прошло много этапов, при этом технический прогресс и торговля всегда были основной движущей силой. Сначала необходимо было измерять расстояние, объём, вес. Это была эпоха под знаком механики. Изучение электричества и открытия в этой области позволили поставить на службу человечеству механизмы и устройства, не имеющие аналогов в живой природе, – началась новая эпоха. Измерять приходилось величины, которые было трудно понять, "пощупать": почему "бьют током" расчёска и электрический угорь, почему убивает молния? Стремление к познанию природы этих явлений, оценке и сравнению их характеристик привело к созданию измерительных приборов и эталонов в области электричества. Человеческий опыт и знания механики переносились на измерения электрических явлений. Оказалось, что электрические процессы могут вызывать притяжение и отталкивание, т.е. проявлять силовые характеристики, или провоцировать химические реакции, выделяя из раствора вещества определённой массы в течение заданного промежутка времени.

По этой причине первые электрические эталоны были основаны на силе взаимодействия электрических зарядов и электрических токов и измерении массы при электролизе. Вот почему определение ампера, которое является основным для реализации электрических единиц в международной системе, содержит очень важную константу – так называемую магнитную проницаемость вакуума, которая, по сути, служит связующим звеном между механическими и электрическими единицами.

Открытия последних лет позволили создать ряд устройств, сопрягающих электрические единицы с фундаментальными физическими константами – постоянной Планка, зарядом электрона и частотой, что повысило точность измерений на несколько порядков.

Квантовые электрические эталоны снимают пределы по точностям, исходящие из механических измерений, и, опираясь на значения фундаментальных констант, показывают перспективность передачи единиц теперь уже механическим величинам, включая килограмм. "Борьба" между механикой и электрофизикой ещё не завершена, и ключевую роль здесь играет магнитная постоянная. Она может перейти в разряд измеряемых величин, а единица силы электрического тока – ампер – получить другое определение, не связанное с механикой.

Так или иначе, но мы уже не представляем свою жизнь без прецизионных электрических приборов и без передачи электрических сигналов на расстояния. Итак, первую серию публикаций в рубрике "Эталоны", куда вошли материалы о семи эталонах основных единиц СИ, завершает статья сотрудников лаборатории государственных эталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева – Каткова Александра Сергеевича, Павлова Олега Михайловича и Покусаева Антона Владимировича – об истории электрических измерений и Государственном первичном эталоне РФ единицы силы электрического тока ГЭТ 4-91.

Ключевые слова: электричество; ампер; вольт; ом; эталон; электрометр; ампер-весы; квантовый эффект

первичный эталон

единицы силы электрического тока – ампера – ГЭТ 4-91

А.С. Катков, доктор технических наук

О.М. Павлов, кандидат технических наук

А.В. Покусаев

ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург

По мере развития мировой хозяйственной деятельности и торговли потребовалось систематизировать измерения механических величин, в первую очередь в части определения размеров и веса предметов. Среди промышленно развитых государств одной из первых стала широко применяться система единиц, включающая меры длины, площади, объёма и веса.

Постепенно результаты научных исследований создали условия для установления связи механических величин с электрическими и магнитными явлениями и для разработки устройств измерения характеристик последних: первое количественное исследование силы взаимодействия электрических зарядов выполнил Шарль Кулон, результатом чего стал экспериментально установленный им в 1785 г. закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов; в 1800 г. итальянец Алессандро Вольта изобрёл источник постоянного тока – гальванический элемент; в 1820 г. Ханс Христиан Эрстед обнаружил взаимодействие магнитного поля и постоянного

Электрические явления известны человечеству с давних пор, например, молния или способность некоторых видов морских рыб парализовать жертву разрядом тока. Этимология термина “электричество” восходит к греческому названию янтаря – “электрон”, т.к. ещё в VII–VI веках до н.э. греки знали, что янтарь обладает свойством при трении электризоваться и притягивать разные предметы. А в Китае приблизительно в III веке до н.э. магнетизму даже нашли практическое применение – изобрели магнитное приспособление для определения сторон света, т.е. компас. Однако в древности и в Средние века между перечисленными явлениями не видели никакой связи.

тока, и тогда же Андре Мари Ампер установил закон, описывающий силовое взаимодействие постоянных токов; в 1831 г. Майкл Фарадей открыл электромагнитную индукцию, а затем законы электролиза, связывающие значение электрического тока с массой и временем, и ввёл понятия электрического и магнитного полей.

В 1832 г. Карл Фридрих Гаусс создал метрическую систему, в которой единицы длины и массы совместно с единицей времени сфор-

мировали когерентную систему единиц (миллиметр – грамм – секунда), преобразованную позднее в СГС (сантиметр – грамм – секунда). В 1901 г. Джованни Джорджи предложил систему мер, которая кроме трёх механических величин содержала четвертую, электрическую, величину – ампер или ом [1]. Измерения величин в этой системе носили название абсолютных. Практические измерения демонстрировали трудности реализации абсолютных значений электри-



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН

ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА – АМПЕРА – ГЭТ 4-91



ческих величин, поэтому был предложен набор воспроизводимых или практических устройств, реализация электрических единиц в которых непосредственно не вытекала из соотношений, используемых в СГС, но экспериментальная оценка погрешности не противоречила абсолютным значениям измерений.

К середине XVIII века появилось понятие “электромтр”. Его возникновение связано с работой академика Г.В. Рихмана. Рихман создал первое в мире устройство, обладавшее всеми основными элементами современного электроизмерительного прибора. В этом устройстве, а также в последовавших за ним системах аналогичного назначения для оценки изучаемых

и т.д., значительно расширили область применения электричества в технике и в быту. Благодаря этим открытиям возникла новая область техники – электротехника, быстрые темпы роста которой в будущем предсказал в 1881 г. успех первой международной электрической выставки в Париже.

По случаю выставки французское правительство создало 1-й Международный конгресс электриков. Именно там впервые выяснилась настоятельная необходимость установления в международном масштабе единых электрических единиц и совместной разработки методов изготовления образцов этих единиц и образцовых приборов. Принятая на конгрессе резо-

противление связаны между собой законом Ома, принятие той или иной единицы в качестве основной сопрягалось с точностью её практической реализации через механические единицы.

Данный вопрос обсуждался на 4-м Международном конгрессе электриков в Чикаго в 1883 г., что привело к созданию системы международных электрических единиц, опирающейся на эталоны и явившейся конкретной реализацией системы абсолютных практических единиц. Решения Чикагского конгресса послужили исходным пунктом для развития законодательств различных государств в области электрических единиц. В частности, Австралия, Англия, Соединённые Штаты Америки, Франция, Германия узаконили эти единицы в 1894–1898 гг. Правительственные законы этих стран установили также эталоны, применяемые для реализации международных электрических единиц: в качестве эталона электрического тока был принят метод воспроизведения с использованием устройства для проведения электролиза, получившего название серебряного вольтамметра. В качестве эталона единицы напряжения, или электродвижущей силы (ЭДС), был принят метод, в основу которого положен опыт создания электрохимических элементов (нормальных элементов Кларка и Вестона). Одновременно проводились исследования по осуществлению абсолютных измерений электрических единиц с помощью ампер-весов и квадратного электромметра лорда Кельвина, основанных на использовании закона Ампера.

Вследствие некоторых ошибок и неясностей в определениях, допущенных Чикагским конгрессом, а также ввиду отсутствия специфика-

Лондонская международная конференция по электрическим единицам и эталонам (1908 г.) ввела не зависящие от абсолютных единиц международные единицы. Считая, что основной должна оставаться система абсолютных практических единиц, конференция постановила, что на практике электрических измерений и для создания законодательной базы в этой области будет использоваться система международных электрических единиц, основными единицами которой являются международный ом и международный ампер

электрических явлений использовались силы электростатического притяжения. Если до 1870 г. прикладное использование электричества было связано с телеграфией, гальванопластикой и освещением некоторых маяков, то с последней четверти XIX века такие замечательные изобретения, как динамомашин Зенобе Грамма и Вернера Сименса, микрофон, телефон, электрическая свеча Павла Яблочкова, лампы накаливания Томаса Эдисона и Джозефа Свана, а также передача электрической энергии на расстояние, промышленное применение электрохимических процессов

люция ввела понятие “абсолютной практической системы электрических единиц”. Признаком “абсолютная” передавал долженствование выражать электрические единицы в терминах механических единиц (длины, веса и времени), а характеристика “практическая” пояснял более приемлемый для прикладного использования размер единицы, отличный от СГС. При этом единица силы тока “ампер” определялась через ом и вольт.

Вопрос об установлении эталонов не один раз становился предметом международного обсуждения. Поскольку напряжение, ток и со-

ции для осуществления эталонов с надлежащим единообразием и точностью вопрос о международных электрических единицах продолжал и далее служить предметом всеобщего внимания. Окончательное его решение состоялось только в 1908 г. на Лондонской международной конференции по электрическим единицам и эталонам, где Россию официально представляли профессор Н.Г. Егоров и Л.П. Свенторжецкий.

Лондонская конференция ввела не зависящие от абсолютных единиц международные единицы. Считая, что основной должна оставаться система абсолютных практических единиц, конференция постановила, что на практике электрических измерений и для создания законодательной базы в этой области будет использоваться система международных электрических единиц, основными единицами которой являются международный ом и международный ампер.

Международный ом определен при неизменяющемся электрическом токе и температуре тающего льда как сопротивление ртутного столба массой 14,4521 г и длиной 106,3 см, имеющего одинаковое по всей длине сечение. Международный ампер – как сила неизменяющегося электрического тока, который, проходя через водный раствор азотнокислого серебра, отлагает 0,00111800 г серебра в секунду. Остальные международные электрические единицы определялись уже как их производные. В частности, международный вольт определен как электрическое напряжение, которое в проводнике, имеющем сопротивление в 1 международный ом, производит ток силой в 1 международный ампер.

Таким образом, в течение достаточно короткого исторического от-

резка в качестве базовой электрической единицы попеременно выступали вольт, ампер и ом, а производящие электрические величины эталоны опирались на измерения длины, массы и времени. Спецификации, которым надлежит следовать при реализации эталонов, установила та же Лондонская конференция.

Работе по созданию эталонов способствовали помимо указанных конгрессов и конференций обширные научные связи и взаимодействие специалистов. Так, Н.Г. Егоров опубликовал в 1899 г. статью “О правительственной выверке электрических измерительных приборов в западноевропейских государствах” [2], где представил результаты по-

УЧЁНЫЕ ХРАНИТЕЛИ ГЭТ 4-91

КАТКОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ



Родился в 1948 г., окончил Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина. Доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории государственных эталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”. С 2005 г. представляет Россию в Консультативном комитете по электричеству и магнетизму. Учёный хранитель государственных первичных эталонов вольты (ГЭТ 13-01) и ампера (ГЭТ 4-91). Автор более 100 научных публикаций.

ПАВЛОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ



Родился в 1939 г., окончил радиотехнический факультет Ленинградского института авиационного приборостроения по специальности “Радиотехника”, Институт восточных языков при Московском государственном университете (отделение арабского языка). Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории государственных эталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”, учёный хранитель Государственного первичного эталона единицы силы постоянного электрического тока в диапазоне $10^{-16} \dots 10^{-9}$ А ГЭТ 4-91. Награждён знаком “За заслуги в стандартизации”. Автор 40 научных публикаций и изобретений.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН

ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА – АМПЕРА – ГЭТ 4-91

сечения в 1896–1897 гг. метрологических организаций Англии, Франции, Австро-Венгрии и Германии. В статье приведены описания эталонов, методов их применения, порядка и методики поверки приборов, законодательного аспекта создания и использования эталонов.

Н.Г. Егоров сформулировал задачи научно-технического развития эталонов электрических единиц и поверки электроизмерительных приборов, что в свою очередь привело к открытию в 1900 г. в Петербурге электрического отделения Главной палаты мер и весов, где были созданы первые национальные отечественные эталоны вольта, ома и ампера.

Работы по созданию эталона вольта начались уже в 1899 г. Калибровка эталона была выполнена по методике Физико-технического института Германии путём измерения ЭДС нормальных элементов (НЭ) с помощью серебряного вольтамметра (рис. 1). Вольтамметр, являвшийся в то время эталоном силы постоянного тока, был изготовлен в соответствии с правилами, принятыми Чикагским международным конгрессом в 1893 г.

Для определения ЭДС эталонных НЭ с помощью серебряного вольтамметра составлялась электрическая цепь из последовательно соединённых вольтамметра, двух эталонных катушек сопротивления (1 Ом каждая) и аккумуляторной батареи. При этом падение напряжения на эталонных катушках сравнивалось с ЭДС НЭ, которую и надо было определить. ЭДС, или международный вольт, вычислялась как

$$E = R \cdot i = \frac{R \cdot q}{t \cdot e},$$

где q – количество выделившегося при электролизе серебра, мг; $e = 1,118$ мг – количество серебра, выделяемого током 1 А за 1 с; t – время, в течение которого током выделялось серебро, с; R – сопротивление эталонных катушек, Ом.

Измерения ЭДС НЭ при 15°C, проведённые с помощью серебряного вольтамметра и мер сопротивления, показали, что отклонения результатов от среднего значения составляли 0,002...0,0003 В при общей погрешности измерения, оценённой в 0,0001 В.

С 1909 г. Н.Г. Егоров, который к этому времени стал управляющим Главной палаты, получил специальное финансирование и начал работы по созданию основных электрических эталонов (ома, вольта, ампера) [3]. В этом же году в Главной палате мер и весов была устроена особая лаборатория, специально приспособленная для изготовления НЭ Вестона, рекомендованных Лондонской конференцией в качестве эталона международного вольта [4].

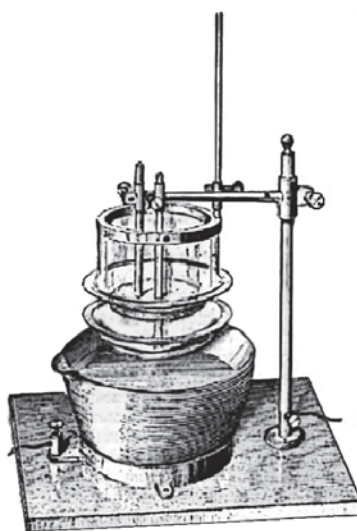


Рис. 1
Серебряный вольтамметр. В конструкцию вольтамметра входили: платиновая чашка – катод – и укрепленная на штативе с помощью серебряного стержня серебряная пластина – анод; в качестве электролита использовался 15...20%-ный раствор азотнокислого серебра

Все изготовленные НЭ сличили с НЭ Национальной физической лаборатории Англии, ЭДС которых ранее была установлена по серебряным вольтамметрам в США (Бюро стандартов, Вашингтон) особой комиссией из представителей государственных метрологических лабораторий Англии, Германии, Франции и США, работавшей в 1910 г.

В этот же период началась работа с серебряным вольтамметром, служившим эталоном международного ампера и являвшимся российским государственным эталоном силы электрического тока. По трём серебряным вольтамметрам, изготовленным сотрудником Главной палаты И.А. Лебедевым, была определена ЭДС НЭ. Полученные результаты подтвердили постоянство значений ЭДС и установили полную взаимную согласованность всех созданных в Главной палате мер и весов электрических эталонов.

К 1 января 1914 г. в Главной палате имелось 42 НЭ, значение и стабильность ЭДС которых находились на уровне мировых стандартов. Следующие наблюдения ЭДС НЭ с помощью серебряного вольтамметра проводились в конце 1915 г. А.Г. Гольдманом.

В 1922 г., после того как Совет труда и обороны утвердил первое при советской власти Положение о Палате мер и весов, была создана эталонная электрическая лаборатория [5]. Возглавил лабораторию профессор А.К. Колосов, который проводил исследования характеристик НЭ и сам изготавливал большие партии НЭ.

В 1930–1932 гг. А.К. Колосов снова определил значения ЭДС основной группы НЭ Вестона при помощи серебряного вольтамметра. Аналогичные работы выполнялись и другими странами. Результатом стало значительное уменьшение

расхождений между значениями международного вольта в разных странах. Эти работы, а также работы по измерению международных ома и ампера в абсолютных единицах, проводившиеся в некоторых национальных метрологических лабораториях, позволили 3-й сессии консультативного комитета по электричеству (1933 г.) принять решение о переходе с 1935 г. к абсолютным практическим единицам. Однако большинство лабораторий не смогло за два года полностью закончить сложные работы по абсолютным измерениям и переход на абсолютную практическую систему электрических единиц отложили до 1940 г. Вследствие Второй мировой войны этот переход не состоялся.

В соответствии с предложением 1-й сессии Консультативного комитета по электричеству (ККЭ) Международное бюро мер и весов (МБМВ) в 1933 г. открыло свою электрическую лабораторию, основной задачей которой являлось сравнение эталонов электрических единиц разных стран. Поскольку транспортируемых высокоточных мер силы электрического тока не существовало, сравнение электрических эталонов проводилось с помощью мер ЭДС (нормальных элементов) и мер сопротивления. В сличениях эталонов, организованных МБМВ в период 1934–1935 гг., принял участие и Всесоюзный институт метрологии и стандартизации (ВИМС*) при Всесоюзном комитете по стандартизации при Совете труда и обороны. ВИМС представил в МБМВ группу НЭ и две катушки сопротивления. Сличения установили сходимость электрических единиц всех государств-участников (кроме Франции) в пределах 0,001%. В ре-

* ВИМС – новое название Главной палаты мер и весов с 1931 г. В 1934 г. ВИМС преобразован во Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ).

зультате были установлены средние значения единиц сопротивления и ЭДС пяти государств – СССР, США, Англии, Японии и Германии.

Анализ всех условий международных сличений электрических эталонов привёл ККЭ (1935 г.) к заключению, что на тот момент точность измерений с электрическими эталонами можно было принять равной 0,0001%.

В 1948 г. IX Генеральная конференция по мерам и весам вновь вернулась к рассмотрению предложений по переходу от международных электрических единиц к абсолютным практическим единицам, где в качестве основной единицы фигурировала единица силы тока – ампер, и дала определение этой единицы [1]: “Ампер есть сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную 2×10^{-7} Н на каждый метр длины”.

К этому времени ведущие метрологические организации зарубежных стран уже имели установки, реализующие воспроизведение единицы силы тока с помощью токовых весов с использованием размеров основных механических единиц – метра, килограмма, секунды – и точной константы $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Н/м, связывающей механические и электрические единицы.

В России первую попытку определения силы тока предприняли ещё в 1839 г. учёные Э.Х. Ленц и Б.С. Якоби: они измеряли силу отталкивания между катушкой с током и магнитом, помещая катушку на конец коромысла весов. В СССР в 1938 г. под руководством профессора



Рис. 2
Внешний вид ампер-весов

Л.В. Залуцкого были начаты работы по созданию токовых весов (или ампер-весов), к 1941 г. закончившиеся изготовлением модели с многослойными катушками. В 1947 г. в результате теоретических и экспериментальных исследований последующих лет во ВНИИМ были изготовлены токовые весы (рис. 2) с однослойными цилиндрическими катушками. Под общим руководством профессора Б.М. Яновского работы выполнялись С.В. Горбачевичем, Н.А. Волковым, П.Н. Лукьяновым. Первые результаты измерений датируются 1948 г. [6]. С этого времени и до создания во ВНИИМ в 1979 г. установки для определения вольта на основе эффекта Джозефсона размер единицы ЭДС определялся через абсолютные измерения силы тока на токовых весах и эталон ома. В 1955 г. посредством токовых весов было установлено новое среднее значение ЭДС группы первичного эталона из 20 НЭ, равное 1,018608 абсолютного вольта. Было принято, что повтор-

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН

ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА – АМПЕРА – ГЭТ 4-91



ные изменения размера вольты будут осуществляться лишь тогда, когда измерения на токовых весах обнаружат изменение среднего значения ЭДС группового эталона, превышающее 0,001% (т.е. 10 мкВ).

Уравнение воспроизведения для силы электрического тока с помощью ампер-весов:

$$I = \sqrt{mg / \frac{\partial M}{\partial Z}}, \quad (1)$$

где m – масса уравновешивающего груза; g – ускорение свободного падения; $\frac{\partial M}{\partial Z}$ – производная от магнитной индукции взаимодействующих соленоидов по вертикальному направлению, носящая название постоянной электродинамической системы. Взаимная индуктивность может быть определена из геометрических размеров катушек по формуле:

$$M = \iint \frac{dl_1 \cdot dl_2}{r}, \quad (2)$$

где dl_1 и dl_2 – элементы длины проводников катушек; r – расстояние между ними.

До 1970 г. во ВНИИМ проводились исследования, направленные на повышение точности воспроизведения силы постоянного тока путём совершенствования конструкции токовых весов. Однако измерения геометрических параметров постоянной электродинамической системы, в частности диаметров по всей длине соленоидов, длины намотки, диаметра провода соленоида и иных факторов, ограничивали точность воспроизведения на уровне порядка 8×10^{-6} [7].

Предпринимались попытки воспроизведения силы тока с помощью гиромангнитного отношения протонов и других частиц в слабом и сильном магнитных полях [8, 9], однако те же проблемы измерений геометрических размеров ограничивали

точность данных измерений.

Начало нового этапа повышения точности в области измерений электрического тока связано с открытием в 1962 г. Б.Д. Джозефсоном эффекта туннелирования электронов в сверхпроводниках при температуре жидкого гелия (4,2 К) [10] и открытием в 1980 г. К.О. Клитцингом эффекта квантования сопротивления в двумерных структурах [11].

В 70-е годы началась новая эпоха в создании эталонов – переход на воспроизведение единиц физических величин через физические константы с применением стабильных физических эффектов и переход к так называемым практическим единицам, которые могли быть воспроизведены более точно и с более высокой стабильностью без опоры на эталон силы электрического тока. (Первая подобная попытка перехода к практическим единицам была предпринята метрологами на Лондонской конференции 1908 г.)

При воспроизведении вольты стал использоваться эффект Джозефсона, характеризующий квантовые эффекты при туннелировании электронов, объединённых в куперовские пары. Такие пары находятся в макроскопическом квантовом состоянии, которое описывается единой волновой функцией. Классический джозефсоновский туннельный переход состоит из двух сверхпроводников, разделённых тонким изолирующим барьером.

Если переход Джозефсона разместить в электромагнитном поле с частотой f , то на вольт-амперной характеристике перехода появляются ступени напряжения:

$$U = fnh/2e = fn\Phi_0 = fn/K_J, \quad (3)$$

где $h/2e$ – отношение постоянной Планка к удвоенному заряду электрона; Φ_0 – квант магнитного потока; K_J – константа Джозефсона; n – номер ступени вольт-амперной характеристики перехода Джозефсона.

В 1972 г. Международная конференция по мерам и весам (МКМВ) рекомендовала применять следующее значение константы K_J :

$$K_J = \Phi_0^{-1} = 483594 \text{ ГГц/В}. \quad (4)$$

Работы ВНИИМ по совершенствованию системы электрических эталонов и созданию установки на эффекте Джозефсона связаны с именами профессоров В.О. Арутюнова, С.В. Горбачевича, Ю.В. Тарбеева, К.А. Краснова. Первые измерения ЭДС НЭ с использованием аппаратуры на основе эффекта Джозефсона были выполнены во ВНИИМ в 1974–1975 гг. [12]. В период с 1980-го по 2001 г. создано несколько поколений установок на эффекте Джозефсона для использования в эталоне вольты [13–15].

В 1988 г. на МКМВ была принята рекомендация С1-1988 о переходе на новый размер вольты, в котором используется значение константы Джозефсона $K_{J-90} = 483597,9$ ГГц/В, с относительной неопределённостью 4×10^{-7} , и рекомендация С2-1988 о переходе на новый размер ома на базе значения константы Клитцинга $R_{K-90} = 25812,807$ Ом, с относительной неопределённостью 2×10^{-7} .

Таким образом, внедрение в метрологическую практику квантовых эталонов вольты и ома открыло возможность воспроизведения силы тока с погрешностью на порядок меньше, чем при воспроизведении с помощью ампер-весов.

В процессе создания эталона вольты второго поколения (1989 г.) изготовлены такие уникальные



приборы, как сверхпроводящий квантовый магнитометр, криогенный компаратор тока [16] и криогенный делитель [17]. При разработке криогенного делителя были проведены исследования по созданию специального сплава, из которого формировалась резистивная проволока с заданными свойствами, кроме того, решена проблема создания сверхпроводящего переключателя. В качестве переходов Джозефсона использовались точечные ниобиевые контакты, разработанные в Нижнем Новгороде в НПО «КВАРЦ» [18].

Наличие данных устройств в составе эталона вольты позволило использовать их для воспроизведения силы тока и создать аппаратуру, воспроизводящую ампер через вольт и ом, которая в 1991 г. вошла в комплекс Государственного первичного эталона единицы силы постоянного электрического тока – ампера (ГЭТ 4-91) [19]. Передача размера единицы сопротивления производилась от эталона ома с установкой на квантовом эффекте Холла [20].

Реализация эталона ампера осуществлена посредством двух комплексов аппаратуры, обеспечивающих воспроизведение единицы силы постоянного электрического тока – ампера на основе квантовых эффектов в реперных точках 1 мА и 1 А и методов электрометрии в диапазоне силы токов $10^{-16} \dots 10^{-9}$ А.

Основными элементами первой части аппаратуры, воспроизводящей значения силы тока на основе квантовых эффектов (рис. 3), являются мера напряжения на основе эффекта Джозефсона, включающая генератор сверхвысокой частоты G и переход Джозефсона, криогенная мера сопротивления R_C в виде набора равнономинальных резисторов, коммутируемых сверхпроводящим

переключателем, криогенный компаратор постоянного тока, использующий в качестве нуля индикатора магнитного потока многопетлевой радиочастотный сквид (сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство, от англ. Superconducting Quantum Interference Device), и управляемые источники постоянного тока на 1 мА и 1 А.

Воспроизведение силы тока эталоном проходит в 2 этапа: на первом от эталона ома, в состав которого входит установка на квантовом эффекте Холла, передаётся единица сопротивления, а на втором реализуется процесс воспроизведения силы тока заданного значения.

Передача размера единицы сопротивления осуществляется с помощью одноомной меры (R_0), аттестованной по эталону ома (R_H), путём сравнения напряжения на мере R_0 (1 мВ) с напряжением криогенной меры R_C (4 мВ) с помощью меры напряжения на эффекте Джозефсона и сквид-гальванометра при одном токе, протекающем через меры сопротивления.

Значение сопротивления криогенной меры определяется как:

$$R_C = R_0 \frac{F_2 \cdot N_2}{F_1 \cdot N_1}, \quad (5)$$

где F_1, F_2, N_1, N_2 – значения частот облучения генератора G и номера ступенек вольт-амперной характеристики перехода Джозефсона

(ВАХ ПД) при сравнении напряжений на R_C и R_0 соответственно.

Значение воспроизводимого тока (1 мА), протекающего через R_C , определяется как:

$$I_1 = \frac{F_1 \cdot N_1 \cdot F_3 \cdot N_3}{F_2 \cdot N_2 \cdot K_J \cdot R_0}, \quad (6)$$

где F_3, N_3 – частота облучения и номер ВАХ ПД в процессе воспроизведения тока I_1 ; K_J – константа Джозефсона.

Значение воспроизводимого тока (1 А), протекающего через обмотку криогенного компаратора тока, определяется как:

$$I_2 = I_1 \cdot K_w. \quad (7)$$

где K_w – масштабный коэффициент передачи криогенного компаратора тока, равный 1000.

В основу метода электрометрии, используемого во второй части ГЭТ 4-91, положено известное соотношение:

$$I = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial(CU)}{\partial t} = C \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (8)$$

где Q – заряд; C – ёмкость; U – напряжение; t – время.

Опыт измерений в диапазоне малых токов показал, что наиболее точные результаты по сравнению с резистивным методом на основе закона Ома можно получить при использовании метода заряда конденсатора [21]. Основными элементами

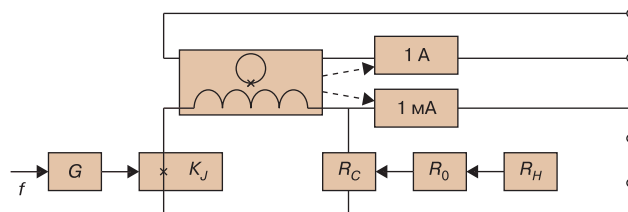


Рис. 3 Блок-схема ГЭТ 4-91 при воспроизведении силы постоянного тока для значений 1 мА и 1 А

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН

ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА – АМПЕРА – ГЭТ 4-91



ми многозначной меры, воспроизводящей силу постоянного тока в диапазоне $10^{-16} \dots 10^{-9}$ А (рис. 4), являются мера линейно изменяющегося напряжения (МЛИН) с набором герметизированных конденсаторов (C_0), измеритель напряжения (dU), измеритель времени (dt) и компаратор К. Персональный компьютер (ПК) предназначен для обработки результатов измерения.

Аппаратура работает в двух режимах: компарирования и воспроизведения токов. При воспроизведении выходной ток многозначной меры определяется как:

$$i_0 = C_0 \frac{dU}{dt}. \quad (9)$$

Диапазон воспроизводимых токов (см. таблицу) зависит от значений крутизны линейно изменяющегося напряжения и ёмкости конденсатора. При компарировании токов осуществляется компенсация заряда, создаваемого на одной из пластин конденсатора измеряемым током i_x , зарядом, создаваемым на другой пластине конденсатора током известного значения i_0 , при этом осуществляется встречное включение многозначной меры тока i_0 и аттестуемого источника i_x , таким образом:

$$i_0 = C_0 \frac{dU}{dt} = i_x. \quad (10)$$

Учитывая, что передача размеров вольт и ома эталону силы тока

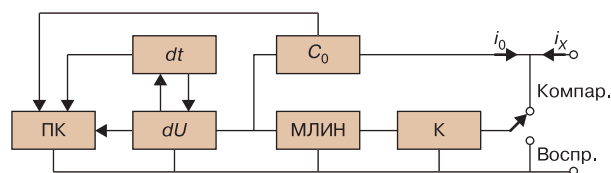


Рис. 4
Блок-схема ГЭТ 4-91 при воспроизведении силы постоянного тока для значений $10^{-16} \dots 10^{-9}$ А

в диапазоне $10^{-9} \dots 1$ А производится от квантовых эталонов, участвующих в международных ключевых сличениях, а также отсутствие в указанном диапазоне высокоточных транспортируемых мер тока, международные сличения в данной области измерений не проводятся.

В последние годы существенно возросла потребность в измерениях малых постоянных токов, и промышленность освоила выпуск высокоточных измерительных приборов, что создало основу для проведения международных сличений с целью выявления согласованности национальных эталонов в данной области измерений.

В 2006–2007 гг. впервые прошли международные сличения в области постоянных токов. Сличения проводились в рамках программы EUROMET, в них приняли участие 13 национальных метрологических институтов, в том числе ВНИИМ. В настоящее время завершается работа по оформлению материалов сличений, результаты которых показали согласо-

ванность характеристик ГЭТ 4-91 на мировом уровне.

Современные тенденции и перспективы развития измерений в области постоянного тока удивительным образом совпадают со схемой построения ГЭТ 4-91. В области токов порядка 1 мА...1 А наблюдается потребность в высокоточных измерениях, связанных в настоящее время с обеспечением так называемых ватт-весов, или электронного килограмма [22]. При этом точность измерения тока гарантируется применением эталона вольт на эффекте Джозефсона и эталоном ома на квантовом эффекте Холла, которые реализуют связь значений фундаментальных физических констант со значением единицы массы. С другой стороны, в области малых токов ($10^{-12} \dots 10^{-16}$ А) появляются квантовые устройства, реализующие связь тока с зарядом электрона и частотой [23, 24].

Консультативный комитет по электричеству и магнетизму в 2007 г. принял рекомендацию Е1 о предполагаемых изменениях Международной системы единиц СИ и, в частности, действующего определения ампера. Предложено примерное определение ампера: “Ампер есть электрический ток, эквивалентный потоку, содержащему точно $1/(1,60217653 \times 10^{-19})$ элементарных зарядов в секунду” [25]. (Из этого следует, что данное опре-

Метрологические характеристики ГЭТ 4-91

Диапазон, А	Среднее квадратическое отклонение результата измерения	Неисключённая систематическая погрешность
1,0	5×10^{-8}	2×10^{-7} (*)
10^{-3}	5×10^{-8}	2×10^{-7} (*)
10^{-9}	3×10^{-5}	5×10^{-4}
$10^{-10} \dots 10^{-13}$	2×10^{-4}	1×10^{-3}
10^{-14}	2×10^{-4}	$1,5 \times 10^{-3}$
10^{-15}	5×10^{-4}	5×10^{-3}
10^{-16}	1×10^{-2}	$2,5 \times 10^{-2}$

(*) Без учёта погрешности K_j и R_{jr}



деление фиксирует значение элементарного заряда точно равным $1,60217653 \times 10^{19} \text{ А} \times \text{с.}$)

Благодаря развитию современных нанотехнологий появилась возможность воспроизводить ампер в соответствии с предлагаемым определением. Во многих ведущих метрологических институтах мира проводятся работы по созданию квантового эталона электрического тока на основе эффекта одноэлектронного туннелирования [26, 27]. Для более успешного решения этой проблемы запущен Европейский проект COUNT, в рамках которого разрабатываются два дополняющих друг друга устройства на эффекте одноэлектронного туннелирования для применения в метрологии: одноэлектронный насос как мера тока, и счётчик единичных электронов как измеритель тока [26].

При использовании одноэлектронного насоса для воспроизведения тока основное уравнение измерения может быть представлено следующим образом: $i = e \times f$ или $i = 2e \times f$, где e – заряд электрона; f – частота напряжения, прикладываемого к затвору устройства. В эксперименте Национального института стандартов и технологий США получен ток на уровне $1 \times 10^{-12} \text{ А}$ с ошибкой переноса электронов 0,015 ppm [24].

Развитие данных устройств позволяет надеяться на появление квантового эталона тока, который обеспечит передачу значения единицы силы тока в миллиамперную область без большой потери точности, что позволит замкнуть так называемый “квантовый метрологический треугольник” [28], который сможет подтвердить правильность закона Ома с погрешностью на уровне менее 0,01 ppm.

Литература

1. The International System of Units (SI) / Bureau International des Poids et Mesures. – 8th ed. – 2006.
2. Егоров Н.Г. О правительственной выверке электрических измерительных приборов в западноевропейских государствах // Временник. Ч. 4. – 1899. – С. 81–121.
3. Егоров Н.Г. Предварительные работы по приготовлению эталонов основных электрических единиц // Временник. Ч. 10. – 1911. – С. 122–131.
4. Егоров Н.Г. Лондонская международная Конференция об электрических единицах и эталонах (12–22 октября н.ст. 1908 г.) // Временник. Ч. 10. – 1911. – С. 109–121.
5. Маликов М.Ф. Эталон международного вольта // Временник Главной палаты мер и весов. – 1925. – Вып. 1(13).
6. Яновский Б.М., Горбачевич С.В., Волков Н.А. Абсолютные измерения силы тока // Труды ВНИИМ. – 1953. – Вып. 15(75). – С. 3–124.
7. Галахова О.П., Колтик Е.Д. Токосы для абсолютных измерений силы постоянного электрического тока // Российская метрологическая энциклопедия. – СПб.: Лики России, 2001. – С. 478–480.
8. Ягола Г.К., Зингерман В.И., Сепетый В.Н. Определение точного значения гиромагнитного отношения протона в сильных магнитных полях // Измерительная техника. – 1966. – № 7. – С. 45.
9. Студенцов Н.В., Хорев В.Н., Шилов А.Е., Шифрин В.Я. Воспроизведение ампера на основе гиромагнитного отношения протона и квантовых магниторезонансных явлений // Измерительная техника. – 1986. – № 3. – С. 20–21.
10. Josephson B.D. Possible new effects in superconductive tunnelling // Phys. Lett. – 1962. – V. 1 (7). – P. 251–253.
11. Klitzing K., Dorda G., Pepper M. New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V. 45 (6). – P. 494–497.
12. Горбачевич С.В., Краснов К.А., Мазуров В.П., Сатрапинский А.Ф., Француз Э.Т., Яшина Т.В. Аппаратура для контроля стабильности ЭДС нормальных элементов на основе эффекта Джозефсона // Измерительная техника. – 1976. – № 4. – С. 59–61.
13. Тарбеев Ю.В., Колтик Е.Д., Рождественская Т.Б., Галахова О.П., Краснов К.А., Кржимовский В.И. Новый государственный первичный эталон единицы электродвижущей силы – вольта // Измерительная техника. – 1981. – № 12. – С. 3–5.
14. Колтик Е.Д., Галахова О.П., Кржимовский В.И., Катков А.С., Ловцюс В.Э., Мжень А.С., Гуревич В.М., Короткова И.В. Государственный первичный эталон единицы ЭДС и переход на новый размер вольта // Измерительная техника. – 1991. – № 10. – С. 6–7.
15. Александров В.С., Катков А.С., Телитченко Г.П. Новый государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы // Измерительная техника. – 2002. – № 3. – С. 6–9.
16. Катков А.С. Сверхпроводящий компаратор для постоянных токов 0.001-1 А // Метрология. – 1986. – № 8. – С. 26–31.
17. Кржимовский В.И. Криогенный делитель постоянного напряжения // Измерительная техника. – 1991. – № 10. – С. 40–42.
18. Кржимовский В.И., Айнитдинов Х.А., Боровицкий С.И., Гохнер А.С. Воспроизведение размера вольта при помощи долгоживущих точечных контактов Джозефсона на монокристалле ниобия // Измерительная техника. – 1983. – № 2. – С. 31–32.
19. Катков А.С., Павлов О.М., Галахова О.П., Кржимовский В.И., Колтик Е.Д. Государственный первичный эталон силы постоянного электрического тока // Измерительная техника. – 1995. – № 1. – С. 3–4.
20. Курочкин Ф.Е., Плошинский А.В., Семёнов Ю.П., Хахамов И.В., Шигорин В.П. Государственный эталон единицы электрического сопротивления и новое представление ома на основе использования квантового эффекта Холла // Измерительная техника. – 1990. – № 12. – С. 3–4.
21. А.С. № 614724. Устройство для воспроизведения постоянных токов / Д.И. Антонова, О.М. Павлов и др. // Бюл. изобр. – 1978. – № 25.
22. Steiner R., Williams E., Newell D., Liu R. Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass // Metrologia. – 2005. – V. 42. – P. 431–441.
23. Аверин Д.В., Зорин А.Б., Лихарев К.К. Блоховские осцилляции в джозефсоновских переходах малых размеров // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1985. – № 88 (2). – С. 697.
24. Keller M.W., Martinis J.M., Zimmerman N.M., Steinbach A.H. Accuracy of electron counting using a 7-junction electron pump // Applied Physics Letters. – 1996. – V. 69 (12). – P. 1804–1806.
25. Recommendation E 1 (2007): Proposed changes to the International System of Units (SI) // CCEM/2007-44 / Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM).
26. Van den Brom H.E., Kerkhof O., Lotkhov S.V. etc. Counting Electrons One by One – Overview of a Joint European Research Project // IEEE Trans. IM. – 2003. – V. 52, № 2. – P. 584–587.
27. De Wilde Y., Gay F., Piquemal F.P.M., Geneves G. Measurements of Single Electron Transistor Devices Combined with a CCC: Progress Report // IEEE Trans.IM. – 2001. – V. 50, № 2. – P. 231–234.
28. Piquemal F., Geneves G. Argument for a direct realization of the quantum metrological triangle // Metrologia. – 2000. – № 37(3). – P. 207–211.