

**О ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИИ АМПЕРА — ОСНОВНОЙ ЕДИНИЦЫ СИ**

*Проведен анализ отрицательных моментов, возникающих при переопределении “ампера” с использованием фундаментальной константы — элементарного заряда  $e$ . Рассмотрен альтернативный вариант — использование в качестве четвертой основной единицы СИ вместо ампера единицы электрического заряда “кулон”, имеющего размерность  $\dim Q = Q$  и определяемого из закона Кулона с использованием элементарного заряда  $e$ .*

Международный Комитет по мерам и весам на своей 94-ой Конференции в октябре 2005 года принял рекомендацию по подготовительным шагам к переопределению четырех основных единиц СИ — килограмма, ампера, кельвина и моля — таким образом, чтобы эти единицы были связаны со значениями фундаментальных физических констант, соответственно, постоянной Планка  $h$ , элементарным зарядом  $e$ , постоянной Больцмана  $k$  и постоянной Авогадро  $N_A$  [1].

Три единицы — ампер, моль и кандела — косвенно определяются с помощью килограмма, в частности, “ампер определяется через силу взаимодействия двух проводников с током, а единица силы — ньютон — определяется через единицу массы [2], поэтому большинство публикаций по заявленной теме связано с переопределением килограмма [1–5].

Не останавливаясь подробно на причинах, которые “привели в движение всю Международную систему единиц” [6], рассмотрим отрицательные моменты, связанные с будущим переопределением ампера.

В статье [1, раздел 2.2.2] приведено новое определение ампера: “Ампер — сила электрического тока в направлении потока точного числа  $1/(1,60217653 \cdot 10^{-19})$  элементарных зарядов в секунду. (В оригинале: The ampere is the electric current in the direction of the flow of exactly  $1/(1.60217653 \cdot 10^{-19})$  elementary charges per second)”.

В комментарии к этому определению сказано: “Идентификация значения элементарного заряда  $e$  следует из соотношения  $I \cdot t = Ne$ , где  $I$  — сила электрического тока,  $t$  — временной интервал,  $N$  — число элементарных зарядов. Положив  $I = 1$  А,  $t = 1$  с и  $N = 1/(1,60217653 \cdot 10^{-19})$  как заявлено в новом определении, мы получаем из простого соотношения  $e = (1/N)A \cdot c = 1,60217653 \cdot 10^{-19}$  Кл. Таким образом, кулон, Кл, является специальным названием для ампер·секунды, А·с.

Определение ампера предписывает, что направление тока — в направлении потока положительных зарядов, так что элементарный заряд должен быть положительной величиной (то есть является абсолютным значением заряда электрона или заряда протона)”.

Прежде чем приступить к анализу приведенного выше нового определения ампера, рассмотрим, как в настоящее время в СИ определяются единица силы электрического тока (1 А) и единица заряда (1 Кл).

Сила электрического тока — это величина, характеризующая упорядоченное движение электрических зарядов и численно равная количеству заряда  $\Delta Q$ , протекающего через определенную поверхность  $\Delta S$  в единицу времени [7]:

$$I = \Delta Q / \Delta t \rightarrow dQ / dt. \quad (1)$$

Из этого определения следует, что “из двух физических величин — электрического заряда и силы тока — по своему физическому смыслу “более первой” величиной является электрический заряд, а не сила электрического тока. Но при построении Международной системы единиц основной электромагнитной величиной была избрана сила тока. Поэтому электрический заряд как производная величина системы величин определяется через силу тока. Будем рассматривать это как издержку построения Международной системы единиц [8]”.

Единица силы тока в СИ определяется из закона Ампера для двух проводников с токами, расположенных в вакууме

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r}. \quad (2)$$

Ампер (1 А) равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового поперечного сечения, расположенных на расстоянии 1 метр один от другого в вакууме, создал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины [9].

Из этого определения следует, что магнитная постоянная имеет точное значение, равное  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

На практике способ воспроизведения единицы силы электрического тока ампера никогда не соответствовал в полной мере приведенному выше определению. “В реальных условиях длина проводника всегда конечна, как и их толщина. Кроме того, для повышения точности измерений силы взаимодействия проводов эту силу необходимо сделать достаточно большой. Поэтому обычно измеряется сила взаимодействия не между парой проводников, а между двумя катушками с большим количеством витков провода [3, с. 15]”.

Электрический заряд определяется в СИ как “интеграл электрического тока во времени [9]” по уравнению:

$$Q = I \Delta t \rightarrow I \int dt, \quad (3)$$

из которого следует, что единица электрического заряда “кулон” (1 Кл) равен количеству электричества, проходящего за 1 секунду через поперечное сечение проводника при неизменной силе тока 1 ампер (1 Кл = 1 А · 1 с).

С формальной точки зрения построение электрических единиц СИ логически безупречно.

1. Из определяющего уравнения (2) устанавливается основная единица СИ — единица силы электрического тока “ампер”, при этом сила тока, как основная величина, имеет размерность, состоящую из одного символа:  $\dim I = I$ .

2. Магнитная постоянная  $\mu_0$  в уравнении (2) является тем размерным коэффициентом ( $\dim \mu_0 = LM^{-2}I^{-2}$ ), который позволяет уравнять размерность левой части уравнения, состоящей из символов механических величин, и размерность правой части, в которой присутствует символ электрической величины  $I$ ;

3. Из уравнения (3) определяется единица электрического заряда “кулон”, при этом электрический заряд, как производная величина, имеет размерность  $\dim Q = IT$ .

И поэтому мы “прощаем” СИ то обстоятельство, что в СИ электрический заряд — это лишь “интеграл электрического тока во времени” и что единица электрического заряда не определяются из закона Кулона, как это сделано при построении электрических единиц в системе СГС.

Взаимодействие электрических зарядов в вакууме в СИ описывается уравнением:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, имеющая точное значение  $\epsilon_0 = 8,854187818 \cdot 10^{-12}$  Ф/м., т.к. определяется из уравнения  $\epsilon_0 \cdot \mu_0 = 1/c^2$ , в котором точные значения имеют скорость света в вакууме  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  м/с и магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м [9].

Вслед за уравнением (4) мы записываем условие квантования электрического заряда, через понятие элементарного заряда:

$$Q = N e, \quad (5)$$

где  $e = 1,60217653 \cdot 10^{-19}$  Кл — величина элементарного заряда.

Согласно новому определению ампера и комментария к этому определению [1], в качестве определяющего уравнения используется уравнение

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{N e}{t}, \quad (6)$$

из которого следует определение единицы силы электрического тока, связанного со скоростью потока элементарных зарядов  $e$ .

Отметим важный момент — новое определение ампера из уравнения (6) требует, чтобы выполнялось следующее условие: элементарный заряд  $e$  уже должен измеряться в ампер·секундах (1 А·с). Действительно, в соответствии с основными положениями теории размерности, из уравнения (6) следует, что должно выполняться следующее уравнение:

$$1\text{А} = \frac{1/(1,60217653 \cdot 10^{19}) e}{1\text{с}} = \frac{1,6021563 \cdot 10^{-19} \text{А} \cdot \text{с}}{(1,60217653 \cdot 10^{-19}) \cdot (1\text{с})}. \quad (7)$$

Таким образом, мы можем констатировать следующее противоречие: уравнение (6) является определяющим уравнением только по форме, а по сути, оно констатирует тождество  $(1\text{ А}) = (1\text{ А} \cdot \text{с}) / (1\text{ с})$ , а замена  $1\text{ А} \cdot \text{с} = 1\text{ Кл}$ , приводит к тому, что единица силы тока определяется через единицу электрического заряда:

$$[I] = [Q]/[t]. \quad (8)$$

Таким образом, из предложенной формулировка переопределения ампера следует, что электрический заряд является не только “более первой” величиной, чем электрический ток, но и через его единицу “кулон” (1 Кл) определяется единица силы электрического тока “ампер” (1 А). Другими словами, “ампер” фактически становится производной единицей.

Другим последствием переопределения ампера является то обстоятельство, что теперь уравнение (2) уже не будет определяющим, т.к. единица силы тока уже определена из уравнения (6). Поэтому размерный коэффициент  $\mu_0$  в уравнении (2), а также размерный коэффициент  $\varepsilon_0$  в уравнении (4), не будут иметь точно заданные значения. Это обстоятельство подробно рассмотрено авторами [1] формулировки нового определения ампера. Следовательно, магнитная постоянная  $\mu_0$  и электрическая постоянная  $\varepsilon_0$ , которые “в СИ являются точно известными константами, стали бы величинами, которые должны быть экспериментально определены [1, раздел 4.1.2]”.

Относительно величин  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  необходимо отметить следующее. Они по своей сути являются размерными коэффициентами, которые появляются в определяющих уравнениях электромагнетизма (в законе

Ампера для двух параллельных проводников с токами и в законе Кулона для точечных зарядов) при переходе от трехмерной системы СГС к четырехмерной системе электромагнитных единиц СИ [10].

В монографии [11], в которой дано четкое различие между физическими постоянными и фундаментальными константами, приведено следующее высказывание относительно размерных коэффициентов  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ : “Ранг фундаментальных физических постоянных присваивают величинам, не являющихся константами природы и обязанным своим существованием всего навсего лишь системе единиц, — таковы, например, магнитная постоянная  $\mu_0$  и электрическая постоянная  $\varepsilon_0$ ”.

Таким образом, при новом определении ампера величина  $\mu_0$  должна быть определена экспериментально с некоторой неопределенностью, а вторая величина  $\varepsilon_0$  будет рассчитываться из соотношения  $\varepsilon_0 \cdot \mu_0 = 1/c^2$ .

Тем не менее, решение переопределить в СИ несколько основных величин с использованием фундаментальных констант является прогрессивным решением. В связи с этим правомерен вопрос: “Что нужно сделать, чтобы устранить негативные последствия переопределения четвертой основной величины СИ с использованием элементарного заряда  $e$ ?”

Кроме того, поскольку “пришла в движение вся Международная система единиц”, то появилась возможность одновременно исправить противоречивость в построении электрических единиц СИ: ампер является основной единицей в СИ, хотя по своей сути сила электрического тока является производной величиной от электрического заряда.

На наш взгляд, можно предложить следующее единственное решение.

1. В качестве четвертой основной единицей СИ выбрать единицу электрического заряда “кулон” (1 Кл) с размерностью: ( $\dim Q = Q$ ).

2. Кулон определить из уравнения (4) следующим образом: “Кулон — электрический заряд, равный точному числу  $1/(1,60217653 \cdot 10^{-19})$  элементарных зарядов, которым обладают два тела, имеющие ничтожно малые размеры, расположенные в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, и который вызвал бы силу взаимодействия между этими телами, равную  $(299792458)^2 \cdot 10^{-7}$  ньютонов.

3. Ампер, как производную единицу, определить из уравнения (1) следующим образом: “Ампер — сила электрического тока, при котором за 1 секунду через поперечное сечение проводника проходит заряд, равный 1 кулону”. Следовательно,  $1 \text{ А} = (1 \text{ Кл})/(1 \text{ с})$ .

При переопределении кулона, как основной единицы СИ, приняты во внимание следующие положения.

1. Электрический заряд  $Q$  является дискретной величиной  $Q = N e$ .

2. Определяющим уравнением является закон Кулона (4), записанный в виде:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = k_0 \frac{eN_1 \cdot eN_2}{r^2}. \quad (9)$$

Положив, как заявлено в новом определении кулона  $N_1 = N_2 = 1/(1,60217653 \times 10^{-19})$ , мы получаем из соотношения:  $(eN_1 \times eN_2) = (1 \text{ Кл}) \times (1 \text{ Кл})$  точное значение элементарного заряда  $e = \frac{1 \text{ Кл}}{N_1} = \frac{1 \text{ Кл}}{N_2} = 1,60217653 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ . Элементарный заряд  $e$  должен быть положительной величиной (т.е. является абсолютным значением заряда электрона или заряда протона).

Положив, как заявлено в новом определении кулона,  $F = (299792458)^2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ ,  $r = 1 \text{ м}$ ,  $Q_1 = Q_2 = 1 \text{ Кл}$ , мы получаем из уравнения (9) точные значения размерного коэффициента  $k_0$  и электрической постоянной  $\epsilon_0$ :

$$k_0 = (299792458)^2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2; \quad \epsilon_0 = 1/(4\pi k_0) = 8,854187818 \text{ Ф/м} \quad (10)$$

и формулу размерности электрической постоянной:  $\dim \epsilon_0 = \text{L}^{-3} \text{М}^{-1} \text{Т}^2 \text{Q}^2$ .

Точное значение магнитной постоянной  $\mu_0$  определяется из соотношения  $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$  и равно  $\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{Кл}^2 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

Магнитной постоянной имеет формулу размерности:  $\dim \mu_0 = \text{LMQ}^{-2}$ .

В соответствии с уравнением (1) сила электрического тока будет производной величиной, размерность которой равна:  $\dim I = {}^{-1}\text{Q}$ .

Размерности электромагнитных величин приведены в таблице.

Необходимо особо отметить, что замена четвертой основной единицы “ампера” на “кулон” не затрагивает существующие наименования электромагнитных единиц СИ и соотношения между единицами. Изменяются только формулы размерности электромагнитных величин. При этом, положительным фактором становится то обстоятельство, что размерности многих электрических величин отражают физический смысл самой величины, в частности, размерность  $\text{QT}^{-1}$  отражает физический смысл силы электрического тока ( $I = Q/t$ ); размерности  $\text{QL}^{-1}$ ,  $\text{QL}^{-2}$ ,  $\text{QL}^{-3}$  отражают, соответственно, определение линейной  $\tau$ , поверхностной  $\sigma$  и объемной  $\rho$  плотностей заряда; размерность  $\text{LQ}$  — момента электрического диполя ( $\mathbf{p} = Q \cdot \mathbf{l}$ ) и др.

Таким образом, принятие в качестве основной единицы СИ единицы электрического заряда “кулон”, определяемой из закона Кулона с использованием фундаментальной константы — элементарного заряда

**Формулы размерностей электромагнитных величин в системе величин LMTQ**

Электрическая величина	Формула размерности	Магнитная величина	Формула размерности
Электрический заряд $Q$	$Q$	Магнитная индукция $\mathbf{B}$	$MT^{-1}Q^{-1}$
Линейная плотность заряда $\tau$	$L^{-1}Q$	Напряженность магнитного поля $\mathbf{H}$	$L^{-1}T^{-1}Q$
Поверхностная плотность заряда $\sigma$	$L^{-2}Q$	Магнитный момент $\mathbf{m}$	$L^2T^{-1}Q$
Объемная плотность заряда $\rho$	$L^{-3}Q$	Намагниченность $\mathbf{M}$	$L^{-1}T^{-1}Q$
Электрический момент диполя $\mathbf{p}$	$LQ$	Магнитный поток $\Phi$ , потокосцепление $\Psi$	$L^2MT^{-1}Q^{-1}$
Поляризованность $\mathbf{P}$	$L^{-2}Q$	Электродвижущая сила индукции $\varepsilon_i$	$L^2MT^{-2}Q^{-1}$
Напряженность электрического поля $\mathbf{E}$	$LMT^{-2}Q^{-1}$	Индуктивность $L$	$L^2MTQ^{-2}$
Электрическое смещение $\mathbf{D}$	$L^{-2}Q$	Разность скалярных магнитных потенциалов $U_m$	$T^{-1}Q$
Поток электрического смещения $\Psi$	$Q$	Магнитное сопротивление $R_m$	$L^{-2}M^{-1}Q^2$
Сила тока $I$	$T^{-1}Q$	Магнитная проводимость $A$	$L^2MQ^{-2}$
Потенциал $\varphi$ , Напряжение $U$ , Электродвижущая сила $\varepsilon$	$L^2MT^{-2}Q^{-1}$	Магнитодвижущая сила $F_m$	$T^{-1}Q$
Плотность тока $\mathbf{j}$	$L^{-2}T^{-1}Q$		
Электрическая емкость $C$	$L^{-2}M^{-1}T^2Q^2$		
Электрическое сопротивление $R$	$L^2MT^{-1}Q^{-2}$		
Удельное сопротивление $\rho_0$	$L^3MT^{-1}Q^{-2}$		
Электрическая постоянная $\varepsilon_0$	$L^{-3}M^{-1}T^2Q^2$	Магнитная постоянная $\mu_0$	$LMQ^{-2}$

$e$ , является предпочтительным, чем предложенное переопределение “ампера”. Действительно:

1. Электрический заряд в СИ становится основной величиной, как и должно быть величине, с которой связано одно из фундаментальных взаимодействий в природе — электрическое взаимодействие;

2. Электрический ток становится производной величиной, единица которой “ампер” естественным образом определяется из уравнения (1);

3. Магнитная постоянная  $\mu_0$  и электрическая постоянная  $\varepsilon_0$  имеют точные значения.

Отрицательным является то обстоятельство, что размерности всех электромагнитных величин будут другими. Но и в этом есть положительные стороны — формулы размерностей многих электрических величин будут отражать физический смысл самой величины. А переход к новым размерностям очень простой: необходимо символ “I” заменить символами “T<sup>-1</sup>Q”.

Переопределение четырех основных единиц СИ планируется закрепить в законодательных документах в 2011 году [1]. К этому времени должен быть сделан выбор: или будет переопределен “ампер” со всеми указанными выше негативными последствиями, или в качестве четвертой основной единицы будет использоваться “кулон”, определенный из закона Кулона с использованием фундаментальной физической константы элементарного заряда  $e$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mills I. M., Mohr P. J., Quinn T. J., Taylor N., Williams E. R. Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) // Metrologia, **43** (2006). – P. 227–246.
2. Кононогов С. А., Константинов М. Ю., Хрущев В. В. О некоторых методах переопределения эталона единицы массы // Измерительная техника. – 2006. – № 4. – С. 3–7.
3. Кононогов С. А., Краснополянин И. Я., Семенчинский С. Г. Метрологические основы электрических измерений // Метрология. – 2006. – № 5. – С. 5–51.
4. Mills I. M., Mohr P. J., Quinn T. J., Taylor N., Williams E. R. Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come // Metrologia, **42** (2005). – P. 71–80.
5. Кононогов С. А. Метрология и фундаментальные константы физики // Измерительная техника. – 2006. – № 2. – С. 3–7.
6. Исаев Л. К. Электромагнитные измерения // Метрология. – 2006. – № 5. – С. 3–4.
7. Физическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия. Т.4. – 1994. – ???с.
8. Чертов А. Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): Справ. пособие. – М: Высш. шк., 1990. – ???с.
9. Международный стандарт ИСО 31/5. Величины и единицы электричества и магнетизма. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – ???с.
10. Трунов Г. М. О возможности изменения некоторых электромагнитных единиц СИ // Метрология. – 2003. – № 3. – С. 28–36.
11. Спиридонов О. П. Фундаментальные физические постоянные: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – ???с.

Статья поступила в редакцию 7.08.2006

Трунов Геннадий Михайлович родился в 1943 г., окончил в 1965 г. Пермский государственный университет им. А.М. Горького. Канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры “Общая физика” Пермского государственного технического университета. Автор 50 научных работ в области теоретической физики и теоретической метрологии.