

О ПОСТРОЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ В СИСТЕМЕ СИ

В большинстве учебников по электротехнике и в ряде элементарных книг по физике применяется система электрических единиц, называемая *рационализованной* системой МКС. Эта система представляет собой раздел электромагнитных единиц системы СИ. В нее входят механические единицы, из которых основными являются метр, килограмм и секунда. Единица силы в системе СИ называется *ньютон* и представляет собой силу, которая сообщает массе в один килограмм ускорение 1 м/сек^2 . Таким образом, ньютон эквивалентен точно 10^5 дин . Соответствующая единица энергии [ньютон×метр], или *джоуль*, эквивалентна 10^7 эрг . Электрические единицы системы СИ содержат известные нам «практические» единицы — кулон (κ), вольт (σ), ампер (a) и ом — наряду с некоторыми новыми. Кто-то заметил, что давно известные практические единицы можно объединить в законченную систему, построенную следующим образом. Напишите закон Кулона в виде (1.1):

$$F_2 = k \frac{q_1 q_2 \hat{r}_{21}}{r_{21}^2}. \quad (1)$$

Вместо того чтобы считать $k=1$, найдите значение k , если сила F_2 измеряется в ньютонах, q_1 и q_2 — в кулонах и r_{21} — в метрах. Зная соотношение между ньютоном и диной, между кулоном и ед. СГСЭ $_q$ и между метром и сантиметром, вы легко вычислите, что коэффициент k должен быть равен $0,8988 \cdot 10^{10}$. (Два заряда по одному кулону, находящиеся на расстоянии в один метр, создают силу около миллиона тонн!) Вместо k мы можем написать $1/(4\pi\epsilon_0)$, где величина постоянной ϵ_0 такова, что $1/(4\pi\epsilon_0) = k = 0,8988 \cdot 10^{10}$. Теперь закон Кулона можно записать так:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (2)$$

где постоянная ϵ_0 равна

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ к}^2/\text{н} \cdot \text{м}^2. \quad (3)$$

Выделение коэффициента $1/4\pi$ предпринято для исключения величины 4π в большинстве электрических формул за счет введения этой величины в ряд других формул (как, например, в данном случае в закон Кулона). Это — все, что сделала «рационализованная» система. Постоянная ϵ_0 называется *диэлектрической постоянной* (или «диэлектрической проницаемостью») вакуума.

Электрический потенциал следует измерять в вольтах, а электрическое поле E — в вольтах на метр. Сила, действующая на заряд q в поле E , равна

$$F(\text{н}) = qE (\text{к} \cdot \sigma/\text{м}). \quad (4)$$

Один ампер равен, конечно, одному кулону в секунду. Сила, приходящаяся на метр длины каждого из двух параллельных проводов с током I (в амперах), расположенных на r метров друг от друга, равна

$$f (н/м) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I^2}{r} \frac{(a^2)}{(м)}. \quad (5)$$

Вспомнив эту формулу в системе СГС,

$$f (дин/см) = \frac{2I^2}{rc^2} \frac{(\text{ед. СГСЭ}_q/\text{сек})^2}{(см^3/\text{сек}^2)}, \quad (6)$$

мы вычислим, что величина $(\mu_0/4\pi)$ должна быть равна 10^{-7} . Таким образом, постоянная μ_0 , называемая магнитной проницаемостью вакуума, должна быть равна

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ н/а}^2 \quad (\text{точно}). \quad (7)$$

Магнитное поле \mathbf{B} определяется силой Лоренца следующим образом:

$$\mathbf{F} (н) = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (8)$$

где \mathbf{v} — скорость частицы в м/сек, q — заряд частицы в кулонах. Для \mathbf{B} требуется новая единица. Эта единица называется *тесла*, или *вебер/м²*, она в точности равна 10^4 гс. В этой системе вспомогательное поле \mathbf{H} выражается в других единицах и связано с \mathbf{B} в вакууме следующим образом:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (\text{в вакууме}). \quad (9)$$

Соотношение между \mathbf{H} и свободным током следующее:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} = I_{\text{своб}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{своб}}$ — свободный ток (в амперах), охватываемый петлей, по которой против часовой стрелки взят линейный интеграл. Поскольку dS измерено в метрах, единица для H называется просто *ампер/метр*. Уравнения Максвелла для полей в вакууме в рационализированной системе МКС (т. е. в системе СИ) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0}, & \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, & \operatorname{rot} \mathbf{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Если вы сравните эти уравнения с теми, которые были написаны в гауссовской системе единиц СГС и в которые входит значение c , вы увидите, что уравнения (11) содержат волновую скорость $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ (в м/сек, конечно). Иными словами:

$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}. \quad (12)$$

В гауссовской системе единиц СГС единица заряда (ед. СГСЭ_q) была установлена законом Кулона при $k=1$. В системе СИ кулон определяется не уравнением (1), а уравнением (5), т. е. силой, действующей между токами, а не силой, действующей между зарядами. В уравнении (5) мы имеем $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$. Другими словами, если бы новые экспериментальные измерения скорости света изменили бы принятое значение c , то мы должны были бы исправить величину постоянной ϵ_0 , а не μ_0 .

Ниже приводится список некоторых единиц системы СИ и эквивалентных им единиц в гауссовской системе единиц СГС.

Величина	Обозначение	Единица в СИ	Эквивалент в гауссовской системе СГС
Расстояние	s	метр	10^2 см
Сила	F	ньютон	10^5 дин
Работа, энергия	W	джоуль	10^7 эрг
Заряд	q	кулон	$2,998 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ}_q$
Ток	I	ампер	$2,998 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ}_q \cdot \text{сек}$
Электрический потенциал	ϕ	вольт	$(1/299,8) \text{ ед. СГСЭ}_V$
Электрическое поле	E	вольт/метр	$(1/29980) \text{ ед. СГСЭ}_V/\text{см}$
Сопротивление	R	ом	$1,113 \cdot 10^{-12} \text{ сек/см}$
Магнитное поле	B	тесла	10^4 гс (гаусс)
Магнитный поток	Φ	вебер	$10^8 \text{ гс} \cdot \text{см}^2$
Вспомогательное поле H	H	ампер/метр	$4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э (эрстед)}$

Система СИ удобна для инженеров. Для применения в фундаментальной физике полей и вещества она обладает одним большим дефектом. Уравнения Максвелла для полей в вакууме в этой системе симметричны по отношению к электрическому и магнитному полям только в том случае, если \mathbf{H} , а не \mathbf{B} выступает в роли магнитного поля. (Обратите внимание, что уравнения (11) не симметричны даже в отсутствие \mathbf{J} .) С другой стороны, как мы показали в гл. 10, именно \mathbf{B} , а не \mathbf{H} является фундаментальным магнитным полем в веществе. Это не является вопросом определения или единиц, а представляет собой факт, отражающий отсутствие магнитного заряда. Следовательно, система СИ, построенная таким образом, нарушает или фундаментальную электромагнитную симметрию вакуума, или существование асимметрии источников. Это — одна из причин предпочтения гауссовской системы единиц СГС в этой книге. Другая причина в том, что большинство работающих физиков пользуется еще единицами системы СГС совместно с рядом практических единиц, применяемых в случае необходимости.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

НЕКОТОРЫЕ ФОРМУЛЫ С ВЕЛИЧИНАМИ В ЧАСТО УПОТРЕБЛЯЕМЫХ ЕДИНИЦАХ

$$W (\text{дж}) = q \mathcal{E} (\kappa \cdot \text{в}), \quad P (\text{вт}) = I^2 R (\text{а}^2 \cdot \text{ом}),$$

$$\mathcal{E} (\text{в}) = 10^{-8} \frac{d\Phi}{dt} (\text{гс} \cdot \text{см}^2 / \text{сек}), \quad \mathcal{E} (\text{в}) = L \frac{dI}{dt} (\text{эн} \cdot \text{а} / \text{сек}),$$

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} (\text{э} \cdot \text{см}) = \frac{4\pi}{10} I (\text{а}), \quad q (\kappa) = C (\varphi_2 - \varphi_1) (\phi \cdot \text{в}).$$

Сила на единицу длины проводника в поле \mathbf{B} :

$$f (\text{дин/см}) = \frac{1}{10} IB (\text{а} \cdot \text{гс}).$$