сивность пропускаемого диафрагмой электронного пучка. Далее электроны проходят через отверстия в первом аноде, к которому подведено постоянное положительное напряжение в несколько сотен вольт и который расположен и устроен так, что полем анода концентрируется электронный пучок. Еще более высокое напряжение второго анода ускоряет электроны. В целом эту первую часть электронного осциллографа часто называют *электронной пушкой* (или *электронным прожектором*).

Тонкий пучок электронов, образуемый электронной пушкой, пропускают через два конденсатора, пластинки которых расположены перпендикулярно одна к другой. На первый конденсатор накладывают электрическое поле, периодически меняющееся по определенному закону, например возрастающее в течение периода пропорционально времени и резко спадающее к нулю в конце периода («пилообразная развертка»). На другой конденсатор подается изучаемое напряжение.

Отклонениями электронного пучка в горизонтальном направлении изображаются промежутки времени, отклонения в вертикальном направлении пропорциональны напряжению изучаемого тока. Таким образом, электронный пучок оставляет на фотографической пластинке или на флуоресцирующем экране след, представляющий собой развернутую картину изучаемых электрических колебаний. Ничтожная инерция электронного пучка позволяет изучать электрические явления, протекающие весьма быстро (до 10^{-7} сек.). В осциллографах, используемых для визуальных наблюдений, флуоресцирующий экран изготовляют из виллемита ($ZnO+SiO_2$; Mn); виллемитовые экраны дают зеленое свечение. В осциллографах, используемых для фотографирования, экран изготовляют из сульфида цинка (ZnS) или из вольфрамата кадмия ($CdO+WO_3$); получается синее свечение. Чтобы получить белое свечение, применяют более сложные составы.

Часто в осциллографах (в особенности предназначенных для телевидения) отклонение электронного пучка осуществляют действием магнитного поля катушек, расположенных около узкого горла трубки во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Имея осциллограмму с записью изменения величины тока в зависимости от времени, нетрудно определить количество электричества Q, перенесенное импульсом тока: оно равно площади под кривой, изображающей изменение тока.

§ 69. Формулы электродинамики в практической системе единиц

В предыдущем изложении некоторые формулы, относящиеся к учению о магнитном поле, были приведены в начертаниях, обычных для курсов физики, но мало применяемых в учебниках электротехники.

В практической системе электрических и магнитных единиц (§ 9) основными единицами являются ампер, вольт, секунда и соответственно этому за единицу работы принимается джоуль, а за единицу силы—ньютон

$$(1 \text{ ньютон} = 10^5 \text{ дин} = 1\,\frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}} = 0{,}102\,\textit{кГ}).$$

Практическая система магнитных единиц основана на использовании закона электромагнитной индукции (этот закон пояснен во всех учебниках физики средней школы и в более общем виде рассмотрен в следующей главе). При установлении практической системы магнитных единиц исходят из величины того магнитного потока, который, возникая или исчезая за 1 сек. в пространстве, охваченном проводящей цепью, своим равномерным нарастанием или убыванием индуцирует в проводящей цепи и поддерживает в ней в течение секунды электродвижущую силу в 1 *в*. Этот магнитный поток носит название *вольт-секунды*, или, иначе, *вебера* (стр. 384).

В практической системе единиц за единицу величины магнитного полюса m принимают такой магнитный полюс, который связан с магнитным потоком в одну вольт-секунду.

Вольт-секунда в 100 миллионов раз превышает абсолютную единицу магнитного потока—максвелл:

1 вольт-секунда (вебер) $= 10^8$ максвелл $= \dfrac{10^8}{4\pi}$ абс. ед. величины магнитного полюса.

Если в законе Кулона

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{\mu r^2} \text{ дин}$$

мы выразим величины магнитных полюсов m_1 и m_2 не в абсолютных единицах, а в вольт-секундах (веберах), расстояние r—в метрах и силу F—в ньютонах (10^5 дин), то в правой части закона Кулона появится коэффициент

$$\frac{(10^8)^2}{(4\pi)^2 \cdot 10^4 \cdot 10^5} = \frac{10^7}{(4\pi)^2}.$$

Чтобы не загромождать формул этим коэффициентом, его переносят в знаменатель закона Кулона и

величину $\dfrac{(4\pi)^2\mu}{10^7}$ обозначают через $4\pi\mu^*$.

Иначе говоря, в полной аналогии со сказанным на стр. 39, для характеристики магнитных свойств среды вводят *числовые выражения* μ^* *магнитной проницаемости в практической системе единиц*, пропорциональные «истинным» числовым выражениям магнитной проницаемости μ:

$$\mu^* = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\mu = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\mu. \tag{15}$$

Пользуясь практической системой единиц, приписывают магнитной проницаемости размерность, вытекающую из закона Кулона:

$$[\mu^*] = \left[\frac{(\text{кол. магнетизма})^2}{(\text{сила}) \cdot (\text{длина})^2}\right].$$

Магнитодвижущая сила, имеющая размерность $\left[\dfrac{\text{работа}}{\text{кол. магнетизма}}\right]$, выражается числом ампервитков, учитывая это, нетрудно сообразить, что в терминах практической системы единиц размерность магнитной проницаемости можно представить так:

$$[\mu^*] = \left[\frac{\textit{вольт-секунда}}{\textit{ампервиток}\cdot \textit{м}}\right].$$

Итак, в практической системе единиц, когда m_1 и m_2 измерены в вольт-секундах, закон Кулона для взаимодействия магнитных полюсов записывается следующим образом:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{4\pi\mu^* r^2} \; \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}} \tag{16}$$

Сопоставляя формулы для ε^* и μ^* [(15) и формула (20) в § 9], получаем весьма важное уравнение

$$\varepsilon^*\mu^* = \frac{\varepsilon\mu}{9\cdot 10^{16}}. \tag{17}$$

Заметим, что произведение $\varepsilon^*\mu^*$ по сказанному выше (и сказанному в § 9) имеет размерность

$$[\varepsilon^*\mu^*] = \left[\frac{\textit{вольт}\cdot\textit{секунда}}{\textit{ампервиток}\cdot\textit{м}} \cdot \frac{\textit{ампер}\cdot\textit{секунда}}{\textit{вольт}\cdot\textit{м}}\right] = \left(\frac{\textit{сек}}{\textit{м}}\right)^2,$$

т. е. произведение $\varepsilon^*\mu^*$ имеет размерность $\left[\frac{1}{(\text{скорость})^2}\right]$. Стало быть, если мы считаем ε и μ отвлеченными числами, то число, стоящее в знаменателе формулы (17), мы должны считать именованным числом, а именно, квадратом скорости, выраженной в *м/сек*. Обозначим эту скорость через c:

$$\varepsilon^*\mu^* = \frac{\varepsilon\mu}{c^2}, \tag{17a}$$

где $c = 3\cdot 10^8$ *м/сек* $= 300\,000$ *км/сек*.

Скорость c есть скорость распространения света в вакууме и вообще скорость распространения электромагнитного возмущения в вакууме

Итак, пользуясь для измерения электрических величин абсолютными электростатическими единицами, а для измерения магнитных величин—абсолютными электромагнитными единицами, мы вправе считать ε и μ отвлеченными числами, но, применяя и к электрическим и к магнитным величинам одни и те же основные практические единицы (ампер, вольт, секунду), следует приписывать величинам ε^* и μ^* указанные выше размерности и следует считать произведение этих величин для вакуума равным обратной величине квадрата скорости света:

$$\varepsilon_0^*\mu_0^* = \frac{1}{c^2}. \tag{18}$$

Практическую единицу напряженности магнитного поля можно определить двояко. Когда руководствуются законом Кулона для магнитных полюсов, то под практической единицей напряженности магнитного поля понимают напряженность такого поля, которое действует на магнитный полюс $m=1$ вольт-секунда с силой 1 ньютон. Очевидно, то же поле будет действовать на 1 абс. ед. величины магнитного полюса с силой, в $\frac{10^8}{4\pi}$ раз меньшей, т. е. с силой $4\pi\cdot 10^{-8}\cdot 10^5$ дин $= \frac{4\pi}{10^3}$ дин. Стало быть,

$$1 \text{ практ. ед. напряженности} = \frac{4\pi}{1000} \text{ эрстед.}$$

Другое определение той же практической единицы напряженности магнитного поля основано на уравнениях электродинамики. А именно, под практической единицей напряженности подразумевают напряженность поля, существующего внутри достаточно длинной или тороидально замкнутой катушки, когда величина тока, протекающего по проводу катушки, такова, что произведение тока, выраженного в амперах, на число витков, приходящихся на 1 *м* длины катушки, равно единице. Руководствуясь этим определением, практическую единицу напряженности магнитного поля обозначают: $1\ \frac{\textit{ампервиток}}{\textit{м}}$.

По формуле Гопкинсона, считая $l_0=0$ и принимая во внимание, что $\Phi=\mu HS$, имеем:

$$H=\frac{4\pi}{10}\cdot\frac{In}{l}\ \text{эрстед},$$

где I выражено в амперах, а l—в сантиметрах. Полагая $I\cdot n=1$ ампервитку и $l=100$ *см*, находим, что

$$1\ \frac{\textit{ампервиток}}{\textit{м}}=\frac{4\pi}{1000}\ \text{эрстед}.$$

Исходя из закона Кулона в форме (16), для напряженности поля, образованного полюсом m вольт-секунд, получаем:

$$H=\frac{m}{4\pi\mu^* r^2}\ \frac{\textit{ампервиток}}{\textit{м}}.$$

В абсолютных электромагнитных единицах вектор магнитной индукции по определению равен $B=\mu H\ \frac{\textit{максвелл}}{\textit{см}^3}$, где H выражено в эрстедах. Подставляя в это соотношение $\mu=\frac{10^7}{4\pi}\mu^*$ и выражая H в ампервитках на 1 *м* $\left(H \text{ в эрстедах}=\frac{4\pi}{1000}H \text{ в } \frac{\textit{ампервиток}}{\textit{м}}\right)$, получаем:

$$B=\mu^* H\cdot 10^4\ \frac{\textit{максвелл}}{\textit{м}^2}=\mu^* H\cdot 10^8\ \frac{\textit{максвелл}}{\textit{см}^2},\ \text{т. е.}\ B=\mu^* H\ \frac{\textit{вольт-секунда}}{\textit{м}^2},$$

где H измерено в ампервитках на метр. Мы видим, таким образом, что в практической системе единиц соотношение между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля аналогично соотношению между электрическим смещением (а не электрической индукцией) и напряженностью электрического поля (§ 9, стр. 41).

В электростатике, преобразовав закон Кулона к форме, выражаемой формулой (21) главы I, все остальные формулы в начертаниях, приспособленных к использованию практической системы единиц, мы могли получить простой подстановкой в ранее выведенные формулы вместо ε величины $4\pi\varepsilon^*$. В учении о магнитном поле такой переход к формулам в практических единицах возможен, очевидно, только для тех формул, которые могут быть выведены из закона Кулона для магнитных полюсов; все остальные формулы учения о магнитном поле выводятся из закона Био и Савара, и поэтому их преобразование производится по другому правилу, которое пояснено ниже.

К первой категории формул можно отнести, в частности, выражение для плотности энергии магнитного поля $w=\frac{\mu H^2}{8\pi}\ \frac{\textit{эрг}}{\textit{см}^3}$. Переходя для w и H к практическим единицам, заменяем согласно иному начертанию закона Кулона μ через $4\pi\mu^*$; получаем:

$$w = \frac{1}{2}\mu^* H^2 \, \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}^3}.$$

Принимая во внимание, что $\mu^* H = B$, эту формулу можно написать и в таком виде:

$$w = \frac{1}{2} BH \, \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}^3},$$

$$w = \frac{B^2}{2\mu^*} \, \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}^3}.$$

Каждая из этих трех формул может быть применена также для вычисления продольного натяжения и поперечного давления магнитных силовых линий: $p = w$. Руководствуясь последней из приведенных формул, легко получить выражение для подъемной силы магнита или электромагнита для рассмотренного на стр. 305 случая, когда зазор между полюсом и якорем исчезающе мал; учитывая что $1 \, \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}} = 0{,}102 \, \textit{кГ}$, находим:

$$F = pS = \frac{B^2}{2\mu_0^*} S \cdot 0{,}102 \, \textit{кГ}$$

(B—магнитная индукция магнита или электромагнита в $\frac{\textit{вольт-секунда}}{\textit{м}^2}$, а μ^*— указанное выше числовое выражение магнитной проницаемости вакуума в практической системе единиц).

Обратимся к закону Био и Савара и к формулам, которые вытекают из него. Измеряя m и I в абс. эл.-магн. единицах, r и l—в сантиметрах, а силу F—в динах, имеем:

$$dF_1 = \frac{m \cdot I \cdot \sin(\boldsymbol{l}, \boldsymbol{r})}{r^2} \, dl.$$

Переходя к практическим единицам и выражая r в метрах, мы должны учесть, что m в абс. эл.-магн. ед. $= \frac{10^8}{4\pi} m$ в вольт-секундах, а I в абс. эл.-магн. ед. $= \frac{1}{10} I$ в амперах. Стало быть, если m и I выражены в практических единицах, r и l— в метрах, а сила F—в динах, то в правой части формулы Био и Савара появляется коэффициент $\frac{10^5}{4\pi}$; если же силу F также выразить в практических единицах (в ньютонах), то в правой части формулы Био и Савара останется коэффициент $\frac{1}{4\pi}$.

Таким образом, в практической системе единиц

$$dF_1 = \frac{mI \cdot \sin(\boldsymbol{l}, \boldsymbol{r})}{4\pi r^2} \, dl \, \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}}. \tag{19}$$

Следовательно, применяя практическую систему единиц, во все формулы, являющиеся следствием закона Био и Савара, нужно ввести коэффициент $\frac{1}{4\pi}$. Например:

для магнитодвижущей силы вместо формулы (18) в главе X получаем:

$$\mathcal{M} = In \text{ ампервитков;}$$

для напряженности поля прямого тока вместо формулы (15) в главе X

$$H = \frac{I}{2\pi r} \; \frac{\textit{ампервиток}}{\textit{м}};$$

для напряженности в центре кругового тока вместо формулы (16) в главе X

$$H = \frac{I}{2r} \; \frac{\textit{ампервиток}}{\textit{м}}$$

Формула Гопкинсона для магнитного потока соленоида[1]) будет иметь вид

$$\Phi = \frac{In}{R_m} \text{ вольт-секунд,}$$

где R_m — магнитное сопротивление; для тороидально замкнутого соленоида

$$R_m = \frac{l}{\mu^* S}.$$

Следует заметить, что, исходя из закона Био и Савара в практических единицах и определяя действие магнитного поля на ток, мы получаем формулу Ампера в таком же начертании, как и при пользовании абс. эл.-магн. системой единиц [формула (1) в § 65]. Действительно, по закону Кулона в практических единицах [формула (16)]

$$\frac{m}{4\pi r^2} = \mu^* H = B$$

и, стало быть,

$$dF = BI \sin(\boldsymbol{I}, \boldsymbol{H}) \cdot dl \;\; \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}}.$$

Очевидно, таким образом, что все соотношения, получаемые из формулы Ампера, при использовании практической системы единиц сохраняют приведенное выше (в § 65 и др.) начертание.

Например, сила, действующая на токонесущий прямолинейный проводник длиной l со стороны перпендикулярного к нему однородного магнитного поля, равна

$$F_0 = BIl \, \frac{\textit{джоуль}}{\textit{м}},$$

где, в отличие от формулы (3) в § 65, I выражено в амперах и B—в $\frac{\textit{вольт-секунда}}{\textit{м}^2}$.

---

[1]) В формуле Гопкинсона в главе X I уже выражено в амперах; подставляя $\mu = \frac{10^7}{4\pi}\mu^*$ и выражая размеры в метрах, получаем в правой части формулы коэффициент 10^8, но 10^8 максвелл $= 1$ вольт-секунде.

Работа, производимая токонесущим проводником, когда проводник описывает в однородном поле площадь S, выразится аналогично формулам § 66:

$$A = BIS \text{ джоулей или } A = I\Phi \text{ джоулей.}$$

При выводе формул можно было бы применять только стандартизированную практическую систему единиц. Однако такое изложение учения об электричестве и магнетизме затрудняет пояснение физического смысла некоторых соотношений, в особенности соотношений электронной теории электрических и магнитных свойств веществ. Поэтому в данном курсе изложение в основном построено на применении *симметричной системы единиц Гаусса*, т. е. абсолютных электростатических единиц (CGSE) для электрических величин и абсолютных электромагнитных единиц (CGSM) для магнитных величин [1]).

Одно из крупных преимуществ симметричной гауссовой системы единиц состоит в том, что только в этой системе диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума одновременно являются безразмерными величинами, равными, в согласии с нашим представлением о вакууме, единице. Следует, однако, отметить, что при использовании гауссовой системы существует некоторая неопределенность в выборе единиц для тока и электрического сопротивления—величин, которые, собственно, с одинаковым основанием могут быть отнесены к числу электрических или же электромагнитных. Многие авторы учебных руководств, пользуясь симметричной гауссовой системой, принимают для тока и сопротивления единицы CGSE; это приводит к появлению в законе Био и Савара коэффициента $\frac{1}{c}$. Другие предпочитают (как это сделано в данной книге) при выводе формул электродинамики выражать ток в единицах CGSM. Строго же говоря, при совершенно последовательном применении симметричной гауссовой системы надо было бы ток выражать не в единицах CGSE или CGSM, а в особой единице, имеющей размерность электрического напряжения и равной (при переходе к практической системе) $\frac{10}{4\pi}$ ампер. При этом электрическое сопротивление выражалось бы безразмерными числами, в которых единица соответствовала бы 120π (=377) *ом*.

Действительно, пользуясь любой системой единиц (единой как для электрических, так и магнитных величин), легко убедиться, что отношение $\frac{E}{H}$, равное для электромагнитных волн в свободном пространстве величине $\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$, имеет размерность сопротивления. Указанную величину $\frac{E}{H}$ для электромагнитных волн называют *волновым сопротивлением*. Волновое сопротивление свободного пространства согласно формулам (15) данного параграфа и (20) § 9 равно

$$R_{\substack{\text{волн}\\ \text{своб. пр.}}} = \sqrt{\frac{\overset{*}{\mu}_0}{\overset{*}{\varepsilon}_0}} = 4\pi\cdot 30 \text{ ом} = 377 \text{ ом}.$$

Поскольку в симметричной гауссовой системе магнитная и электрическая проницаемости являются безразмерными величинами и для вакуума они равны единице, то из сказанного видно, что при последовательном применении гауссовой симметричной системы электрическое сопротивление выражается безразмерными

[1]) Такой же строй изложения принят во многих курсах физики, в частности О. Д. Хвольсона, и в фундаментальных руководствах Р. Беккера, И. Е. Тамма, Я. И. Френкеля и др.

числами, в ряду которых единица соответствует волновому сопротивлению свободного пространства, т. е. 120π *ом*. (К тому же выводу приводит аналогичный анализ и других формул электродинамики.)

Так как в гауссовой системе для электрического напряжения принимается абсолютная эл.-ст. единица потенциала, составляющая 300 *в*, то по закону Ома

$$\begin{matrix}1 \text{ абс. ед. тока} \\ \text{в симм. гаусс. системе}\end{matrix} = \frac{1 \text{ абс. ед. напр.}}{1 \text{ абс. ед. сопр.}} = \frac{300\,в}{120\,\pi\,ом} = \frac{10}{4\pi}\,a.$$

Применение этой единицы тока устраняет в формуле Гопкинсона и в ряде других формул числовые коэффициенты. Тем не менее, чтобы уменьшить число поясняемых единиц, указанную единицу тока, так же как и вышеупомянутую отвлеченную единицу сопротивления, обычно не вводят в рассмотрение (что, нужно сказать, иногда приводит к неправильным суждениям, например при интерпретации формулы $R_{\text{волн}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$).