

Классификация токов (потоков зарядов)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Неопределенность определений электрического тока.
2. Электрический ток – векторная величина.
3. Виды электрических токов и их наименования
4. Ток смещения не является потоком зарядов.
5. Определяющие уравнения для разных видов тока
6. Токовый заряд прямого тока и токовый контур.
7. Токовый заряд непрямого тока.
8. Дипольный заряд магнитного поля (магнитный момент)
9. Магнитный заряд – другое название токового заряда.
10. Гравитационный ток и некорректные электрогидравлические аналогии

1. Неопределенность определений электрического тока.

Если объединить все определения электрического тока, обнаруженные автором, то их можно объединить так: *электрический ток – это упорядоченное направленное движение электрически заряженных частиц, называемых носителями тока*. Такое определение описывает электрический ток, как физическое явление. Когда же мы переходим к физической величине, характеризующей это явление, то сталкиваемся с другим термином “сила тока”, обозначаемым символами I или i . Часто термин “сила тока” сокращается до одного слова “ток”.

БСЭ определяет **электрический ток**, как “упорядоченное (направленное) движение электрически заряженных частиц или заряженных макроскопических тел“. В этом определении объединяются, к сожалению, два разных физических явления: движение зарядов в неподвижном проводнике, то есть в проточной системе, количество элементарных зарядов в которой не изменяется при изменении тока, и движение заряженного тела вместе с зарядами (то есть движение непроточной системы с элементарными зарядами, неподвижными относительно этой системы).

В метрологическом справочнике А.Чертова (1990) силой тока называется “*скалярная физическая величина, равная отношению количества электричества dq , переносимого через сечение проводника за интервал времени dt , к этому интервалу*”, то есть

$$i = dq/dt \quad . \quad (1)$$

Однако скалярное выражение (dq/dt) характеризует скорость изменения заряда системы q (количества элементарных зарядов в системе), а вовсе не движение элементарных зарядов через проводник. К тому же, изменение количества элементарных зарядов в теле может происходить и при отсутствии электрического тока, например, при спонтанном радиоактивном распаде внутри заряженной системы или при накоплении статического электричества на поверхности системы.

Иная картина при движении элементарных зарядов (электронов проводимости) в проводнике. Количество элементарных зарядов, входящих в проводник, равно количеству элементарных зарядов, выходящих из проводника, вследствие чего их суммарное количество в проводнике (заряд системы) $q = \text{const}$, то есть в проводнике $dq/dt = 0$.

2. Электрический ток – векторная величина.

Электрический ток в проводнике является направленным электронов, поэтому их поток является величиной векторной. Это признается и современной электродинамикой, когда векторной величиной считают **плотность тока**

$$\mathbf{j} = di/dS \quad (2)$$

в котором \mathbf{i} является **электрическим током**. Анализ величин, определяющих состояние проточной системы, показывает, что ток является линейной плотностью перемещающегося заряда и должен определяться уравнением:

$$\mathbf{i} = (q_n \mathbf{v})/l \quad (3)$$

в котором q_n – количество элементарных зарядов, перемещающихся через неподвижный проводник, \mathbf{v} – их скорость, а l – длина проводника. Из уравнения (3) следует, что стандарт, из которого взято определение для справочника А.Чертова (1990), нуждается в исправлении.

В современной физике происходит непонятное преобразование. Для определения плотности тока сначала применяют уравнение

$$\mathbf{j} = j \mathbf{n} = (di/dS) \mathbf{n} \quad (4)$$

в котором \mathbf{n} – орт нормали к площадке dS . А затем записывают уравнение для электрического тока, как для потока вектора плотности тока в виде:

$$i = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \int_S j \cdot (dS \mathbf{n}) \quad (5)$$

Причиной ввода абстрактного вектора площадки $d\mathbf{S} = (dS \mathbf{n})$ в уравнение (5) является, возможно, то обстоятельство, что в векторном анализе нет операции деления на вектор, а в уравнении (4) dS находится в знаменателе. Но определять электрический ток i , являющийся аргументом в уравнении (4), по плотности тока \mathbf{j} , являющейся функцией в этом уравнении, можно только грубо нарушая принцип причинности.

Не электрический ток является следствием объёмной плотности движущихся электронов, а объёмная плотность \mathbf{j} является следствием электрического тока \mathbf{i} , как векторной величины.

Логично обозначать символом \mathbf{I} электрический ток в полеобразующих заряженных системах, а символом \mathbf{i} – электрический ток в полевых заряженных системах.

3. Виды электрических токов и их наименования

Электрический ток считают потоком электрически заряженных энергоносителей. Заметим, что электрический ток – лишь один из вариантов потока зарядов. Понятие “поток зарядов” может быть отнесено также и к потоку гравитационных зарядов, то есть к потоку гравитационных масс. Приведем стандартные определения видов тока.

1. Электрический ток проводимости. Метрологический справочник А.Чертова (1990) приводит такое определение тока проводимости: “*явление направленного движения свободных носителей заряда в веществе или в вакууме*”.

2. Электрический ток переноса. Определяется в справочнике А.Чертова (1990) как “*электрический ток, осуществляемый переносом электрических зарядов телами*”. Имеет еще одно, не совсем удачное название: **конвекционный ток**.

3. Электрический ток зарядки (разрядки). Для этого тока стандартного определения нет. Этот вид тока можно рассматривать, как ток проводимости, когда

элементарные заряды входят из окружающей среды в непроточную систему (или выходят в обратном направлении) при отсутствии равновесия между средой и системой. При этом внутри непроточной системы существует поток зарядов, связанный с выравниваем плотности зарядов внутри системы. Частным случаем тока зарядки является **электрический ток поляризации**, связанный с зарядкой (разрядкой).

4. Основная величина, характеризующая электрический ток, имеет в стандарте такое название – **сила тока**. В словосочетании “сила тока“ применения термина “сила“ некорректно, правильно говорить “интенсивность тока“.

5. Имеются еще два очень распространенных понятия: “**постоянный ток**“ и “**переменный ток**“. Оба эти понятия неверны.

4. Ток смещения не является током зарядов.

Понятие “ток смещения” введено Д.Максвеллом в уравнении:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t = \mathbf{j} + \mathbf{j}_d, \quad (6)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля; \mathbf{j} – плотность электрического тока проводимости; \mathbf{D} – электрическое смещение в поле сторонних зарядов; \mathbf{j}_d – плотность тока смещения.

Однако первое слагаемое \mathbf{j} не является плотностью электрического тока проводимости. Вместо вектора \mathbf{j} должен находиться вектор объемной плотности связанных токовых зарядов в проводнике $\boldsymbol{\rho}$. Искусственная замена $\boldsymbol{\rho}$ на \mathbf{j} основана в современной физике на том, что размерности этих величин одинаковы. Но это не говорит о совпадении физического содержания, замена $\boldsymbol{\rho}$ на \mathbf{j} некорректна. Для нестационарного (переменного) магнитного поля уравнение (6) должно иметь вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \boldsymbol{\rho} + \mathbf{f}(\boldsymbol{\rho}, t), \quad (7)$$

где $\mathbf{f}(\boldsymbol{\rho}, t) = \partial \mathbf{D} / \partial t$. – векторная функция изменения во времени объемной плотности сторонних электрических зарядов ρ в диэлектрике, окружающем проводник. Из другого уравнения Максвелла ($\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$) вытекает, что $\operatorname{div}(\partial \mathbf{D} / \partial t) = \partial \rho / \partial t$, что приводит Обратное преобразование приводит к уравнению

$$\partial \mathbf{D} / \partial t = (\partial \rho / \partial t) \mathbf{e}_D, \quad (8)$$

в котором \mathbf{e}_D – орт электрического смещения \mathbf{D} в поле сторонних зарядов в среде, окружающей проводник. Сам Д.Максвелл имел в виду переменную поляризацию диэлектрика при воздействии на него переменной составляющей электрического поля, а вовсе не электрический ток, аналогичный току проводимости. Из уравнения (8) следует, что уравнение (6) должно иметь вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \boldsymbol{\rho} + (\partial \rho / \partial t) \mathbf{e}_D. \quad (9)$$

Уравнение (9) и есть уточненная запись уравнения (6). В современной физике при разъяснении уравнения (6) обычно приводят пример с зарядкой конденсатора, увязывая величину плотности тока проводимости \mathbf{j} в проводнике, подключенном к обкладке конденсатора, с плотностью тока зарядки конденсатора, а величину \mathbf{D} – с электрическим смещением в диэлектрике между обкладками конденсатора. Но уравнение (9) показывает, что на самом деле речь идет о переменном изменении объемной плотности токовых зарядов $\boldsymbol{\rho}$ в проводниках, ведущих к обкладкам конденсатора, и в самом теле обкладок, а также о переменном изменении объемной плотности статических зарядов ρ в диэлектрической среде между обкладками.

То, что было названо Д.Максвеллом плотностью тока смещения является **направленным переменным изменением объемной плотности статических зарядов в диэлектрике**. Но эти изменения объемной плотности зарядов в диэлектрике нельзя назвать электрическим током, так как в диэлектрике нет электронов проводимости.

Попутно становится понятным и то, почему так называемый “ток смещения” не сопровождается выделением теплоты в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Ведь “ток смещения” в реальности не существует, он не имеет никакого отношения к направленному движению свободных носителей заряда.

5. Определяющие уравнения для разных видов тока

Из определяющих уравнений для первых трех перечисленных видов электрического тока следует, что любой из них является векторной величиной. Уравнения приведены ниже в таблице. Обозначения видов токов в таблице и в пояснениях к ней индексированы, хотя на практике никакой индексации нет.

Вид тока	Обозначение	Вид заряженной системы	Определяющее уравнение
Ток проводимости	\mathbf{i}_m	Проточная	$(\mathbf{i}l) / l$
Ток переноса	\mathbf{i}_v	Непроточная	$(q\mathbf{v}) / x$
Ток зарядки (разрядки)	\mathbf{i}_e	Непроточная	$(\mathbf{i}R) / R$

Ток проводимости \mathbf{i}_m является линейной плотностью токового заряда ($\mathbf{i}l$).

Ток переноса \mathbf{i}_v , как термин, является следствием искусственного смешения близких по содержанию терминов. В электродинамике движущийся заряд определяется выражением $(q\mathbf{v})$, а x - перемещение заряженной системы. Движущийся заряд $(q\mathbf{v})$ имеет такую же размерность, как и токовый заряд ($\mathbf{i}l$). Именно по этой причине в словосочетание “ток переноса” искусственно введен термин “ток”. На самом деле электроны через движущуюся заряженную систему или внутри нее не текут.

Ток зарядки (разрядки) \mathbf{i}_e является током проводимости, существующим только в период переходного процесса в непроточной системе (в уединенном проводнике) при выравнивании плотности зарядов в системе.

Все токи в таблице имеют одинаковую размерность и одинаковую природу, это всё движение элементарных зарядов. Но различие в определяющих уравнениях указывает на различие в физическом содержании этого движения и в методике определения.

6. Токовый заряд прямого тока и токовый контур.

Рассмотрим поток элементарных зарядов, протекающих через прямолинейный участок проводника. В электродинамике такой поток называют **прямым током**. Произведение прямого тока на длину участка (Il) называют **токовым зарядом прямого тока** или просто **токовым зарядом**, так как он является причиной возникновения магнитного поля.

Токовый заряд является разновидностью динамического заряда $Q = (Il)$, другой разновидностью которого является движущийся заряд $(q\mathbf{v})$. Размерности у токового заряда (Il или $\mathbf{i}l$) и у движущегося заряда ($Q\mathbf{v}$ или $q\mathbf{v}$) одинаковы.

Любые токовые заряды существуют только в проточных системах, а проточная система всегда находится между системой-источником и системой-стоком. Особенность токового контура заключается в том, что система "источник заряда" и система "сток заряда" объединены в единую систему, называемую **источником тока**. Источник тока и служит причиной возникновения тока зарядов в контуре. Объединение источника тока с проводником создает замкнутую проточную систему, называемую **токовым контуром**.

Поэтому ток в контуре можно назвать **контурным током**. В принципе, другого тока быть не может. Местонахождение источника тока внутри контура роли не играет.

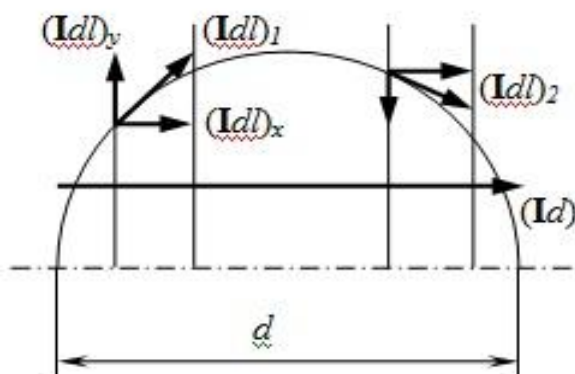
Контуры различают **плоские** (лежащие в одной плоскости) и **пространственные**. По конфигурации можно выделить два частных случая плоских контуров: **прямоугольные** контуры и **круговые** контуры. Все другие конфигурации контура в процессе обобщения можно свести к этим двум.

Токовый заряд прямого тока не существует вне **токового контура**, так как длина l , присутствующая в выражении для токового заряда, является лишь частью длины контура. По отношению к любому токовому заряду на противоположной стороне токового контура всегда имеется другой, равный ему токовый заряд противоположного знака. Оба противоположно расположенных в контуре токовых заряда составляют **токовый диполь**.

Токовый контур всегда замкнут, поэтому токовый заряд на отдельном участке контура рассматривают мысленно, исключая из рассмотрения так называемые краевые эффекты. Закон Ампера взаимодействия токов выведен для двух параллельных токовых зарядов прямого тока бесконечной длины.

7. Токовый заряд непрямого тока.

Под **токовым зарядом непрямого тока** понимается токовый заряд в криволинейном проводнике. На рисунке показана половина контура круговой формы (одна ветвь контура), хотя конфигурация контура, в принципе, роли не играет.



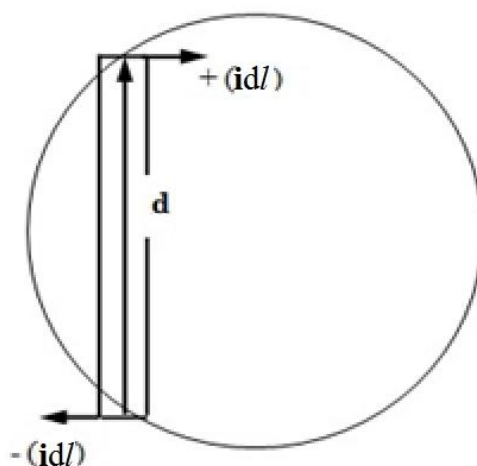
Разобьем мысленно половину контура на элементарные участки, как показано на рисунке. Затем разложим элементарные токовые заряды прямого тока $(\mathbf{I} d\mathbf{l})$ на составляющие, параллельные и перпендикулярные оси симметрии контура. Геометрическая сумма всех составляющих элементарных токовых зарядов прямого тока, перпендикулярных оси симметрии $(\mathbf{I} d\mathbf{l})_y$, как это видно из рисунка, равна нулю. Геометрическая сумма всех составляющих элементарных токовых зарядов $(\mathbf{I} d\mathbf{l})_x$, параллельных оси симметрии, равна $(\mathbf{I} d)$, где d – максимальная длина токового заряда непрямого тока (для кругового контура d – это диаметр окружности). Геометрическая сумма токовых зарядов непрямого тока $(\mathbf{I} d)$ двух половин контура также равна нулю, поскольку ток в обеих ветвях контура противоположен по направлению.

Любые два противоположные по направлению и находящиеся на противоположных ветвях контура элементарные токовые заряды создают **токовый диполь**

8. Дипольный заряд магнитного поля (магнитный момент)

Каждый токовый диполь создает вихревое поле со своим собственным токовым **дипольным зарядом**, направленным перпендикулярно плоскости контура, который можно назвать **дипольным моментом**. Но в современном электромагнетизме его называют иначе (**магнитным моментом**) и обозначают символом \mathbf{p}_m .

Для определения дипольного момента представим круговой контур в виде суммы i элементарных контуров, ширина которых равна dl , но с разными значениями **ДИПОЛЬНЫХ**



расстояний в виде вектора \mathbf{d} .

Дипольный момент любого i -го элементарного токового диполя будет равен

$$(\mathbf{p}_m)_i = [(\mathbf{I} dl) \mathbf{d}_i] . \quad (10)$$

Дипольный момент всего контура можно получить путем интегрального суммирования дипольных моментов элементарных токовых диполей, составляющих круговой контур:

$$\mathbf{p}_m = \int_i (\mathbf{p}_m)_i = \int_i [(\mathbf{I} dl) \mathbf{d}_i] . \quad (11)$$

В современной физике отсутствует понятие о токовом заряде, и поэтому круглые скобки можно раскрыть, выражение для токового заряда $(\mathbf{I} dl)$ записать как $(I dl)$. И после этого ток I уже как скалярную величину вынести за знак интеграла, а уравнение (10) преобразовать к виду

$$\mathbf{p}_m = I \int dl d_i [\mathbf{e}_l \mathbf{e}_d] = I \int_i \mathbf{n} dl d_i = I S_{cn} \mathbf{n}_{cn} , \quad (12)$$

где \mathbf{e}_l – орт прямолинейного участка контура, \mathbf{e}_d – орт дипольного расстояния, \mathbf{n}_{cn} – орт, перпендикулярный плоскости контура, и S_{cn} – площадь кругового контура. Таким образом можно придти к определяющему уравнению для **магнитного момента** в современной электродинамике. Правда, при таком математическом преобразовании теряется из виду векторный характер электрического тока, что приводит к неверному выводу о том, что электрический ток является скалярной величиной.

Переход от токовых зарядов прямого тока к токовым зарядам непрямого тока и, наконец, к дипольному моменту означает качественный скачок в рассмотрении токовых зарядов, так как вихревое (магнитное) поле, создаваемое токовым диполем, своею направленностью и конфигурацией отличается от вихревого поля, создаваемого токовым зарядом прямого тока.

9. Магнитный заряд – другое название токового заряда.

Введение понятия “**токовый заряд**“ разъясняет суть дискуссии о “**магнитном заряде**“ (**магнитном монополе, монополе Дирака**). Причиной дискуссии является неопределенность понятия “заряд магнитного поля”.

Теорема Остроградского-Гаусса, примененная к магнитному полю токового контура, доказывает, что магнитного заряда в природе нет. О.Репченко (2008) считает, что “...

равенство нулю дивергенции магнитного поля является не эмпирическим законом, а представляет собой абсолютное тождество. Магнитных зарядов в принципе не может существовать, потому что магнитное поле не является самостоятельным физическим полем, а суть сила инерции.“ Последние слова этой цитаты терминологически неверны: сила инерции является физической величиной, а магнитное поле ею не является. Да и речь идет об инерции электромагнитного поля, в котором роль силы инерции выполняет ЭДС самоиндукции, которая является следствием нестационарности магнитного поля, а следствие нельзя приравнивать причине.

Существование магнитного монополя как частицы с магнитным зарядом предсказывается гипотезой П.Дирака, хотя экспериментальных подтверждений этой гипотезы нет, несмотря на не прекращающиеся усилия экспериментаторов. К тому же, в физике широко применяется термин “магнитный диполь“, самим своим существованием намекающий на то, что должен быть и магнитный монополь. Ибо диполь должен состоять из двух монополей.

Близко к истине подошел А.Чуев (1999), предложивший считать причиной возникновения магнитного поля не гипотетическую частицу, а “токовый элемент“, именуемый в данной статье токовым зарядом. Его предложение однозначно говорит о том, что источником магнитного поля является физическая величина, а не материальная частица.

Систематизация величин физического поля показывает, что проблема магнитного заряда возникла искусственно из-за терминологической неопределенности и некритического переноса понятий математической теории векторного анализа в физику.

Можно поставить вопрос в другой плоскости: чем является заряд системы в любой форме физического поля – источником линий напряженности, не совсем точно называемых силовыми линиями, или причиной возникновения физического поля? Ответ ясен: заряд системы является причиной возникновения физического поля. Лишь в частном случае (в центральном поле) он является источником силовых линий. Но магнитное поле является вихревым, и поэтому в нем нет источника силовых линий.

Ссылка на теорему Остроградского-Гаусса в рассматриваемом случае не объективна, эта теорема ***указывает на отсутствие у вихревого поля источников силовых линий, а вовсе не на отсутствие зарядов, являющихся причиной возникновения вихревого поля.***

Токовый заряд прямого тока (I) является причиной возникновения магнитного поля. Различие между токовым зарядом и электрическим зарядом заключается в том, что электрический заряд является материальным объектом, а токовый заряд является физической величиной, определяемой выражением, включающим в себя материальные объекты (электрический ток и прямой участок проводника элементарной длины).

Любой токовый контур состоит из двух половин. Любая половина контура имеет токовый заряд, противоположный по знаку токовому заряду другой половины того же контура, так что суммарный токовый заряд любого контура равен нулю. Вот это равенство и является основой ошибочного утверждения, что магнитных зарядов нет вообще. На самом же деле равен нулю магнитный заряд замкнутого контура, а отдельные элементарные участки контура имеют свой токовый, значит, магнитный заряд.

Термин “магнитный заряд“ в какой-то мере даже удобно применять как с точки зрения физики, так и с точки зрения педагогики, когда речь идет о конкретном магнитном поле. Надо только при этом помнить и разъяснять, что он является производной физической величиной (I), а не материальным объектом, и поэтому “пощупать“ его невозможно. Геометрическая сумма магнитных зарядов контура всегда равна нулю. И это никак не противоречит теореме Остроградского-Гаусса.

Искать в природе опытным путем магнитный заряд, как материальный объект, так же бессмысленно, как искать, например, материальный эквивалент такой физической величины, как импульс тела. К слову, импульс тела тоже является токовым зарядом,

только он является причиной возникновения вихревого гравитационного поля, называемого гравидинамическим полем.

История с поиском магнитного заряда – наглядное подтверждение ошибочности подхода, когда физические явления пытаются объяснить только с помощью математической теории, игнорируя физическое содержание. С другой стороны, эта история хорошо иллюстрирует философский закон развития по спирали. Такие понятия, как магнитный заряд (магнитная масса), введенные в физику в XIX веке и отвергнутые ею в XX веке, должны вернуться в физику в XXI веке, но уже в новой трактовке.

10. Гравитационный ток и некорректные электрогидравлические аналогии

В аэродинамике и гидродинамике зарядом поля q является масса движущейся частицы m . Но под массой m обычно понимают инертную массу m_{in} , под которой понимается не масса тела, а его инертность при прямолинейном движении. Если применить аналогию электрического заряда q с инертной массой m_{in} , то аналогом электрического тока $\mathbf{i} = d\mathbf{q}/dt$ станет несуществующая физическая величина с модулем dm_{in}/dt . Тогда как реальной физической величиной, описывающей поток гравитационных зарядов, является массовый расход $\mathbf{Q}_m = (dm/dt) \mathbf{e}_Q$.

В гидродинамике, где плотность жидкости условно постоянна, массовый расход \mathbf{Q}_m обычно делят на плотность жидкости, получая **объемный расход** \mathbf{Q}_V . При этом наблюдается еще больший отход от физического содержания, ибо любой объем, как математическая величина, бестелесен и сам по себе перемещаться не может. В итоге аналогом плотности электрического тока \mathbf{j} становится в гидродинамике средняя скорость неизвестно чего, так как плотность жидкости, а вместе с ней и масса частиц жидкости, изъяты из рассмотрения.

Литература

1. Репченко О.Н., 2008, Полевая физика или как устроен Мир? Изд.2-е. –М.: Галерея,320 с.
2. Чертов А.Г., 1990, Физические величины. – М.: Высшая школа, 336 с.
3. Чуев А.С., 1999, Физическая картина мира в размерности “длина-время”. Серия “Информатизация России на пороге XXI века”. – М., СИНТЕГ, 96 с., также Естественная кинематическая система размерностей. <http://www.chuev.narod.ru/> .