

ЗАКОН БИО – САВАРА – ЛАПЛАСА КАК СЛЕДСТВИЕ ЭНЕРГОДИНАМИКИ

Д.т.н., проф. В.А.Эткин

В статье предложен теоретический вывод закона Био–Савара–Лапласа из первых принципов энергодинамики. При этом вскрыта торсионная природа магнитного поля и опровергнуто мнение о том, что магнитная составляющая силы Лоренца не совершает работы

Введение. После открытия Эрстедом влияния постоянного тока на ориентацию магнитной стрелки и замечательных экспериментов Ампера (1820), позволивших представить эту зависимость в количественной форме, потребовалось обобщить эти данные на случай электрических контуров произвольной конфигурации. Таким обобщением стал закон Био–Савара–Лапласа [1].

Обычно этот закон рассматривается как следствие уравнений Максвелла, которые считаются не выводимыми из каких-либо первичных принципов. С появлением энергодинамики, позволившей получить эти уравнения как следствие преобразования электрической энергии в магнитную в замкнутых электрических и магнитных контурах произвольной конфигурации, закон Био–Савара–Лапласа стало возможным трактовать как следствие единых законов преобразования любых форм энергии [2,3]. При этом возникает естественное желание получить закон Био–Савара–Лапласа непосредственно из первых принципов энергодинамики, минуя уравнения электромагнитного поля. Решение этой задачи и составляет содержание настоящей статьи.

Энергодинамический вывод закона Био–Савара–Лапласа. Рассмотрим произвольный электрический контур с током I_e , находящийся во внешнем магнитном поле \mathbf{B} и совершающий под действием этого поля поворот на угол φ_e . Согласно закону сохранения энергии, процессы в рассматриваемой системе описываются уравнением (в пренебрежении диссипацией) [2]:

$$d\mathcal{E} = -\mathbf{X}_e \cdot d\mathbf{Z}_e - \mathbf{M}_e \cdot d\varphi_e = 0, \quad (1)$$

где \mathcal{E} – полная энергия системы; \mathbf{X}_e – электродвижущая сила (эдс); \mathbf{Z}_e – момент распределения заряда в контуре; \mathbf{M}_e – крутящий (ориентационный) момент, действующий на рамку с током со стороны поля \mathbf{B} .

В общем случае изменение этого момента распределения заряда \mathbf{Z}_e является следствием трёх независимых процессов:

- 1) процесса ввода в систему (контур с током) электрического заряда Q при неизменном положении контура в пространстве;
- 2) процесса переноса заряда Q в контуре при неизменном угле φ_e между плоскостью рамки с током и направлением внешнего магнитного поля \mathbf{B}), т.е. протекания в контуре тока с плотностью \mathbf{j}_e ;
- 3) процесса переориентации контура с током в пространстве (например, при повороте рамки с током на угол $d\varphi_e$) и изменением в связи с этим направления вектора плотности электрического тока \mathbf{j}_e .

Все три указанных процесса описываются с позиций энергодинамики [2] полной производной $d\mathbf{Z}_e/dt$ по времени t от единственного момента \mathbf{Z}_e , характеризующего отклонение системы от равномерного распределения в нем заряда. Согласно уравнению (1), обобщенная скорость этого процесса выражается соотношением:

$$d\mathbf{Z}_e/dt = -(\mathbf{M}_e/\mathbf{X}_e) d\varphi_e/dt. \quad (2)$$

Для установления связи между током \mathbf{j}_e и порождающим этот процесс крутящим моментом \mathbf{M}_e выразим это момент через его плотность $\mathbf{m}_e = (\partial\mathbf{M}_e/\partial V)$ и расстояние r от точки приложения магнитной составляющей силы Лоренца \mathbf{F}_e до центра элемента объема dV с током \mathbf{j}_e :

$$\mathbf{M}_e = \int \mathbf{F}_e r dV. \quad (3)$$

С другой стороны, поток $\mathbf{J}_e \equiv d\mathbf{Z}_e/dt$ также можно выразить через плотность тока $\mathbf{j}_e = \rho_e \mathbf{v}_e$, где \mathbf{v}_e – скорость переноса элемента заряда $d\Theta_e = \rho_e dV$, заключенного в объеме dV :

$$\mathbf{J}_e = \int \mathbf{j}_e dV = \int \rho_e \mathbf{v}_e dV \quad (4)$$

С учетом (2)...(4), находим:

$$\int (\mathbf{j}_e/r) dV = - (\mathbf{F}_e/\mathbf{X}_e) d\phi_e/dt. \quad (5)$$

Нетрудно видеть, что интеграл в левой части (5) определяет (с точностью до постоянного множителя $1/4\pi\epsilon_0 c^2$) векторный магнитный потенциал \mathbf{A} [1]:

$$\mathbf{A} = (4\pi\epsilon_0 c^2)^{-1} \int (\mathbf{j}_e/r) dV, \quad (6)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; c – скорость света.

Учитывая, что $\mathbf{B} \equiv \text{rot } \mathbf{A}$ и выражая \mathbf{j}_e через полный ток \mathbf{I}_e и элемент длины контура $d\ell$ соотношением $\mathbf{j}_e dV = \rho_e \mathbf{v}_e dV = \mathbf{I}_e \cdot d\ell$, после операции взятия ротора (относящейся в данном случае только к переменной r), непосредственно приходим к закону Био-Савара в его векторной форме:

$$d\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{I}_e \cdot [d\ell, \mathbf{r}] / 4\pi r^3, \quad (7)$$

где $\mu_0 = c^2 \epsilon_0^{-1}$ – коэффициент магнитной проницаемости пустоты.

Согласно этому закону, вклад элемента длины $d\ell$ контура с током \mathbf{I}_e в магнитное поле \mathbf{B} на расстоянии r от этого элемента пропорционален силе тока \mathbf{I}_e и обратно пропорционален квадрату этого расстояния. Что же касается направления этого вектора, то оно нормально к плоскости, образованной векторами $d\ell$ и \mathbf{r} , и совпадает с направлением касательной к линии магнитной индукции. Это направление может быть найдено по правилу правого винта: направление вращения головки винта дает направление $d\mathbf{B}$, если поступательное движение буравчика соответствует направлению тока в элементе $d\ell$.

Обсуждение результатов. При выводе закона Био-Савара из первых принципов энергодинамики становится совершенно очевидным, что магнитное поле имеет вихревой характер, при котором крутящий момент \mathbf{M}_e исчезает при определенной ориентации контура с током. Именно это свойство и было обнаружено Эрстедом. О нем же свидетельствовала и переориентация железных опилок в поле постоянных магнитов. Этот момент предполагает наличие предпочтительной системы отсчета, которую сторонники СТО и ОТО стараются не замечать.

Другой вывод касается интерпретации векторного потенциала \mathbf{A} . Как показано в [4], векторный потенциал \mathbf{A} пропорционален угловой скорости $\boldsymbol{\omega}_e$ вращения элемента тока в обмотке соленоида и совпадает по направлению с этим током:

$$\mathbf{A} = 3\mu_0 \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{e} / 4\pi, \quad (8)$$

где $3 = \int \rho_e dV$ – суммарный заряд, движущийся в обмотке соленоида (величина, пропорциональная числу ампер-витков). При этом плотность заряда ρ_e , как и плотность тока проводимости \mathbf{j}_e , отличны от нуля только на радиусе обмотки r , т.е. оказываются смещенными относительно центра соленоида. Вследствие этого любой элементарный заряд $\rho_e dV$ оказывается удаленным от оси соленоида на расстояние r , образуя элементарный момент его распределения $d\mathbf{Z}_e = \rho_e \mathbf{r}_e dV$. Под действием момента \mathbf{M}_e вектор $d\mathbf{Z}_e$ непрерывно меняет свою ориентацию в пространстве, вращаясь с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}_e = d\phi_e/dt$. Это и отражает соотношение (8), согласно которому векторный потенциал \mathbf{A} не зависит от радиуса соленоида r и возникает только тогда, когда вектор скорости электронов \mathbf{v}_e изменяет свою

ориентацию в пространстве¹⁾. Таким образом, с позиций энергодинамики векторный магнитный потенциал определяется единым с другими потенциалами образом как производная от энергии системы \mathcal{E} по одной из независимых координат состояния (в данном случае по электрическому заряду Z):

$$\boldsymbol{\omega}_e \equiv (\partial \mathcal{E} / \partial \mathbf{L}_e), \quad (9)$$

где $\mathbf{L}_e = I_e \boldsymbol{\omega}_e$ – момент импульса вращательного движения заряда; I_e – момент инерции контура с током. Поэтому величину $\boldsymbol{\omega}_e$ можно считать «*электродинамическим потенциалом*». Этот потенциал имеет очень простой физический смысл и полностью определен, поскольку угловая скорость электронов $\boldsymbol{\omega}_e$ и момент их импульса \mathbf{L}_e задается единственным образом. Хотя он отличается от магнитного потенциала \mathbf{A} своей размерностью и направлением (по оси вращения, а не в направлении замкнутого тока), его введение не противоречит известным опытным фактам [4].

Ещё одним важным следствием предпринятого рассмотрения является опровержение общепринятого положения, согласно которому магнитная составляющая силы Лоренца не совершает работы, поскольку она всегда направлена по нормали к траектории движения электрона. Между тем, как следует из закона сохранения энергии (1), на контур в целом действует не сила, а момент сил \mathbf{M}_e , который и совершает работу по вращению рамки с током или ротора электродвигателя [5]. Иными словами, магнитное поле – это поле крутящих (ориентационных) моментов, и этим объясняется и переориентация магнитных стрелок в опытах Эрстеда, и вихревой характер поля в уравнениях Максвелла, и возникновение ЭДС в замкнутом контуре, и поперечный характер магнитной силы Лоренца, и действие генераторов тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фейнман Р.П. и др.* Фейнмановские лекции по физике. Т.6.- М.: «Мир», 1977.
2. *Эткин В.А.* Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии).- СПб: «Наука», 2008. 409 с.
3. *Эткин В.А.* Термодинамический вывод уравнений Максвелла.
<http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/12282.html> .11.10.2012.
4. *Эткин В.А.* О смысле векторного потенциала.
<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/12770.html> .3.04.2013.
5. *Эткин В.А.* Вывод выражения силы Лоренца из уравнений Максвелла
<http://vixra.org/abs/1208.0013> .04.08.2012.

¹⁾ В этом отношении векторный потенциал прямолинейного проводника является предельным случаем соленоида с бесконечно большим радиусом.