

ELECTROMAGNETIC POTENTIAL OF ROTATING CURRENTS

Etkin V.A.

Existence of vector potential of rotating currents and unity of its analytical expression with other potentials is shown. The sense of this potential as angular speed of rotation of a current is opened and its communication with work is found

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТОКОВ

Д.т.н., проф. В.Эткин

Показано существование векторного потенциала вращающихся токов и единство его аналитического выражения с другими потенциалами. Вскрыт смысл этого потенциала как угловой скорости вращения тока и найдена его связь с работой

Введение. В современной физике существует точка зрения, согласно которой векторный потенциал \mathbf{A} следует рассматривать как вспомогательную величину, не допускающую ввиду его неоднозначности прямого измерения [1]. Попытки раскрыть физический смысл этого потенциала и освободиться от его неоднозначности путем наложения дополнительных условий (калибровок) Кулона, Пуанкаре, Лоренца, Ландау, Лондонов, Вейля, Фока — Швингера и т.п. не дали удовлетворительных результатов [2]. Поэтому до сих пор преобладает мнение, что векторный потенциал магнитного поля не имеет какого-либо физического смысла. Отсутствие способа измерения величины векторного потенциала и неясность его связи с работой, производимой магнитным полем, породили настороженное отношение к нему в электротехнике и радиотехнике, избегающих применения этого понятия. Между тем именно от этого потенциала зависит силовое взаимодействие токонесущих систем. К тому же введен он был в своё время Ампером именно на основе наблюдения силового взаимодействия в таких системах.

Целью настоящей статьи является преодоление трудностей интерпретации этого понятия и его неоднозначности с позиций энергодинамики как более общей теории, устанавливающей единство явно различных сил и совершаемых ими работ [3].

1. Скалярные и векторные потенциалы. Энергодинамика изучает пространственно неоднородные системы с неравномерным распределением по её объёму V параметров Θ_i (энтропии S , массы M , числа молей k -х веществ N_k , заряда Z и т.п.). Такие системы могут удаляться от состояния внутреннего равновесия при совершении над системой работы W^T и самопроизвольно приближаться к нему при релаксации. Это свидетельствует о наличии у таких систем дополнительных степеней свободы и необходимости введения соответствующих им параметров их пространственной неоднородности.

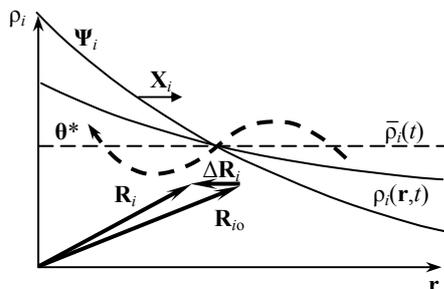


Рис. 1.1. К образованию момента распределения.

Для того, чтобы найти такие координаты, рассмотрим произвольную систему (рис. 1), в которой плотность $\rho_i(\mathbf{r}, t) = \partial\Theta_i/\partial V$ любого параметра Θ_i и значения сопряженного с ним потенциала $\Psi_i(\mathbf{r}, t)$ как функций радиус-вектора \mathbf{r} точки поля и времени t распределены по системе так, как указано на нем. Как следует из рисунка, при отклонении распределения Θ_i от равномерного с плотностью $\bar{\rho}_i(t)$ некоторое количество этой величины Θ_i^* переносится из одной части системы в другую в направлении, указанном стрелкой. Такое «перераспределение» носителя i -й формы энергии Θ_i сопровождается смещением центра его величины Θ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) из первоначального положения \mathbf{R}_{i0} в текущее \mathbf{R}_i . Эти положения определяются известным образом:

$$\mathbf{R}_i = \Theta_i^{-1} \int \rho_i(\mathbf{r}, t) \mathbf{r} dV, \quad \mathbf{R}_{i0} = \Theta_i^{-1} \int \bar{\rho}_i(t) \mathbf{r} dV. \quad (1)$$

Отсюда следует, что отклонение системы от однородного состояния сопровождается возникновением «моментов распределения» \mathbf{Z}_i энергоносителей Θ_i :

$$\mathbf{Z}_i = \Theta_i \Delta \mathbf{R}_i = \int_V [\rho_i(\mathbf{r}, t) - \bar{\rho}_i(t)] \mathbf{r} dV, \quad (2)$$

где $\Delta \mathbf{R}_i = \mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{i0}$ – вектор смещения центра координаты Θ_i . Элементарное изменение этого вектора можно представить в виде суммы двух слагаемых, первое из которых $d\mathbf{r}_i = \mathbf{e}_i dR_i$ характеризует его удлинение, а другое, $R_i d\mathbf{e}_i$ – изменение его направления, задаваемого единичным вектором \mathbf{e}_i . Последнее слагаемое удобнее выразить через изменение пространственного угла $\boldsymbol{\varphi}$, характеризующего это направление, внешним произведением $\boldsymbol{\varphi}_i \times \mathbf{e}_i$. Это позволяет представить полный дифференциал момента распределения \mathbf{Z}_i в виде суммы трех независимых слагаемых:

$$d\mathbf{Z}_i = \mathbf{R}_i d\Theta_i + \Theta_i d\mathbf{r}_i + d\boldsymbol{\varphi}_i \times \mathbf{Z}_i. \quad (3)$$

Каждое из них характеризует одну из трех групп независимых процессов, протекающих в пространственно неоднородных средах. Первую группу образуют процессы, протекающие в условиях $\mathbf{R}_i = \text{const}$. Они характеризуются равномерным изменением физической величины Θ_i во всех частях системы и напоминают равномерное выпадение осадков на неровную (в общем случае) поверхность. Частным случаем таких процессов являются процессы обратимого теплообмена, массообмена, объемной деформации и т.п., изучаемые классической термодинамикой.

Другая группа процессов обусловлена смещением $d\mathbf{r}_i$ центра величины Θ_i без изменения самой этой величины. Они сопровождаются уменьшением её плотности ρ_i в одной части системы и увеличением – в другой, и потому напоминают перекачку текучих материалов из одной части сосуда в другую. Такие «противонаправленные» процессы мы назвали *процессами перераспределения* [3].

Третье слагаемое в (3) характеризует поворот вектора \mathbf{Z}_i (или самого тела при наличии анизотропии его формы) на пространственный угол $d\boldsymbol{\varphi}_i$. Такие процессы мы назвали *процессами переориентации* [3].

Учет этих степеней свободы неоднородных систем и введение дополнительных координат их состояния позволяет дать более детальную картину протекающих в таких системах процессов. Прежде всего, это означает, что полная энергия системы \mathcal{E} является функцией трех групп переменных $\mathcal{E}(\Theta_i, \mathbf{r}_i, \boldsymbol{\varphi}_i)$, где $i = 1, 2, \dots, n$ – число независимых составляющих энергии. Поэтому её полный дифференциал может быть представлен в виде трех сумм частных дифференциалов тождеством вида:

$$d\mathcal{E} \equiv \sum_i \Psi_i d\Theta_i - \sum_i \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{r}_i - \sum_i \mathbf{M}_i \cdot d\boldsymbol{\varphi}_i, \quad (4)$$

где

$$\Psi_i \equiv (\partial \mathcal{E} / \partial \Theta_i); \quad \mathbf{F}_i \equiv -(\partial \mathcal{E} / \partial \mathbf{r}_i); \quad \mathbf{M}_i \equiv -(\partial \mathcal{E} / \partial \boldsymbol{\varphi}_i) \quad (5)$$

– соответственно обобщенные потенциалы; обобщенные силы и их моменты¹⁾.

Первая сумма (4) описывает виды работ, не нарушающих пространственной однородности системы и сопровождающих объемную деформацию системы $-pdV$, теплообмен TdS ²⁾, диффузию k -х веществ $\mu_k dN_k$, ввод в систему заряда ϕdZ и т.д. К этой же категории

¹⁾ Примененная здесь запись производной от скалярной величины по векторной малоупотребима, но чрезвычайно удобна (Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, 1973). Что же касается знака (–) во 2-й и 3-й сумме (4), то он соответствует принятому в термодинамике правилу знаков: подведенная к системе теплота и совершенная ею работа положительны.

²⁾ В энергодинамике теплообмен отнесен к категории неупорядоченных работ в связи с невозможностью однозначного разделения энергообмена в открытых системах на теплоту и работу (М.Трайбус, 1970; К. Путилов, 1971).

процессов следует отнести работу ускорения системы в её поступательном $\mathbf{v} \cdot d\mathbf{P}$ и вращательном движении $\boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{L}$, а также работу поступательного и вращательного ускорения электрического заряда системы³⁾, потенциалы которых Ψ_i (скорость поступательного \mathbf{v} , \mathbf{v}_e и вращательного $\boldsymbol{\omega}$, $\boldsymbol{\omega}_e$ движения) и сопряженные с ними координаты Θ_i (импульсы \mathbf{P} , \mathbf{P}_e и их моменты \mathbf{L} , \mathbf{L}_e) имеют векторную природу.

Вторая сумма выражения (4) характеризует элементарную «техническую» работу $dW_i^T = \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{r}_i$, совершаемую силами \mathbf{F}_i в их обычном (ньютоновском) понимании. Эта работа связана с перемещением $d\mathbf{r}_i$ объекта ее приложения Θ_i в пространстве и выражается через градиенты потенциалов $\nabla\Psi_i$ соотношением $\mathbf{F}_i = -\Theta_i \nabla\Psi_i = \Theta_i \mathbf{X}_i$, где $\mathbf{X}_i \equiv -\nabla\Psi_i$ – так называемые «термодинамические силы в их энергетическом представлении» (И. Дьярмати, 1974). Таковы, в частности, удельные массовые, объемные и поверхностные силы, для которых величина Θ_i имеет смысл соответственно массы M , объема V и поверхности тела f .

Наконец, члены 3-й суммы (4) характеризуют работу, совершаемую крутящими моментами $\mathbf{M}_i = \mathbf{F}_i \times \mathbf{r}_i$. Возникновение таких моментов обусловлено наличием в 1-й сумме (4) потенциалов Ψ_i векторной природы, вектор-градиенты которых $\text{Grad } \Psi_i$ (в том числе вектор-градиент скорости $\text{Grad } \mathbf{v} \equiv \nabla\mathbf{v}$) представляют собой тензоры 2-го ранга. Составляющие этих тензоров являются движущими силами процессов перераспределения и переориентации импульса. Нас в данном случае интересует их антисимметрическая составляющая $\nabla\Psi_i^a$. Одна из них, $\nabla\mathbf{v}^a$, известна из гидродинамики как вихревой вектор. Последнее означает, что при изучении систем с произвольным распределением масс, зарядов и токов необходимо учитывать появление не только силовых полей, но и полей, создаваемых крутящими моментами \mathbf{M}_i . Это позволит показать, что векторный магнитный потенциал \mathbf{A} является функцией угловой скорости вращения электронов $\boldsymbol{\omega}_e$ и может быть с успехом заменен ею.

2. Векторный потенциал как функция угловой скорости электронов. Известно, что векторный (магнитный) потенциал \mathbf{A} токов \mathbf{j}_e , произвольным образом распределенных в пространстве с магнитной проницаемостью μ_0 на расстоянии r от источника, определяется выражением [4]:

$$\mathbf{A} = (\mu_0/4\pi) \int (\mathbf{j}_e/r) dV. \quad (6)$$

Плотность тока \mathbf{j}_e определяется в электродинамике произведением плотности электрического заряда ρ_e на скорость его перемещения $\mathbf{v}_e(\mathbf{r})$. Эта скорость различна в разных точках системы, и кроме того, зависит от принятой системы её отсчета. Однако если учесть, что появление векторных потенциалов Ψ_i обусловлено наличием в исследуемой системе вращательного движения, и рассматривать для конкретности соленоид радиусом r , то скорость заряда \mathbf{v}_e можно выразить векторным произведением угловой скорости вращения $\boldsymbol{\omega}_e$ и радиус-вектора $\mathbf{r} = e\mathbf{r}$ элемента тока $\mathbf{j}_e dV$ относительно мгновенного центра его вращения. Тогда вместо (6) можем написать:

$$\mathbf{A} = (\mu_0/4\pi) \int \rho_e \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{e} dV. \quad (7)$$

Вынося постоянную для соленоида величину $\boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{e}$ за знак интеграла, получим:

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

где $3 = \int \rho_e dV$ – суммарный заряд, движущийся в обмотке соленоида (величина, пропорциональная числу ампер-витков).

³⁾ Поскольку этот процесс может происходить под действием только электродвижущих сил, т.е. независимо от ускорения системы как целого.

Согласно (8), векторный потенциал \mathbf{A} пропорционален угловой скорости вращения элемента тока в обмотке соленоида и совпадает по направлению с этим током (рис.2). Это обстоятельство подтверждает сделанный выше вывод о том, что этот потенциал является следствием наличия у токонесящей системы дополнительных степеней свободы и связан с вихревым характером магнитного поля. Действительно, в соленоидах плотность заряда ρ_e ,

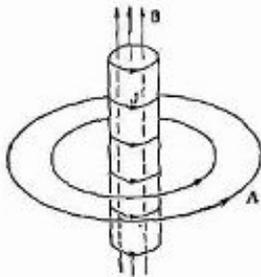


Рис.2. Поле соленоида

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 $\boldsymbol{\omega}_e = d\boldsymbol{\varphi}_e/dt$. 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⁾.

Вместе с тем выражение (8) вскрывает неадекватность формально-математического введения понятия векторного потенциала \mathbf{A} из соотношения $\text{div rot}\mathbf{A} = \text{div}\mathbf{B} = 0$. Из него следует, что магнитное поле \mathbf{B} возникает только тогда, когда $\text{rot}\mathbf{A} \neq 0$. Между тем магнитное поле существует, как известно, и у прямолинейного проводника с током. В энергодинамике этому случаю соответствует член 2-й суммы (4). Далее, выражение $\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$ предполагает экстенсивный характер векторного потенциала \mathbf{A} , что становится особенно очевидным при рассмотрении выражения (8), из которого следует его пропорциональность полному заряду Z токонесящей системы. Такой его характер не соответствует природе любого потенциала Ψ_i как *интенсивной* величины.

Иной способ введения магнитного потенциала предлагает энергодинамика, исходя из единства описания подобных процессов и из их физической сущности. С её позиций векторный магнитный потенциал является всего лишь одним из векторных потенциалов, которые определяются единым выражением $\Psi_i \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\Theta_i)$. В рассматриваемом случае этот потенциал имеет вид:

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

где $\mathbf{L}_e = I_e \boldsymbol{\omega}_e$ – момент импульса вращательного движения заряда; I_e – момент инерции контура с током. Мы будем называть величину $\boldsymbol{\omega}_e$ «*электромагнитным потенциалом*».

Введенный таким образом потенциал магнитного поля, 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. Однако он отличается от потенциала \mathbf{A} помимо своей размерности еще тем, что направлен по оси вращения, а не в направлении замкнутого тока. Поэтому предстоит показать соответствие понятия вращательного потенциала известным опытным фактам.

Начнем с возможности простого объяснения действия постоянных магнитов как следствия упорядоченности замкнутых молекулярных токов в них. Заметим, далее, что потенциал $\boldsymbol{\omega}_e$ напрямую связан с работой, совершаемой токонесящей системой, в то время как для векторного потенциала \mathbf{A} такая связь остается неизвестной. В частности, работа ускорения кругового движения электронов по замкнутому контуру определяется в энергодинамике выражением, аналогичным другим видам работ, входящим в первую сумму (4):

$$dW_\omega = \boldsymbol{\omega}_e \cdot d\mathbf{L}_e = I_e d\omega_e^2/2. \quad (10)$$

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

Столь же просто найти связь электромагнитного потенциала с технической работой, выражаемой членами 2-й суммы (4). Для этого воспользуемся альтернативным представлением технической работы $dW_i^T = \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{r}_i$ через термодинамические силы $\mathbf{X}_i \equiv -\nabla\Psi_i$ и моменты распределения $\mathbf{Z}_i = \Theta_i \Delta\mathbf{r}_i$, которые в данном случае принимают вид $\mathbf{X}_\omega = -\nabla\omega_e$ и $\mathbf{Z}_\omega = \Theta_\omega \times \Delta\mathbf{r}_\omega$:

$$dW_\omega^T = \mathbf{F}_\omega \cdot d\mathbf{r}_\omega = \mathbf{X}_\omega \cdot d\mathbf{Z}_\omega. \quad (11)$$

Нетрудно заметить, что сила $\mathbf{X}_\omega = -\nabla\omega_e$ в этом выражении играет ту же роль, что и напряженность поля \mathbf{H} в выражении работы намагничивания $dW_m^T = \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}$, а момент \mathbf{Z}_ω – вектора индукции $\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$, отнесенного к магнетику в целом. Это становится более очевидным, если учесть, что $\Theta_\omega = I_e \omega_e$; $\Delta\mathbf{r}_\omega = \mathbf{r}_\omega$, и записать момент $\mathbf{Z}_\omega = I_e \omega_e \times \mathbf{r}_\omega$ в виде $\mathbf{Z}_\omega = I_e \text{rot}\omega_e$, что указывает на прямую связь векторов \mathbf{Z}_ω и \mathbf{B} . Столь же понятно, что в одномерном случае сила \mathbf{X}_ω имеет смысл отрицательного градиента модуля угловой скорости ω_e как меры «завихренности» магнитного поля.

Не менее очевидной становится и связь потенциала ω_e с работой переориентации токонесущей системы, выражаемой 3-й суммой (4):

$$dW_\phi^T = \mathbf{M}_\phi \cdot d\phi_e. \quad (12)$$

Поскольку этот процесс протекает в условиях постоянства всех других параметров системы, он обусловлен лишь изменением направления вектора ω_e , т.е. поворотом контура с током в пространстве. Именно такую работу совершает вихревое магнитное поле при вращении роторов электродвигателей. При этом момент \mathbf{M}_ϕ образует пару магнитных сил Лоренца, действующих на противоположные ветви рамки с током и нормальных к направлению тока в них. Эта пара сил и совершает работу поворота рамки с током, опровергая расхожую точку зрения, будто магнитное поле не совершает никакой работы.

3. Обсуждение результатов. Как показано выше, данная здесь трактовка магнитного поля как электромагнитного явления не противоречит известным фактам. Наличие потенциальных свойств у угловой скорости вращения электронов ω_e , названной здесь электромагнитным потенциалом, несомненно. Поэтому вопрос может состоять только в обосновании целесообразности замены им векторного потенциала \mathbf{A} , отличающегося от него не только направлением и экстенсивным характером, но и своей неоднозначностью.

Немаловажное значение приобретает при этом возможность простого объяснения существования магнитного момента у элементарных заряженных частиц с чрезвычайно малым радиусом и неизвестной внутренней структурой, поскольку электромагнитный потенциал ω_e , определяемый выражением (9), не зависит от радиуса вращающегося тела. Это вскрывает непротиворечивость появления магнитного момента \mathbf{M}_ω и магнитных сил \mathbf{X}_ω у любых элементарных заряженных частиц, сколь бы малыми ни были их размеры. Последнее освобождает от необходимости придумывать модели строения элементарных частиц по крайней мере в макрофизике.

В свою очередь, существование магнитных сил \mathbf{F}_ω или \mathbf{X}_ω проливает новый свет на природу взаимодействия не только заряженных частиц (типа спин-спинового взаимодействия [5]), но и не заряженных вращающихся тел. Если свободные электроны в электро нейтральных телах вращаются с той же скоростью, что и сами эти тела ($\omega_e = \omega$), между телами, вращающимися с различной угловой скоростью, с необходимостью возникает аксиальная магнитная сила \mathbf{F}_ω , вызывающая их притяжение или отталкивание. Эта сила в [6] была названа нами «гироскопической».

Далее, согласно вышеизложенному, во вращающихся телах с неоднородным распределением электрического заряда возникают также крутящие моменты \mathbf{M}_ω , обуславливающие обмен между телами и окружающими их средами «завихренностью». Такое взаимо-

действие оправдывает введение «торсионных полей», объясняя их, однако, вполне «конвенциональными» причинами, поскольку переносчиком этого взаимодействия может стать любая промежуточная среда, взаимодействующая с электронами вещества и способная к передаче вращательного движения (в том числе эфир с исчезающе малой, но отличной от нуля вязкостью) [6].

Вместе с тем предпринятое рассмотрение вынуждает скептически отнестись к разного рода гипотезам о необычных свойствах «физического вакуума» и, в частности, к утверждению о существовании магнитного поля в нем. Как следует из выражений (8) и (9), магнитный потенциал ω_e существует только в области пространства, где угловая скорость вращения тока отлична от нуля. Это свидетельствует об ошибочности трактовки эффекта Ааронова-Бома (1960) как следствия существования магнитного потенциала A вне миниатюрного соленоида. Связано это с тем, что такой соленоид был тщательно изолирован сверхпроводящим электромагнитным экраном с тем, чтобы не создавать на пути движения электронов в двухщелевом эксперименте электрического E и магнитного B полей [1]. Тем не менее эксперимент обнаружил изменение интерференционной картины при включении и выключении соленоида, находящегося вне траектории их движения. Этот результат следовало бы скорее объяснить наличием неэкранируемой *неэлектромагнитной* составляющей излучения электронов, которая была обнаружена в последнее время [7], нежели влиянием векторного потенциала A .

Подводя итог, можно заключить, что при принятом здесь дедуктивном подходе (от общего к частному) электромагнитный потенциал приобретает единый с другими обобщенными потенциалами смысл, единое аналитическое выражение и единое функциональное назначение. Кроме того, при таком подходе удастся получить аналитические выражения всех видов работы, связанных с магнитным потенциалом. Это позволяет дать более детальный анализ процессов, протекающих с участием неподвижных и движущихся зарядов.

Литература

1. Физическая энциклопедия, Т.1, 1988
2. Фейнберг Е.Л. Об «особой роли» электромагнитных потенциалов в квантовой механике, УФН, т.78, в.1, 1962
3. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии) – СПб.; «Наука», 2008.- 409 с.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1977.- Т.5,6.
5. Эткин В.А. О специфике спин-спиновых взаимодействий. <http://www.n-t.org/tp/ng/ssv.2.02.2002>.
6. Эткин В.А. О взаимодействии вращающихся тел. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/12439.html>. 13.12.2012.
7. Квартальнов В.В., Перевозчиков Н.Ф. «Открытие «нефизической» компоненты излучения ОКГ». Тезисы докладов Московской научно-практической конференции «Научные, прикладные и экспериментальные проблемы психофизики на рубеже тысячелетия», Москва, октябрь 1999 г.