УДК 537.21

Об истинных соотношениях в триадах векторов, используемых для описания электрических и магнитных полей

А.С. Чуев, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация: *Рассмотрены общепринятые и авторские варианты интерпретации триадных соотношений электрических и магнитных векторов, которые используются в электромагнетизме и радиооптике. Рассматриваемые варианты отличаются позиционированием относительно того какой вектор считать суммарным или составным, а два других исходными, то есть первичными. Автор настоящей работы отводит роль составного вектора: в электричестве вектору напряженности* ***E*** (*с участием электрической постоянной*), *а в магнетизме вектору магнитной индукции* ***B*** (*с участием магнитной постоянной*). *В обоснование авторской точки зрения приводятся наглядные изображения и формульные соотношения. Делается вывод о необходимости пересмотра некоторых других устоявшихся представлений теории электромагнетизма.*

Ключевые слова: *электромагнетизм, электрические векторы, магнитные векторы, электрическое поле, магнитное поле.*

Электрическое поле

В известном [1-3] соотношении электрических векторов внутри диэлектрика

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \qquad (1)$$

вектор $\vec{D}$ часто трактуют как суммарный и не имеющий физического смысла. Однако, по мнению автора [4, 5], это не так. Раскроем выражения для $\vec{D}$ и $\vec{P}$ в соотношении (1), получив

$$\varepsilon_0 \vec{E}_0 = \varepsilon_0 \vec{E} + \kappa \varepsilon_0 \vec{E} .$$

Здесь $\vec{E}_0$ - вектор напряженности внешнего электрического поля, а $\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля внутри диэлектрика, который характеризует остаток внешнего поля внутри диэлектрика, после его ослабления веществом диэлектрика. Сократив в последнем соотношении ε_0, получим

$$\vec{E}_0 = \vec{E} + \kappa\vec{E} = (1+\kappa)\vec{E}, \qquad (2)$$

или $\vec{E}_0 = \varepsilon\vec{E}$, что эквивалентно выражению $\vec{E} = \dfrac{\vec{E}_0}{\varepsilon}$.

Последние две формулы общеизвестны и вполне понятны. Однако не вполне понятно исходное соотношение (2). Согласно принципу суперпозиции среднее электрическое поле $\vec{E}$ внутри диэлектрика должно рассматриваться как суммарное поле, образуемое наложением внешнего поля $\vec{E}_0$ и среднего поля $\vec{E}'$ от диэлектрических диполей (рис. 1). Но соотношение (2) не содержит упомянутого вектора $\vec{E}'$. Известно, что его роль выполняет вектор *поляризованности* $\vec{P}$, определяемый как $\vec{P} = \kappa\varepsilon_0\vec{E}$. Однако направление вектора $\vec{P}$ принято противоположным направлению вектора $\vec{E}'$. Кроме того, определение вектора $\vec{P}$ от остатка поля внутри диэлектрика ($\vec{P} = \kappa\varepsilon_0\vec{E}$) не совпадает с аналогичным определением намагниченности в магнетизме, да и просто противоречит логике определения *восприимчивости* [6]. Восприимчивость должна определяться по отношению к первичному воздействию, а не к остатку этого воздействия. Второй вариант – логически менее оправдан.

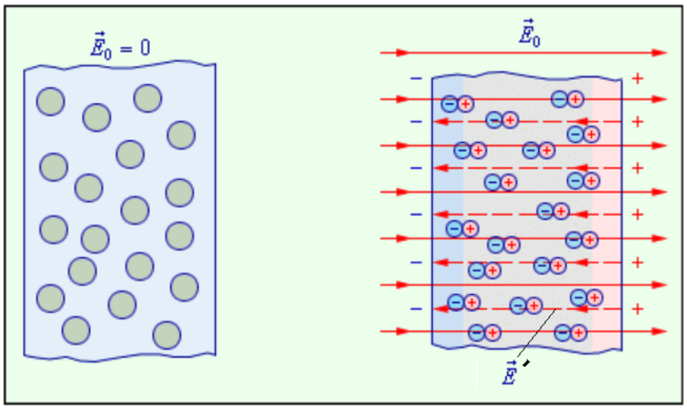

Рис. 1. Схема поляризации неполярного диэлектрика

Поясним это подробнее. Среднее суммарное поле внутри диэлектрика согласно рис. 1 представимо выражением

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'.$$

В скалярном виде это выражение имеет вид

$$E = E_0 - \text{κ}E. \qquad (3)$$

При анализе соответствия соотношений (2) и (3) возникают два непонятных момента. Можно ли вектор $\vec{E}'$ представлять как $\vec{E}' = -\text{κ}\vec{E}$ и как понимать присутствующий здесь минус: то ли значения κ отрицательны, то ли минус означает направленность вектора $\vec{E}$ противоположно вектору $\vec{E}'$. И, главное, почему диэлектрическая восприимчивость κ присутствует в качестве сомножителя не при векторе $\vec{E}_0$, характеризующем первичное поле, а при остатке этого поля $\vec{E}$? Оба отмеченных момента логически безупречного объяснения не имеют [5, 6].

С направленностью векторов $\vec{E}$ и $\vec{E}'$ вопрос разрешается следующим образом. Если каждый член выражения (3) умножить на ε_0, то получим

$$\varepsilon_0\vec{E} = \varepsilon_0\vec{E}_0 - \varepsilon_0\text{κ}\vec{E}.$$

Данное выражение можно представить так:

$$\varepsilon_0\vec{E} = \vec{D} + \vec{P}*. \qquad (4)$$

В этом выражении вектор $\vec{P}* = -\text{κ}\varepsilon_0\vec{E} = -\vec{P}$ определяется хоть и не совсем правильно, но он получает правильную направленность. Здесь вектор $\vec{P}*$ по модулю равен вектору $\vec{P}$ и имеет направленность, противоположную $\vec{E}_0$ и $\vec{E}$. Вопрос о правильном определении диэлектрической восприимчивости рассмотрен в работе автора [6].

Соотношение (4) позволяет по-новому взглянуть и понять физический смысл вектора $\vec{D}$. Здесь вектор $\vec{D}$ – это *поляризованность вакуума*, которая объяснима существованием в нем виртуальных пар элементарных частиц.

Магнитное поле

В известном [1-3] соотношении магнитных векторов внутри магнетика

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \qquad (3)$$

вектор $\vec{H}$ обычно трактуют, по аналогии с электрическим вектором $\vec{D}$, тоже как суммарный и не имеющий физического смысла.

Однако, записав это выражение в форме векторной суммы

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{J} \quad , \qquad (4)$$

мы получаем возможность трактовать вектор $\vec{H}$ как *намагниченность вакуума* [7, 8], которая существует, как и отмеченная выше *поляризованность вакуума*, за счет наличия в нем виртуальных элементарных частиц. Для этого не требуется даже их парное появление и исчезновение.

С учетом общепринятого соотношения $\vec{J} = \chi\vec{H}$, можно записать

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \chi\vec{H} = (1+\chi)\vec{H} = \mu\vec{H} \, .$$

В результате получим известное выражение $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$.

Используя выражение (4), по которому отношение $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$ есть сумма *намагниченностей* вакуума и вещества, можно показать – что собой представляет это отношение в окрестности постоянных магнитов, где вещественной намагниченности $\vec{J}$ нет, но, как известно, есть достаточно сильное магнитное поле, неотличимое по своим свойствам от магнитных полей, создаваемых в вакууме проводниками с током. Для этого рассмотрим пример, изображенный на рис. 2.

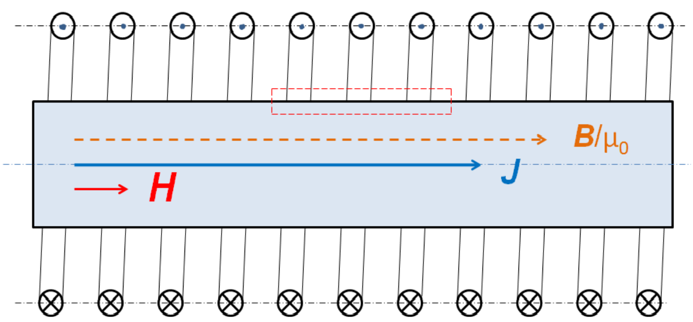

Рис. 2. Катушка с током и намагничиваемым сердечником

Имеется токовая катушка, с помощью которой первично намагничивается ферромагнитный сердечник в виде цилиндрического стержня. При наличии тока в катушке соотношение магнитных векторов соответствует соотношению (4). Вполне очевидно, что первичным является поле вектора $\vec{H}$, создаваемое токовой катушкой. Вторичным является поле вектора намагниченности $\vec{J}$, которое в ферромагнетиках значительно сильнее первого

$$\vec{J} = \chi\vec{H} = (\mu - 1)\vec{H}.$$

Исходя из соотношения (4) и примерного равенства для ферромагнетиков $\chi \approx \mu$ внутри намагничиваемых ферромагнетиков можно считать

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} \approx \vec{J}.$$

На рис. 2 это наглядно показано соотношением размера векторов. При этом все три вектора имеют одинаковое направление.

Теперь посмотрим, как изменится картина рис. 2 при выключении тока в катушке. Поле вектора $\vec{J}$ внутри намагниченного стержня из-за остаточной намагниченности останется практически неизменным. Вектор $\vec{H}$, по мнению автора, исчезнет, поскольку циркуляция этого вектора по любому замкнутому контуру должна быть нулевой. Поле вектора $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$ внутри стержня будет представлено тем же самым полем вектора $\vec{J}$.

Теперь рассмотрим магнитное поле вне намагниченного стержня. Поле вектора $\vec{J}$ там не может быть по определению, а магнитное поле вектора $\vec{H}$ мы исключили как токовое. Но магнитное поле вне намагниченного стержня безусловно есть. Возникает вопрос, чем тогда будет представлен вектор $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$? Думается, что обозначения внешнего поля постоянных магнитов можно оставить то же отношение $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$, в вакууме оно будет тем же самым полем $\vec{H} = \vec{J}_{\text{ВАК}}$. Обозначение этого поля буквой H лучше не использовать, оставив его для обозначения магнитного поля, создаваемого токами проводимости. Эти токи неразрывно объединены с полем вектора $\vec{H}$ теоремой о циркуляции этого вектора. Обозначение $\vec{J}_{\text{ВАК}}$ пока непривычно и воспринимается с недоверием, поэтому можно оставить нейтральное обозначение $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$. Без большого ущерба для понимания, внешнее магнитное намагниченных магнетиков можно характеризовать и отдельным вектором $\vec{B}$.

Внешнее магнитное поле стержневых магнитов достаточно близко к дипольной форме, оно описывается известным выражением [9, стр. 265]

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\left(\frac{3(\vec{P}_{\text{m}} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{P}_{\text{m}}}{r^3}\right),$$

где $\vec{P}_{\text{m}}$ - суммарный *магнитный дипольный момент*, которым обладает намагниченное вещество тела магнита; $\vec{r}$ - радиус-вектор от точки наблюдения до условного центра магнита, которому мы приписываем значение магнитного момента $\vec{P}_{\text{m}}$.

Вычленяя из приводимой формулы искомое отношение характеризующее намагниченность вакуума, получим

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{3(\vec{P}_{\text{m}} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{P}_{\text{m}}}{r^3}\right) = \vec{J}_{\text{ВАК}}.$$

Последнее выражение будет лучше восприниматься как *намагниченность*, если в нем обозначить (выделить) сферический объем радиуса r:

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \frac{3}{4\pi r^3}\left(\frac{(\vec{P}_\text{m}\cdot\vec{r})\vec{r}}{r^2} - \frac{\vec{P}_\text{m}}{3}\right). \qquad (5)$$

Тогда выражение в скобках станет определять некое значение и направленность внешнего магнитного поля от источника в виде намагниченного стержня. Таким образом, источником поля будет суммарный (или эквивалентный) *магнитный дипольный момент* $\vec{P}_\text{m}$ вещества тела магнита, а отношение векторной величины, представленной в скобках формулы (5) к сферическому объему радиуса r, станет определять *намагниченность вакуума* (вектор $\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{J}_\text{ВАК}$) в данной точке пространства.

Формула (5) описывает магнитное поле, создаваемое магнитным диполем, в векторной форме. Скалярное описание этого же поля имеет более простой вид [1-3]

$$\frac{B}{\mu_0} = \frac{P_\text{m}}{4\pi r^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}, \qquad (6)$$

где θ – угол между осью магнитного диполя и радиус-вектором $\vec{r}$, проведенным от цента диполя до точки наблюдения.

Если следовать структуре формулы (5), то последнее выражение получает такой вид:

$$\frac{B}{\mu_0} = \frac{3P_\text{m}}{4\pi r^3}\sqrt{\frac{1+3\cos^2\theta}{9}}. \qquad (7)$$

Примерное изображение векторных линий внешнего магнитного поля, создаваемого намагниченным стержнем, приведено на рис. 3.

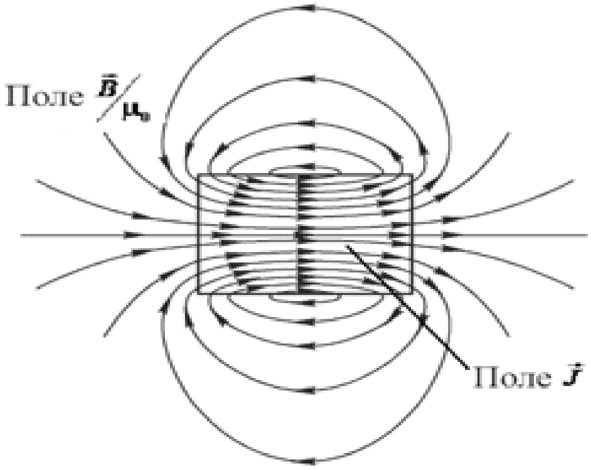

Рис. 3. Дипольное магнитное поле намагниченного стержня

Внутри намагниченного стержня поле представлено линиями вектора вещественной намагниченности $\vec{J}$, а вне стержня линиями вектора $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$, причем на границе двух сред первые линии, очевидно, без разрывов переходят во вторые.

Некоторые склонны видеть в изображении рис. 3 противоречие четвертому уравнению Максвелла из-за наличия ненулевой дивергенции для вектора $\vec{B}$ на торцах стержня. Для разрешения этого противоречия внутрь намагниченного стержня обычно вводят [9] еще одно «размагничивающее» поле вектора $H_{\Theta} = NJ$, направленное против основного поля вектора *намагниченности* $\vec{J}$. Одновременно вводится еще одно внешнее поле вектора $\vec{H}$, линии которого совпадают с линиями вектора $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$. Это внешнее поле вводится лишь для того, чтобы циркуляция вектора $\vec{H}$ по любому замкнутому контуру оказывалась нулевой. Изображение такого размагничивающего поля приведено на рис. 4 [10]. Очевидно, что вне магнита прямое и «размагничивающее» поля по направленности совпадают, следует ли их различать из этого рисунка (и в принципе) не очень понятно.

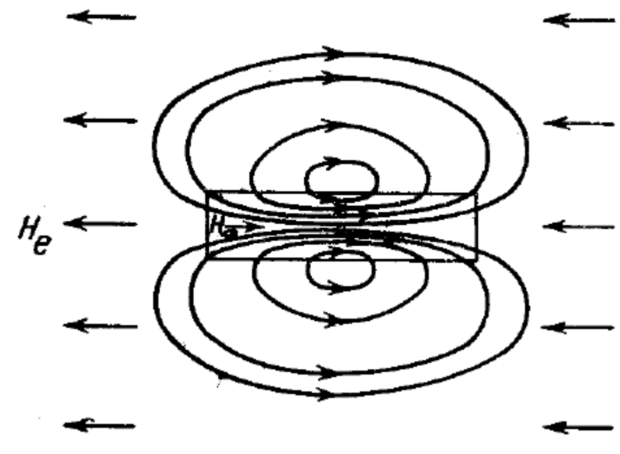

Рис. 2-1. Схематическое изображение размагничивающего поля прямого магнита.

Рис. 4. Изображение двунаправленного размагничивающего поля постоянного магнита, помещенного во внешнее поле H_e

Один знакомый профессор на мой вопрос: чему равна дивергенция вектора $\vec{J}$ на торцах стержневого магнита, с уверенностью ответил – равна дивергенции вектора $\vec{H}$ с обратным знаком. Однако откуда берется в магните поле вектора $\vec{H}$ и сравнимо ли оно по величине с полем вектора $\vec{J}$, никак не пояснил. Приводимые нами выше разъяснения такую точку зрения начисто опровергают.

Поскольку в не столь отдаленные времена верили в существование на поверхностях магнитов «магнитных зарядов», то авторы изображения рис. 4 похоже не задавались для себя вопросом о физическом объяснении смены направления линий вектора $\vec{H}$ на поверхности магнита. По нынешним же представлениям магнитных зарядов нет и изображать разнонаправленное (внутри и вне магнита) некое «размагничивающее» поле, просто нелепо.

Верное изображение дает рис. 3. Если понимать вектор $\dfrac{\vec{B}}{\mu_0}$ как суммарный и по физической сути неотличимый от вектора *намагниченности*, то никакого размагничивающего поля H_Θ нет и выдумывать его не надо, это хорошо иллюстрирует рис. 3. Здесь все магнитные линии являются общими и непрерывными, а поле вектора $\vec{H}$ отсутствует.

Подчеркнем еще раз, идея существования двух противоположно направленных полей вектора $\vec{H}$ (внутри и вне постоянных магнитов) когда-то имела право на жизнь, поскольку опиралась на метафизические представления о существовании магнитных зарядов, противоположных по знаку и размещавшихся на полюсах магнита. Сегодня эти представления явно устарели и нуждаются в пересмотре.

Необходимо также отметить, что признание изображения рис. 3 правильным изображением магнитного поля постоянного магнита порождает ряд других вопросов, принципиальных для теории электромагнетизма. К таким вопросам следует отнести обусловленность вектора $\vec{B}$ другим вектором согласно известной формуле $\vec{B} = \mathrm{rot}\vec{A}$ и нулевое значение дивергенции вектора $\vec{B}$. Так что, если начать пересматривать, то пересмотру в электромагнетизме подлежит многое.

Литература.

[1] Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. – 424 с.

[2] Макаров А.М., Лунева Л.А., Макаров К.А. Теория и практика классической электродинамики. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 784 с.

[3] Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Изд. 4-е испр.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2003. – 320 с.

[4] Чуев А.С. О системном и физическом делении электромагнитных величин, относимых традиционно к группе полевых. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 7. URL: http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/1295.html

[5] Чуев А.С. О новых подходах в описании стационарного электрического поля внутри диэлектрических сред и на границе их раздела. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 6. URL:

http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/1325.html (дата обращения: 05.08.2015).

[6] Чуев А.С. О методической ошибке в определении физического свойства «восприимчивость» для магнетиков и диэлектриков. // Журн. «Законодательная и прикладная метрология». №3. 2013. С. 51-53.

[7] Чуев А.С. Магнитное поле – какие векторы первичны и что мы измеряем? // Журн. «Законодательная и прикладная метрология». 2012. № 6. С. 45-48.

[8] Чуев А.С. О новых подходах в описании стационарного магнитного поля внутри и на границе раздела двух сред. // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 7 [Электронный ресурс]. URL: http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56905 (дата обращения: 05.08.2015).

[9] Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М. ОНИКС 21 век. Мир и образование. 2005. 463 с.

[10] Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М. Энергия. 1969. 184 с.

Автор: Чуев Анатолий Степанович, к.т.н., доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

E-mail: chuev@mail.ru . Телефон дом. 8-498-664-20-98; моб. 8-916-007-66-14.

UDC 537.21

On the true relationship in the triad vectors used to describe electric and magnetic fields

A.S. Chuev, MSTU. NE Bauman

Abstract: The conventional interpretation and author options triad ratios of the electric and magnetic vectors that are used in electromagnetism and radio optics. Considered different options as to the positioning of a total count vector or a composite, and two other source, that is primary. The author of this work was assigned the role of the composite vectors: electricity intensity vector E (involving electric constant), and the magnetism of the magnetic induction B (involving magnetic constant). In support of the author's point of view are visual images and definable ratio. The conclusion about the need to revise some of the other well-established concepts of the theory of electromagnetism.

Keywords: electromagnetism, the electric vectors of magnetic vectors of the electric field, the magnetic field.

Author: Chuev Anatoly Stepanovich, Ph.D., assistant professor of "Physics" MSTU. NE Bauman Moscow.
E-mail: chuev@mail.ru. Phone home. +7-498-664-20-98; mob. +7-916-007-66-14.