

О системном и физическом делении электромагнитных величин, относимых традиционно к группе полевых

© А.С. Чуев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Показано системно-размерностное и физическое различие полевых и базовых (вещественно-материальных) электромагнитных величин, в число которых входят напряженность магнитного поля и индукция электрического поля, обычно относимые к группе полевых. Указанные величины не только ошибочно причисляют к полевым, но и зачастую считают фиктивными и не имеющими глубокого физического смысла. В противоположность такой точке зрения обосновывается иной статус и физический смысл указанных величин — намагниченность и поляризованность свободного пространства (физического вакуума). На основе новых представлений подробно рассмотрен эффект локального усиления внешнего и внутреннего электрических полей вблизи поверхностей диэлектрических тел. Этот эффект может быть использован и, возможно, уже используется на практике в диэлектрических антеннах и волноводах.

Ключевые слова: электромагнетизм, намагниченность, поляризованность, магнитное поле, электрическое поле, физический вакуум.

Напряженность E и индукцию D электрического поля, индукцию B и напряженность H магнитного поля принято относить к полевым электромагнитным величинам. Однако системное представление этих величин с использованием единиц и размерностей СИ (и не только СИ) [1–4] позволяет увидеть их принципиальное деление на две группы.

Одну группу, в которую входят напряженность E электрического поля и индукция B магнитного поля, действительно, можно называть полевыми электромагнитными величинами, но другую группу, содержащую индукцию D электрического поля и напряженность H магнитного поля, автор считает базовыми электромагнитными величинами. Термин «базовая электромагнитная величина» для этой группы вполне уместен, поскольку сюда же входят электрический заряд и сила тока — действительно базовые (материально-вещественные) электромагнитные величины. Системное деление электромагнитных величин показано на рис. 1. Это частное изображение более общей многоуровневой системы физических величин и закономерностей (ФВиЗ). Принцип многоуровневого строения с делением физических величин на различные системные группы и подгруппы подробно изложен в работах автора [2, 4].

Надо отметить, что используемый автором системный подход не воспринимается приверженцами системы единиц СГС, в которой нет принципиальных и физических различий между электрическими ве-

личинами **E** и **D**, а также магнитными **B** и **H**. Опираясь на размерности системы СГС, многие физики считают электромагнитные величины **D** и **H** фиктивными, «не имеющими глубокого физического смысла» [5]. Более того, некоторые из именитых физиков до сих пор активно выступают против использования в физике системы СИ [6, 7]. Поскольку на линии фронта борьбы за преимущественное использование в физике системы СИ или СГС оказалась теория относительности А. Эйнштейна, споры имеют особо острый характер [8]. Автор настоящей статьи не только отстаивает и защищает физичность электромагнитных векторных величин **D** и **H**, но и отдает им предпочтение по значимости в электричестве и магнетизме.

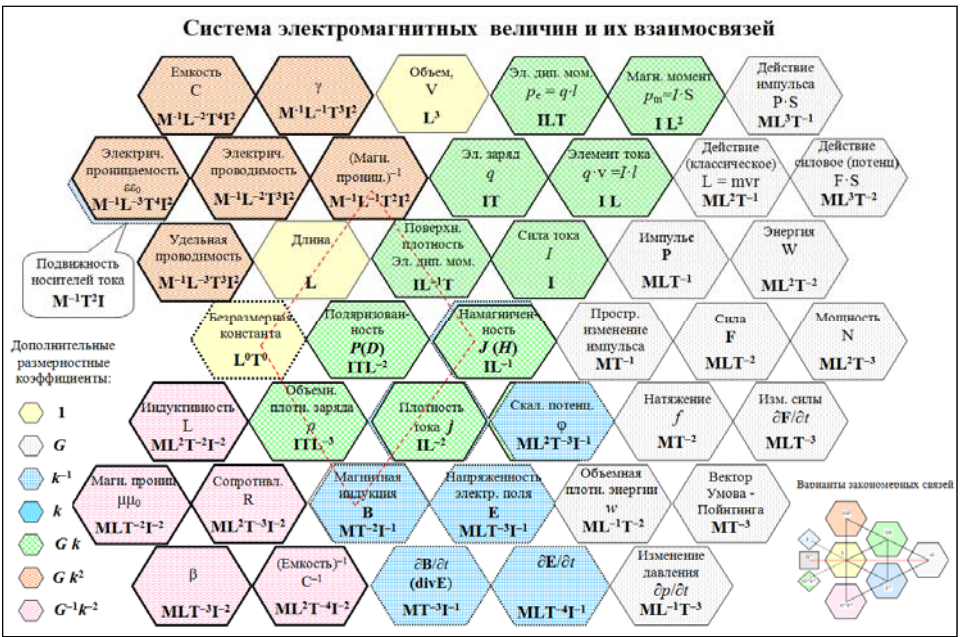


Рис. 1. Частное изображение системы ФВиЗ с преимущественной визуализацией базовых электромагнитных величин

Предпримем исторический экскурс в становление представлений о физических величинах электромагнетизма. Когда-то считалось верным представление о магнитных зарядах, располагающихся на полюсах магнитов и намагниченных тел [9]. Напряженность **H** магнитного поля определялась как полевая величина, аналогичная напряженности или потенциалу электрического поля. Одновременно были сформированы представления об индукции **B** магнитного поля как второй (силовой) полевой магнитной величине и намагниченности **J** материальных сред, к полевым величинам не относящейся. Распределение магнитных величин по оси намагниченного стержня представляли в виде, изображенном на рис. 2 [9].

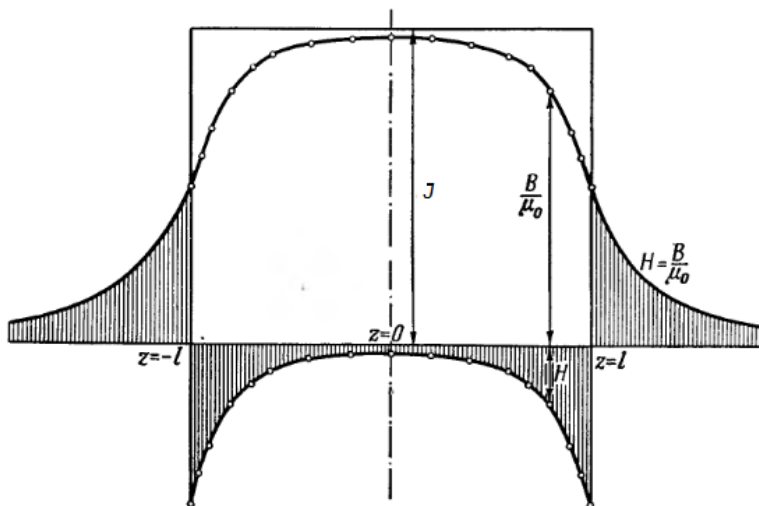


Рис. 2. Распределение (по Зоммерфельду) полевых величин \mathbf{B} и \mathbf{H} и намагниченности \mathbf{J} внутри и вне однородно намагниченного стержня

Магнитное поле силового вектора \mathbf{B} внутри стержня определяли соотношением

$$\mathbf{B}/\mu_0 = \mathbf{J} - \mathbf{H},$$

а вне стержня, где намагниченность вещества отсутствует, как

$$\mathbf{B}/\mu_0 = \mathbf{H}.$$

После того как представления о магнитном заряде изменились, главной полевой магнитной величиной стали считать индукцию \mathbf{B} , намагниченность \mathbf{J} к полевым величинам по вполне понятным причинам не относили, а напряженностью \mathbf{H} стали пользоваться из практических соображений, не очень вникая в статус этой величины. Последнее обусловлено простотой расчета тока с использованием теоремы (закона) о циркуляции вектора \mathbf{H} .

В системе СИ размерность *магнитной напряженности* \mathbf{H} совпадает с размерностью (вещественно-материальной) намагниченности \mathbf{J} , однако общепринято причислять вектор \mathbf{H} к полевым величинам, поскольку его довольно часто используют в описании волновых электромагнитных процессов. Аналогичное положение, хотя и менее ярко выраженное по широте использования, сложилось в отношении электрической величины \mathbf{D} , именуемой также *электрическим смещением*.

С позиции сегодняшних знаний о магнитных величинах и магнитных явлениях кривые на рис. 2 должны иметь вид, представленный на рис. 3.

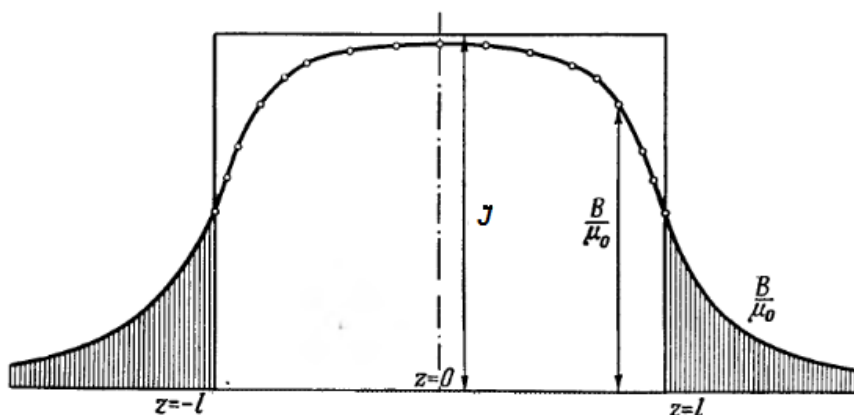


Рис. 3. Распределение магнитных величин B и J внутри и вне однородно намагниченного стержня в современном представлении

Изображение по рис. 3 без магнитной величины H представляется автору совершенно правильным, поскольку токи проводимости здесь отсутствуют. Однако наличие магнитного поля B вне намагниченного стержня и вариации этого поля внутри стержня (при отсутствии H) лишились физического объяснения. Практический опыт свидетельствует о большей интенсивности магнитного поля в районе торцов намагниченного стержня, однако этот эффект явно кажущийся. Ведь внутри стержня магнитное поле мы просто не наблюдаем.

В соответствии с общепринятой, но зачастую неправильно интерпретируемой формулой, выражающей соотношение трех магнитных векторных величин:

$$B/\mu_0 = H + J,$$

магнитное поле B/μ_0 представляют как суммарное поле, создаваемое токами проводимости и намагниченностью материальных сред. Токи проводимости порождают поле вектора H , а намагниченные среды — поле вектора J . На рис. 2 и 3 поле вектора J оканчивается на торцах стержня, однако, по мнению автора, это явное упрощение, особенно применительно к рис. 3.

В действительности магнитное поле присутствует и вне намагниченного стержня, особенно сильно оно проявляет себя вблизи торцов стержня. Принимая во внимание отсутствие токов проводимости и наличие составляющей B/μ_0 вблизи и на небольшом отдалении от торцов (см. рис. 3), ничего другого не остается, как предположить наличие в этих местах намагниченности свободного пространства. В данном примере его можно понимать как H или ввести новое понятие — намагниченность вакуума $J_{\text{в.ак}}$. Но удобнее под намагниченностью понимать всю составляющую B/μ_0 , изменяющуюся вдоль оси z . Тогда

внутри стержня это будет намагниченность его материала, а вблизи торцов — намагниченность вакуума. Введенный термин «намагниченность вакуума» многие не приемлют, но если широко используется термин «поляризованность вакуума» [10], то предлагаемый аналогичный термин в сфере магнетизма будет не столь уж нов.

Из изложенного выше вытекает, что при описании магнитного поля можно и вовсе обойтись без полевой величины \mathbf{B} , т. е. она не столь уж фундаментальна. Системно и физически магнитная индукция \mathbf{B} резко отличается от напряженности \mathbf{H} магнитного поля и намагниченности \mathbf{J} , без которых обойтись невозможно, если под \mathbf{H} понимать намагниченность вакуума $\mathbf{J}_{\text{вак}}$. В то же время две последние величины идентичны по размерности и, по идее, должны быть подобны и физически (намагниченность веществ и намагниченность вакуума). Частично этот вопрос освещен в работе автора [11].

Рассуждая о подобии электромагнитных величин, нельзя не отметить системное и физическое подобие индукции \mathbf{B} и напряженности \mathbf{E} , а также напряженности \mathbf{H} и индукции \mathbf{D} . Имеется определенное подобие электрического и магнитного диполей в их физическом представлении и математическом описании [12]. На рис. 4 изображения полей различаются лишь направленностью силовых линий внутри диполя. Кроме того, внутри пара- и ферромагнетиков внешнее поле усиливается, а внутри диэлектриков — ослабляется.

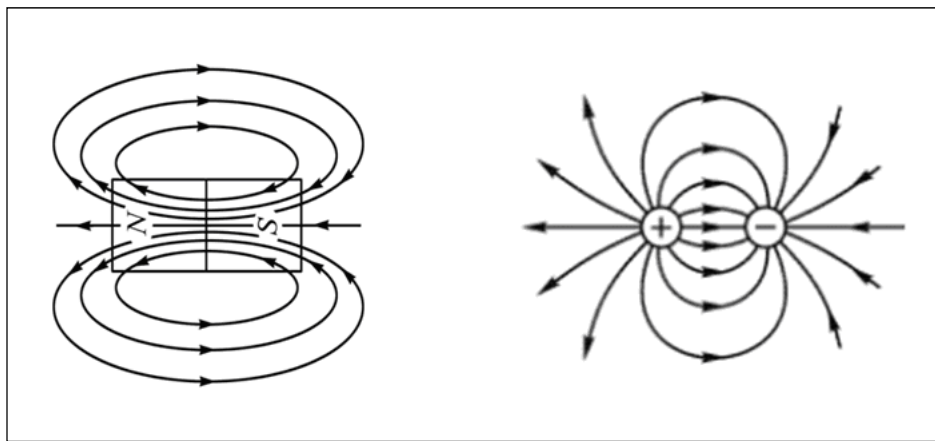


Рис. 4. Подобие магнитного и электрического дипольных полей

В математическом описании дипольных полей легко перейти от полевых электромагнитных величин \mathbf{B} и \mathbf{E} к вещественно-материальным параметрам. Намагниченность \mathbf{J} и поляризованность \mathbf{P} сред (включая вакуум) в каждой точке пространства будут определяться (по модулю) следующими схожими выражениями:

$$J = \frac{\mu}{4\pi} \frac{p_m}{r^3} \sqrt{1 - 3\cos^2 \alpha}; \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{\varepsilon} \frac{p_e}{4\pi r^3} \sqrt{1 - 3\cos^2 \alpha}. \quad (2)$$

Здесь μ , ε — соответственно относительные магнитная и электрическая проницаемости сред; p_m , p_e — соответственно магнитный и электрический дипольные моменты в скалярном представлении; r — модуль радиус-вектора из центра симметрии диполя; α — угол между радиус-вектором и осью диполя.

Подобие в математическом описании электрических и магнитных полей указывает и на подобие их происхождения — вероятнее всего, от наличия в пространстве вещественно-материальных образований, обладающих электрическим и магнитным дипольными моментами, которые и служат первопричиной поляризованности и намагниченности сред.

Дипольное представление источников и «трансляторов» поля в виде вещественных и виртуальных пар элементарных частиц [10] позволяет наглядно раскрыть и модельно представить образование сложных полей как суперпозицию более простых полей и не только электрических. Например, используя принцип суперпозиции, легко изобразить и понять картину «стягивания» линий внешнего магнитного поля ферромагнетиком (рис. 5).

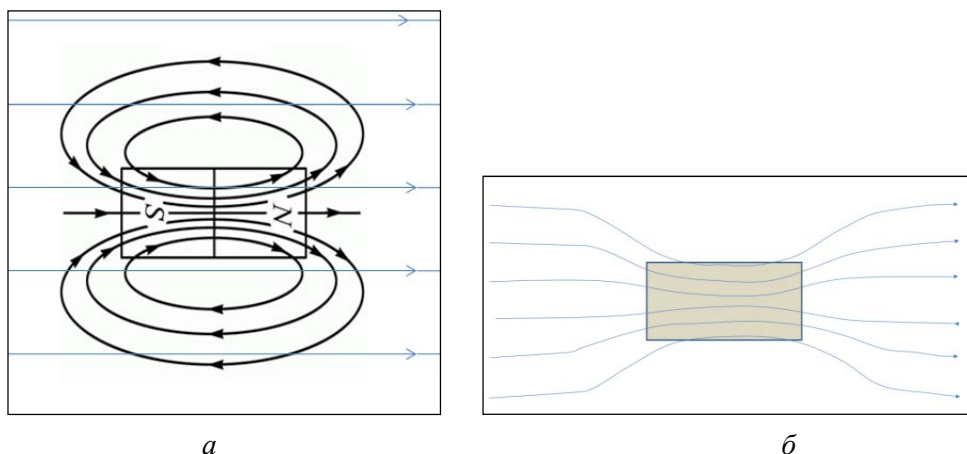


Рис. 5. Внешнее однородное магнитное поле и дипольное поле намагниченного стержня:

а — суперпозиционные составляющие; *б* — результирующее поле

На рис. 6 и 7 изображены подобные картины для электрического поля.

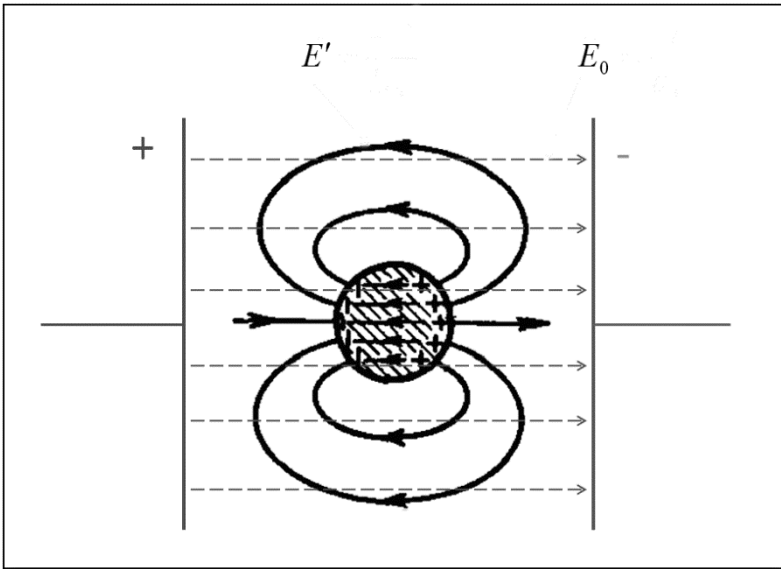


Рис. 6. Однородное поле конденсатора и дипольное поле поляризованного шара

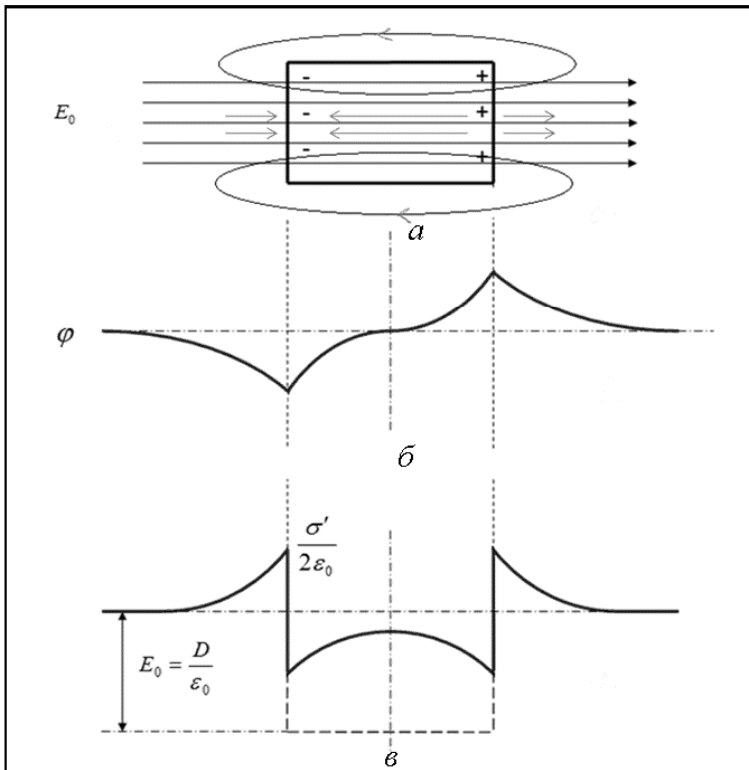


Рис. 7. Составляющие (а), потенциал (б) и напряженность (в) суммарного электрического поля на оси диэлектрического стержня

Суммарное электрическое поле, образуемое однородным полем конденсатора и дипольным полем диэлектрического шара по отдельности, приближенно можно выразить формулой (см. рис. 6)

$$E = E_0 + E' = \frac{D}{\epsilon_0} + \frac{-P}{k\epsilon_0}.$$

Переменная k в этой формуле условно выражает характер дипольного поля, создаваемого диэлектрическим шаром. Более точно это дипольное поле будет выражаться формулой (2), характерной для двухэлементного диполя (см. рис.4).

Теорию Зоммерфельда, разработанную для ошибочного изображения магнитного поля с торцовыми зарядами (см. рис. 2) можно использовать для описания электрического поля, создаваемого стержневым диэлектриком, расположенным вдоль линий внешнего электрического поля стержневым диэлектриком. На рис. 7 показан эффект локального усиления внешнего электрического поля у поверхности диэлектрика. Несмотря на то что распределение электрического потенциала (см. рис. 7, б) не учитывает градиента потенциала внешнего поля (для этого требуется поворот изображения на некоторый угол), общий характер картины, включая изображение на рис. 7, в, показан верно.

Усиление поля (см. рис. 7, в) должно иметь место как вне торцовых поверхностей диэлектрического стержня, так и внутри него вблизи поверхностей, содержащих наведенные электрические заряды. Данный результат может выглядеть странным, но он легко объясним. Всякое скопление зарядов одного знака связано с появлением сильного локального поля. Правда, внутри диэлектрика этот эффект будет менее выраженным. Поэтому крутизна изменений линии поля E на рис. 7, в вблизи торцов диэлектрического стержня должна быть меньше внутри него, чем снаружи.

Приводимый эффект локального усиления электрического поля вблизи поверхности диэлектрика должен представлять определенный интерес при создании диэлектрических антенн, волноводов и им подобных устройств. На существование такого эффекта вне тела диэлектрика также указывает С.Г. Калашников [13].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чуев А.С. Система физических величин и закономерных размерностных взаимосвязей между ними. *Законодательная и прикладная метрология*, 2007, № 3, с. 30–33.
- [2] Чуев А.С. Системный подход в физическом образовании инженеров. *Наука и образование*. 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/299700.html> (дата обращения 2.02.2012).
- [3] Чуев А.С. О преимуществах системы СИ и недостатках СГС в системном представлении физических величин и закономерностей.

- Спирин Г.Г., ред. *Материалы междунар. школы-семинара «Физика в системе высшего и среднего образования в России»*. Москва, Изд. дом акад. им. Н.Е. Жуковского, 2013, 184 с.
- [4] Чуев А.С. Архитектурные модели систем физических величин и закономерностей на базе систем единиц СИ и СГС. *Мир измерений*, 2014, № 5, с. 29–36.
- [5] Иродов И.Е. *Электромагнетизм. Основные законы*. 4-е изд. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003, 320 с.
- [6] Леонтович М.А. О системах мер. (В связи с введением «Международной системы единиц» как стандарта). *Вестник РАН*, 1964, № 6, с. 123. URL: http://www.ras.ru/publishing/rasherold/rasherold_articleinfo.aspx?articleid=9cc23ce5-6eb7-4e4e-a0e4-1066510bef45 (дата обращения 6.04.2013).
- [7] Сивухин Д.В. О международной системе физических величин. *УФН*, 1979, т. 129, с. 335. URL: http://ufn.ru/ufn79/ufn79_10/Russian/r7910h.pdf (дата обращения 21.04.2013).
- [8] Топтунова Л.М. Осторожно, физик! Перед тобой система единиц СГС. URL: <http://www.astrogalaxy.ru/875.html> (дата обращения 27.02.2014).
- [9] Зоммерфельд А. *Электродинамика*. Москва, ИИЛ, 1958, 505 с.
- [10] Поляризация вакуума. Прохоров А.М., ред. *Физическая энциклопедия*. Москва, Советская энциклопедия, 1988, т. 4, с. 64.
- [11] Чуев А.С. Полевые электромагнитные величины — фантом или реальность? *Законодательная и прикладная метрология*. 2012, № 3, с. 71–75.
- [12] Савельев И.В. *Курс общей физики*. В 3 кн. Кн. 2: *Электричество и магнетизм*. Москва, АСТ, 2004, 334 с.
- [13] Калашников С.Г. *Электричество*. 5-е изд. Москва, Наука, 1985, 86 с.

Статья поступила в редакцию 17.07.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

Чуев Анатолий Степанович родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: общая физика, метрология. e-mail: chuev@mail.ru

On the systemic and physical division of electromagnetic quantities traditionally attributable to the field quantities group

© A.S. Chuev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study tested systemic, dimensional and physical difference between the field and base (real-material) electromagnetic quantities, which include magnetic field strength and electric induction, usually attributed to the field quantities group. These quantities are not only wrongly considered to the field ones, but are often considered fictitious and not having a deep physical meaning. In contrast to this viewpoint, we justified a different status and the physical meaning of such values as magnetization and polarization of free space (physical vacuum). On the basis of new concepts we discussed in detail the effect of local enhancement of external and internal electric field near the surface of dielectric bodies. This effect can be used and has, probably, been already used in practice in dielectric antennas and waveguides.

Keywords: *electromagnetism, magnetization, polarization, magnetic field, electric field, physical vacuum.*

REFERENCES

- [1] Chuev A.S. *Zakonodatel'naya i Prikladnaya Metrologiya — Legislative and Applied Metrology*, 2007, no. 3, pp. 30–33.
- [2] Chuev A.S. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/299700.html> (accessed 2 February 2012).
- [3] Chuev A.S. O preimushchestvakh sistemy SI i nedostatkakh SGS v sistemnom predstavlenii fizicheskikh velichin i zakonornostei [On the advantages of SI system and disadvantages of GHS in representation of physical quantities and laws]. *Materialy mezhdunar. shkoly-seminara "Fizika v sisteme vysshego i srednego obrazovaniya v Rossii"* [Proc. Int. School-Seminar "Physics in higher and secondary education in Russia"]. Prof. G.G. Spirin, ed. Moscow, N.E. Zhukovsky Publ. House, 2013, 184 p.
- [4] Chuev A. S. *Mir izmereniy — World of Measurements*, 2014, no. 5, pp. 29–36.
- [5] Irodov I.E. *Elektromagnetizm. Osnovnye zakony* [Electromagnetism . Basic laws]. 4th ed., Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy Publ., 2003, 320 p.
- [6] Leontovich M.A. *Vestnik RAN — RAS Bulletin*, 1964, no. 6. Letters to the Editor, p.123. Available at: http://www.ras.ru/publishing/rasherale/rasherale_articleinfo.aspx?articleid=9cc23ce5-6eb7-4e4e-a0e4-1066510bef45 (accessed 4 June 2013).
- [7] Sivukhin D.V. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk — Physics-Uspekhi* (Advances in Physical Sciences), 1979, vol. 129, p. 335. Available at: http://ufn.ru/ufn79/ufn79_10/Russian/r7910h.pdf (accessed 21 April 2013).
- [8] Toptunova L.M. *Ostorozhno, fizik! Pered toboi sistema edinits SGS* [Physicist, be careful! There is the CGS system in front of you]. Available at: <http://www.astrogalaxy.ru/875.html> (accessed 27 February 2014).
- [9] Sommerfeld A. *Elektrodinamika — Electrodynamics*. Transl. German , Moscow, Foreign. Liter. Publ., 1958, 505 p.

- [10] Polyarizatsiya vakuuma [The vacuum polarization]. *Fizicheskaya Entsiklopediya* [Physical encyclopedia]. Chief editor A.M. Prokhorov. Vol. 4. Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1988, p. 64.
- [11] Chuev A.S. *Zakonodatel'naya i Prikladnaya Metrologiya — Legislative and Applied Metrology*, 2012, no. 3, pp. 71–75.
- [12] Savelyev I.V. *Kurs obshchei fiziki* [General physics course]. In 5 parts. Part 2: *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and Magnetism]. Manual for Technical Schools, Moscow, AST Publ., 2004, 334 p.
- [13] Kalashnikov S.G. *Elektrichestvo — Electricity*. Textbook, 5th ed. Moscow, Science, 1985, 576 p.

Chuev A.S. (b. 1949), Ph.D., Assoc. Professor of the Physics Department at Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include: General Physics, metrology. e-mail: chuev@mail.ru