

*МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
И УСТРОЙСТВ*

УДК 530.958

**НЕСИЛОВЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ПОЛЯ ТОКОВ СМЕЩЕНИЯ В КОНДЕНСАТОРАХ***

В.В. АКСЕНОВ

630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, главный научный сотрудник. E-mail: Aksenov@omzg.sgcc.ru

В статье исследуется природа переменных электромагнитных полей в электрических конденсаторах. В научной литературе до сих пор недостаточно прояснен вопрос о возможном наличии магнитного поля в конденсаторах. Считается, что ток смещения, возникающий в конденсаторах, должен иметь магнитное поле. Но какова его природа? Этот вопрос остается открытым. В эксперименте В.В. Дырдина и др. магнитное поле конденсатора зафиксировано. Однако в технической физике и у инженеров конденсаторы не принято экранировать от действия магнитного поля, которое, согласно первому уравнению Максвелла, должно генерировать электрические токи в окружающей среде. Предлагаемая статья дает объяснение этому противоречию.

Ключевые слова: переменные несилловые электромагнитные поля, электрические конденсаторы, токи смещения, взаимодействие с окружающей средой, величины электромагнитных полей в конденсаторах

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-69-75

ВВЕДЕНИЕ

Токи смещения, введенные в уравнения электромагнитного поля в позапрошлом веке Максвеллом, наглядно реализуются в электрических конденсаторах. Их неперенное наличие в конденсаторах колебательных контуров (индукционная катушка – конденсатор) интересует физиков не только с точки зрения реализации конденсаторов в различных технических устройствах, но и с точки зрения возникающих электромагнитных полей в конденсаторах с переменным электрическим током [1].

* Статья получена 15 сентября 2015 г.

Самая, пожалуй, интересная проблема, занимающая многих: есть ли у токов смещения в конденсаторах магнитное поле, и если есть, то какова его природа. На этот счет существуют две противоположные точки зрения: одна из них отрицает существование магнитного поля, другая опирается на экспериментально зафиксированное магнитное поле (см. [1]). Если согласиться с экспериментом, проведенным в исследовании [1], то можно считать решенной проблему существования магнитного поля токов смещения в конденсаторах. Однако скептики приводят простое опровержение эксперимента, ссылаясь на то, что конденсаторы, в отличие от катушек индуктивности, не принято экранировать от магнитного поля токов смещения. И это верно.

О ПРИРОДЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Автор статьи посчитал, что все дело в природе тех электромагнитных полей, которые, по-видимому, все-таки существуют и вызываются токами смещения. Чтобы выяснить природу электромагнитных полей токов смещения в конденсаторах, необходимо изучить природу электромагнитных полей токов смещения, возможно существующих не только в конденсаторах.

На этот счет в физической литературе существует точка зрения, указывающая на то, что в природе могут существовать как силовые электромагнитные поля в трактовке Лоренца, так и несиловые электромагнитные поля [2, 3], уравнения для которых несколько отличаются от привычных стандартных уравнений Максвелла [3, 4].

В работах [3, 4] введено тороидальное ортогональное разложение векторного потенциала напряженности магнитного поля в немагнитных средах вне источника с помощью следующей цепочки равенств:

$$\nabla \cdot H = 0, \quad H = \nabla \times A, \quad A = Qr + \nabla \times (Qr). \quad (1)$$

Здесь H – напряженность магнитного поля; Q – скалярная функция трех или четырех (в присутствии времени $Q = Q \cdot e^{i\omega t}$) переменных класса C^∞ и $\langle Q \rangle = 0$; r – радиус-вектор; ω – круговая частота переменного тока; t – время. И тогда тороидальное (двухкомпонентное) магнитное поле по определению будет $H_T = \nabla \times (Qr)$, полоидальное – $H_P = \nabla \times \nabla \times (Qr)$. Согласно [3, 4], электрические поля также разбиваются на два класса: тороидальные (двухкомпонентные) электрические поля $E_T = -i\omega\mu\nabla \times (Qr)$ и полоидальные электрические поля $E_P = \frac{1}{\sigma}\nabla\nabla \cdot (Qr)$, где σ – удельная проводимость среды, в которой определено электрическое поле. В конденсаторе полоидальное

электрическое поле зарядов на обкладках $E_P = \frac{d}{\omega C} \nabla \nabla \cdot (Qr)$, где C – емкость конденсатора; d – расстояние между обкладками.

Важным свойством вышевведенных электромагнитных полей является силовой характер одних и несилловой характер других. Чтобы это продемонстрировать, необходимо предварительно определиться с вихрями (роторами) магнитных полей. Согласно исследованиям [3, 4]:

$$\nabla \times H_T = \nabla \times \nabla \times (Qr) = H_P \nabla \times H_P = \nabla \times \nabla \times \nabla \times (Qr) = \chi H_T, \quad (2)$$

где $\chi = -(i\omega\mu\sigma + \varepsilon\omega^2\mu)^{1/2}$; $\Delta Q + \chi Q = 0$ – магнитная проницаемость; ε – диэлектрическая проницаемость.

В выражении (2) отражена закономерность, вызывающая взаимную генерацию тороидальных магнитных полей в полоидальные и наоборот [5]. В данной статье возможность взаимной генерации играет решающую роль. Кроме того, формулы (2) участвуют в проверке силового и несиллового характера введенных электромагнитных полей от тороидальных (двухкомпонентных) электрических токов $j_T = \sigma E_T$, которые создают введенные тороидальные и полоидальные магнитные поля [4]. Сила Лоренца для полоидального магнитного поля и ЭДС индукции для тороидального электрического отлична от нуля, что указывает на их силовой характер. Действительно:

$$F_L = [j_T \times B_P] = [\sigma E_T \times \mu H_P] \neq 0, \quad (3)$$

$$\text{ЭДС} = \oint_L (E_T \cdot dl) = \int_V \nabla \times E_T \cdot dl = -\mu \int_V \left(\frac{\partial H_P}{\partial t} ds \right) \neq 0.$$

Сила Лоренца для тороидального магнитного поля и ЭДС индукции для полоидального электрического поля равна нулю, что означает ее несилловой характер. Действительно:

$$\overline{F_L} = [\chi H_T \times \mu H_T] = 0, \quad \text{ЭДС} = \oint_L (E_P \cdot dl) = \int_V (E_P \cdot dl) = \int_V \nabla \times E_P \cdot ds = 0. \quad (4)$$

В выражении (4) сила Лоренца и ЭДС индукции равны нулю в первой формуле из-за того, что векторное произведение полей одинакового направления равно нулю, а во второй – из-за того, что ротор берется от градиента,

образованного дивергенцией векторной функции. Формулы (2) и (4) важны для понимания природы электромагнитного поля токов смещения вообще и токов смещения в конденсаторах в частности [1]. Это понимание сводится к двум достаточно простым фактам. Согласно выражению (2), вихри несилевого магнитного поля H_T не возбуждают электрический ток, а переходят в силовое полоидальное магнитное поле за счет $\nabla \times H_T = H_p$. Несиловое полоидальное электрическое поле не обладает ЭДС индукции. Его присутствие вызывается изменяющимися (в том числе на обкладках конденсатора) электрическими зарядами. Оно потенциально по определению.

Чтобы привести пример и понять, какими напряженностями обладают несиловые электромагнитные поля, рассмотрим пример конденсатора, экспериментально изученного в работе [1]. Плотность тока смещения, согласно исследованию [3] (формула (20)), имеет вид

$$j_{\text{см}} = \frac{\partial D_p}{\partial t} = \chi H_T = -(\mu \omega^2 \varepsilon)^{1/2} H_T. \quad (5)$$

С другой стороны, в конденсаторе, согласно [1]:

$$j_{\text{см}} = -\varepsilon \frac{U_0}{d} \omega \sin \omega t. \quad (6)$$

Здесь U_0 – напряжение на обкладках конденсатора, направленное от одной пластины к другой; d – расстояние между пластинами. Из выражений (5) и (6) можно получить

$$(\varepsilon \omega^2 \mu)^{1/2} H_T = \varepsilon \frac{U_0}{d} \omega \sin \omega t. \quad (7)$$

Отсюда получаем величину тороидального несилевого магнитного поля в эрстедах:

$$|H_T| = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{U_0}{d} 4\pi 10^{-3} |\sin \omega t|. \quad (8)$$

В воздушном конденсаторе магнитное поле будет иметь вид

$$|H_T| = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{|U_0|}{d} 4\pi 10^{-3} |\sin \omega t|. \quad (9)$$

Далее примем за параметры конденсатора параметры из работы [1]. Тогда

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} = 2,7 \cdot 10^{-3}, \quad |U_0| = 20 [V], \quad d = 5 \cdot 10^{-2} [м], \quad |\sin \omega t| \approx 1. \quad (10)$$

В этих параметрах несилловое магнитное поле будет равно

$$|H_T| \approx 1,5 \cdot 10^{-2} [Э]. \quad (11)$$

Столь небольшое магнитное поле в конденсаторе из работы [1] само по себе не представляет никакой опасности из-за его несиллового характера, которое, согласно формуле (2), не возбуждает электрический ток в окружающей среде и приборах, окружающих конденсатор. Поэтому конденсаторы обычно не экранируют от магнитного поля. Электрическое поле этого конденсатора $|E_P| = \frac{|U_0|}{d} \approx 400 [V/м]$ также не представляет никакой опасности из-за невозбуждения им ЭДС в окружающей среде и приборах, его окружающих. Пользователю не следует прикасаться к работающему конденсатору из-за наличия в нем напряжения.

Поэтому есть возможность примирить противоположные мнения физиков и инженеров. Магнитное поле в конденсаторах создается токами смещения, но оно несилловое и малой напряженности, не возбуждающей в окружающем пространстве электрический ток. Электрическое поле конденсатора также не возбуждает ЭДС индукции, несмотря на переменный во времени характер. Это поле есть поле изменяющихся на обкладках конденсатора зарядов, что способствует непрерывному протеканию электрического тока в цепи, содержащей конденсатор. Магнитная стрелка не реагирует на быстро изменяющуюся напряженность несиллового магнитного поля из-за присущей ей инерционности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В природе несилловое магнитное поле фиксируется магнитометрами мировой сети магнитных станций, где магнитометры измеряют постоянное магнитное поле и медленные его вариации (изменения во времени). Стрелочные (и подобные стрелочным, включая протонные) приборы успевают зафиксировать эти медленные изменения суммарного (силового и несиллового) магнитного поля [6]. Подробный анализ несилловых природных электромагнитных полей можно прочесть в работе [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магнитное поле токов смещения / В.В. Дырдин, И.С. Елкин, К.В. Ложкин, А.С. Соснов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – Вып. 5. – С. 36–37.
2. *Chandrasekhar S.* On force-free magnetic fields // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1956. – Vol. 42, N 1. – P. 1–5.
3. *Aksenov V.V.* The toroidal decomposition of the vector potential of a magnetic field and its applications // Moscow University Physics Bulletin. – 2015. – Vol. 70, N 6. – P. 558–565.
4. *Аксенов В.В.* Моделирование тороидальных и полоидальных электромагнитных полей // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 5. – С. 3–24.
5. *Паркер Ю.* Космические магнитные поля. В 2 ч. – М.: Мир, 1982. – 1087 с.
6. *Аксенов В.В.* Электромагнитное поле Земли. – 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2010. – 269 с.

Аксенов Валентин Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Основные направления научной деятельности: математика, физика, геофизика, информатика. Имеет более 300 публикаций, в том числе 12 монографий. E-mail: Aksenov@omzg.sccc.ru

Non-force variable electromagnetic fields of displacement currents in condensers*

V.V. Aksenov

Institute of Computational Mathematics and Mathematics Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6 Lavrentev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, Gl.n.s. E-mail: Aksenov@omzg.sccc.ru

This paper studies the nature of variable electromagnetic fields in electric condensers. Shofar in the published works the issues associated with a possible presence of the magnetic field in condensers has not been elucidated. It is generally accepted that the displacement current occurring in condensers should possess a magnetic field. But what is its nature. This question is

* Received 15 September 2015.

still open. In the experiment conducted by V.V. Dyrdin et al. the magnetic field in a condenser was detected. However, in the experimental physics, it not accepted to consider condensers apart from the magnetic field. The latter, according to Maxwell's equation must generate electric currents in the environment. The paper proposed explains this contradiction.

Keywords: variable non-force electromagnetic fields, electric condensers, displacement currents, interaction of environment, electromagnetic fields values in condensers

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-69-75

REFERENCES

1. Dyrdin V.V., Elkin I.S., Lozhkin K.V., Sosnov A.S. Magnitnoe pole tokov smeshcheniya [Magnetic field current offset]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2004, iss. 5, pp. 36–37.
2. Chandrasekhar S. On force-free magnetic fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1956, vol. 42, no. 1, pp. 1–5.
3. Aksenov V.V. The toroidal decomposition of the vector potential of a magnetic field and its applications. *Moscow University Physics Bulletin*, 2015, vol. 70, no. 6, pp. 558–565. Translated from *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3, Fizika. Astronomiya*, 2015, no. 6, pp. 127–133.
4. Aksenov V.V. Modelirovanie toroidal'nykh i poloidal'nykh elektromagnitnykh polei [Simulation of toroidal and poloidal electromagnetic fields]. *Matematicheskoe modelirovanie – Mathematical Models and Computer Simulations*, 2014, vol. 26, no. 5, pp. 3–24. (In Russian)
5. Parker E.N. *Cosmical magnetic fields*. Oxford, Oxford University Press, 1979. 841 p. (Russ. ed.: Parker Yu. *Kosmicheskie magnitnye polya*. V 2 ch. Moscow, Mir Publ., 1982. 1087 p.).
6. Aksenov V.V. *Elektromagnitnoe pole Zemli* [The Earth's electromagnetic field]. 3 ed. Novosibirsk, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Publ., 2010. 268 p.