DOI: 10.22363/2224-7580-2025-1-149-156
EDN: YPHQPW

ПРОДОЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ*

А.К. Томилин[1], В.А. Панчелюга[2]*****

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, Томск, проспект Ленина, 30
[2]Институт теоретической и экспериментальной биофизики
Российской академии наук,
Российская Федерация, 142290, г. Пущино Московской обл.,
ул. Институтская, д. 3

Аннотация. Обсуждается исходная идея потенциально-вихревой электродинамической теории. Приведены дифференциальные уравнения обобщенной электродинамики и волновые уравнения, описывающие как поперечные, так и продольные электромагнитные волны. Описан процесс излучения обоих типов волн полуволновым вибратором Герца. Показано, что продольные электромагнитные волны распространяются в электропроводных средах. Приведен обзор публикаций, содержащих результаты экспериментов с продольными волнами.

Ключевые слова: поперечные электромагнитные волны, продольные электромагнитные волны, уравнения Максвелла, теорема Гельмгольца, скалярное магнитное поле

Введение

Целью настоящей обзорной статьи является анализ современного состояния относительно нового научного направления, связанного с теоретическим описанием и практическим использованием продольных электромагнитных волн. Под этим термином понимается электромагнитное излучение, волновой вектор которого по направлению совпадает с вектором напряженности электрического поля **E**. Сразу же заметим, что в классической электродинамике, в основе которой лежат уравнения Максвелла, электрическое поле имеет две компоненты: соленоидальную $\mathbf{E}_s$ и потенциальную:

$$\mathbf{E}_p = -\nabla\phi,$$

связанную со скалярным электрическим потенциалом ϕ. В общем случае имеется суперпозиция этих компонент:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_p. \qquad (1)$$

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00223-25-00.
** E-mail: aktomilin@tpu.ru
*** E-mail: VictorPanchelyuga@gmail.com

Такое представление соответствует теореме Гельмгольца, составляющей основу теории поля: любое векторное поле должно иметь две компоненты – соленоидальную и потенциальную. Однако магнитное поле считается сугубо вихревым, поскольку нет магнитных монополей. Потенциальная компонента магнитного поля отсутствует, и это не соответствует теореме Гельмгольца.

Таким образом, теория Максвелла содержит противоречие, разрешение которого представляется актуальнейшей задачей электродинамической теории. Как будет показано ниже, в результате ее решения открываются новые технические и технологические возможности, позволяющие реализовать на практике многие актуальные проекты.

1. Основы обобщенной электродинамики

Логически непротиворечивая идея должна учитывать два, казалось бы, взаимоисключающих положения: отсутствие в природе магнитных монополей и наличие физически содержательной потенциальной компоненты магнитного поля. Такая идея лежит в основе обобщенной электродинамики, которая начала формироваться во второй половине XX века. Она отталкивается от попыток Ампера сформулировать закон электромагнитного взаимодействия, учитывающий две составляющие магнитной силы: поперечную и продольную по отношению к току [1–2]. Современная электродинамика оперирует только магнитной силой, названной в честь Ампера. Она действует ортогонально току и определяется по формуле, предложенной О. Хэвисайдом во второй половине XIX века:

$$\mathbf{f}_A = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \,. \tag{2}$$

Как известно, ее можно использовать только при описании взаимодействия параллельных токов. Однако, в трактате Ампера [1] описаны два эксперимента, в которых взаимодействуют токи, расположенные на взаимно ортогональных линиях. При этом один из проводников движется вдоль тока, текущего в нем, то есть он испытывает действие продольной магнитной силы. Множество подобных экспериментов, реализованных современными авторами, описано в монографиях [3-4]. В [4] сформулирован обобщенный закон электромагнитного взаимодействия. В частном случае при взаимодействии двух ортогонально расположенных токов на один из них действует сила Ампера (2), а на другой продольная сила плотности:

$$\mathbf{f}^* = \mathbf{j} B^* \,, \tag{3}$$

где $B^* = B^*(\mathbf{r}, t)$ – скалярная функция индукции потенциального (скалярного) магнитного поля (ПМП или СМП). Она является знакопеременной, соответственно, сила $\mathbf{f}^*$ действует по току, если проводник находится в положительном СМП, и против тока – в отрицательном СМП. Условия возникновения и свойства СМП, а также эксперименты с ним описаны в монографиях [3–4].

Система дифференциальных уравнений обобщенной электродинамики, учитывающая СМП, в условно неподвижной системе отсчета выглядит следующим образом:

$$\nabla \times \mathbf{H} + \nabla H^* = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \tag{4}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \tag{5}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho + \varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\partial B^*}{\partial t}, \tag{6}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \tag{7}$$

Ее следует дополнить соотношениями

$$\mathbf{B} = \mu' \mu_0 \mathbf{H}, \; B^* = \mu' \mu_0 H^*, \; \mathbf{D} = \varepsilon' \varepsilon_0 \mathbf{E}_s + \varepsilon' \varepsilon_0 \mathbf{E}_p.$$

Как следует из уравнения (4), ток проводимости **j** создает как векторное (вихревое), так и скалярное (потенциальное) магнитные поля. В общем случае обе эти составляющие единого магнитного поля являются нестационарными и неоднородными.

Уравнение (5) выражает закон вихревой электромагнитной индукции, а из уравнения (6) следует, что изменение индукции СМП приводит к возникновению «зарядов смещения» $\varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\partial B^*}{\partial t}$, которые наравне с электрическими зарядами плотности ρ являются источниками и стоками потенциального электрического поля. Заметим, что при этом нет необходимости использовать представление о магнитных монополях. Это явление можно назвать безвихревой электромагнитной индукцией. Оно подтверждено экспериментами, описанными в монографии [4].

Таким образом, обобщенная электродинамика является потенциально-вихревой теорией, учитывающей в полной мере все компоненты электрического и магнитного полей. К этому выводу независимо друг от друга различными путями пришли многие исследователи [3-10].

2. Волновые уравнения

Понятно, что потенциальная компонента магнитного поля участвует в волновом электромагнитном процессе. Применив оператор $\partial/\partial t$ к уравнению (4), после преобразований с учетом (5) и (6) получим два независимых уравнения для потенциальной и вихревой компонент электрического поля соответственно:

$$\Delta \mathbf{E}_p - \mu' \mu_0 \varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}_p}{\partial t^2} = \mu' \mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}_p}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon' \varepsilon_0} \nabla \rho, \tag{8}$$

$$\Delta \mathbf{E}_s - \mu' \mu_0 \varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}_s}{\partial t^2} = \mu' \mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}_s}{\partial t}. \tag{9}$$

Вычислив производную по времени от уравнения (5), с учетом (4), получим волновое уравнение для вектора $\mathbf{H}$:

$$\Delta\mathbf{H} - \varepsilon'\varepsilon_0\mu'\mu_0 \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} = -\nabla\times\mathbf{j}. \tag{10}$$

С использованием уравнений (9) и (10) описывается известный механизм излучения и распространения поперечных электромагнитных волн.

Аналогичным образом, преобразовав (6) с учетом (4), получается волновое уравнение для скалярной функции H^*:

$$\Delta H^* - \varepsilon'\varepsilon_0\mu'\mu_0 \frac{\partial^2 H^*}{\partial t^2} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot\mathbf{j}. \tag{11}$$

Дифференциальные уравнения (8) и (11) описывают механизм излучения и распространения продольных электромагнитных волн.

Обобщенная электродинамика (макроскопическая теория) указывает на два типа электромагнитных волн: поперечные и продольные. Первый тип волн давно известен, хорошо исследован и используется на практике. Второй тип волн открыт сравнительно недавно. Обзоры публикаций по этой проблеме приведены в монографиях [4; 11–14].

В качестве примера рассмотрим полуволновой вибратор Герца с током $\mathbf{j}_p(t)$ (рис. 1). Поскольку проводник с током имеет конечную длину, кроме векторного магнитного поля, создается СМП. Пусть ток возрастает, следовательно, индукция СМП увеличивается. При этом индуцированное электрическое поле $\mathbf{E}_p$ стремится компенсировать исходный ток в проводнике (аналог правила Ленца). Рассмотрим поле вблизи точек *A* и *B*, совпадающих с концами токового отрезка. В точке *A* образуется сток индуцированного электрического поля $\mathbf{E}_p$, то есть $\frac{\partial B^*}{\partial t} < 0$, и создается отрицательное возрастающее по модулю СМП. Вблизи точки *B* создается положительное СМП, которое тоже возрастает $\left(\frac{\partial B^*}{\partial t} > 0\right)$, следовательно, здесь имеется источник индуцированного электрического поля $\mathbf{E}_p$. Когда исходный ток $\mathbf{j}_p(t)$ начинает убывать, полярность зон СМП изменяется.

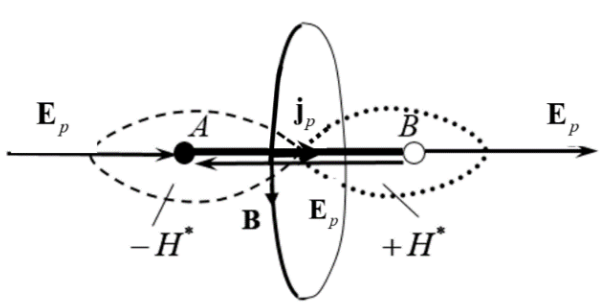

Рис. 1. Излучение электромагнитной волны полуволновым вибратором Герца
Источник: составлено авторами.

Таким образом, вибратор Герца, кроме поперечной волны, излучает еще и продольную, которая распространяется вдоль линии его расположения.

Важно заметить, что переменный электрический ток в самом вибраторе тоже можно рассматривать как продольную электромагнитную волну. Такое представление в традиционной теории не используется, поскольку в ней отсутствует СМП. А для описания волнового процесса требуются две потенциальные компоненты: электрическая и магнитная. Поэтому считается, что электромагнитный процесс в электропроводной среде распространяться не может. Этот ошибочный вывод исключил возможность создания средств подводной радиосвязи.

В случае падения поперечной электромагнитной волны из диэлектрика на поверхность проводника считается, что происходит затухание электромагнитного процесса. Вопрос о преобразовании энергии при этом не имеет однозначного решения. В обобщенной теории имеется физически содержательное толкование: поперечная электромагнитная волна трансформируется в продольную. Именно на этом принципе работают все принимающие антенны: энергия падающей поперечной волны преобразуется в переменный ток в проводнике, то есть в продольную волну.

Полное теоретическое описание процессов излучения и распространения комплексной (потенциально-вихревой) электромагнитной волны содержится в монографии [4]. Там же приведено подробное математическое описание распространения продольной электромагнитной волны в электропроводной среде.

3. Эксперименты с продольными электромагнитными волнами

Теоретические выводы, приведенные выше, успешно подтвердились в лабораторных и натурных испытаниях. В монографии Г.В. Николаева [15] описаны эксперименты с двухконтурными (биполярными) антеннами, одна из которых служит излучателем, другая – приемником продольных электромагнитных волн. Такие антенны образуют электрическую систему тороидального типа, в которой вихревое и потенциальное магнитные поля позиционно разделены: вихревое магнитное поле присутствует внутри тороидальной обмотки, а СМП создается на торцах тороида. Первые эксперименты с тороидальными антеннами в речной воде произведены М.А. Суриным в 2020–2022-е годы. Зафиксирован факт передачи коротковолнового сигнала между подводными антеннами на расстояние в несколько сотен метров.

В статье [16] описан эксперимент с тороидальным соленоидом, по которому попускается ток частотой 50 Гц. Обмотка тороида заключена в сплошной заземленный экран. В результате на оси внутреннего отверстия тороида (за пределами экранированной области) обнаружено и измерено электрометрическим методом потенциальное электрическое поле. Показано, что этот эффект не связан с электромагнитными полями рассеяния. Сделан вывод о возможности проникновения продольной электромагнитной волны сквозь

заземленный экран. Это ее свойство следует учитывать при решении задач электромагнитной совместимости.

В статьях [17-18] приведены результаты лабораторных экспериментов со сферическими антеннами. Показано, что электропроводная сфера, на которой имеется нестационарный заряд $\rho = \rho(t)$ (или квазизаряд плотности $\varepsilon'\varepsilon_0 \frac{\partial B^*}{\partial t}$), излучает сферически симметричную продольную электромагнитную волну. В частности, описан эксперимент по передаче радиосигнала на частоте 27 МГц из клетки Фарадея [18].

В 2021–2023-х годах в акватории Японского моря произведена серия экспериментов по передаче высокочастотного модулированного радиосигнала с помощью сферических антенн, сконструированных в Дальневосточном федеральном университете. Условия экспериментов, анализ их результатов и соответствующая теория изложены в статьях [19–21]. В 2024 году изготовлен новый комплекс приемопередающей аппаратуры, который успешно испытан на пресноводном Можайском водохранилище [22]. Результаты, полученные в выполненных исследованиях, позволяют создать принципиально новые системы высокоскоростной радиосвязи между мобильными подводными объектами. Имеется принципиальная возможность организовать канал двухсторонней радиосвязи наземной или спутниковой станции с мобильным подводным объектом. Теоретические и экспериментальные работы в данном направлении ведутся в США [23–24], Европе [7; 14; 17; 25]. Есть сведения об успешных экспериментах, произведенных в Китае.

Заключение

Эксперименты, кратко представленные выше, позволяют говорить об открытии СМП и продольных электромагнитных волн, что существенно расширяет научные представления об электромагнитном поле и электромагнитных волнах. В настоящее время это научное направление содержит обоснованную теоретическую базу, подтвержденную результатами лабораторных и натурных экспериментов. В частности, найдено принципиальное решение по организации каналов высокочастотной подводной радиосвязи между автономными мобильными объектами. Представлены результаты испытаний в натурных условиях приемопередающих радиокомплексов двух типов: тороидальных и сферических.

Литература

1. *Ампер А. М.* Электродинамика. Москва : АН СССР, 1954.
2. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. Москва : Наука, 1976.
3. *Николаев Г. В.* Современная электродинамика и причины её парадоксальности. Томск : Твердыня, 2003.
4. *Томилин А. К.* Обобщенная электродинамика. Москва : Триумф, 2020. https://doi.org/10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04

5. *Ohmura T.* A new formulation on the electromagnetic field // Prog. Theor. Phys. 1956. Vol. 16. P. 684–685.
6. *Хворостенко Н. П.* Продольные электромагнитные волны // Изв. ВУЗов. Физика. 1992. № 3. С. 24–29.
7. *Van Vlaenderen K. J., Waser A.* Generalization of classical electrodynamics to admit a scalar field and longitudinal waves // Hadronic Journal. 2001. No. 24. P. 609–628.
8. *Woodside D. A.* Three-vector and scalar field identities and uniqueness theorems in Euclidean and Minkowski spaces // Am. J. Phys. 2009. Vol. 77, no. 5. P. 438-446.
9. *Arbab A. I., Satti Z. A.* On the Generalized Maxwell Equations and Their Prediction of Electroscalar Wave // Progress in physics. 2009. Vol. 2. P. 8–13.
10. *Кечкин О. В., Мошарев П. А.* Общее гармоническое решение в электродинамике с дилатоном: точное выражение для полей и обобщенная сила Лоренца // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2020. № 5. С. 45–51.
11. *Нефедов Е. И.* Электромагнитные поля и волны. Москва : Академия, 2014.
12. *Nefyodov E. I., Smolskiy S. M.* Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas. USA : Scientific Research Publishers, 2012.
13. *Протопопов А. А.* Физико-математические основы теории продольных электромагнитных волн: монография / под общ. ред. Е. И. Нефедова, А. А. Яшина. Тула : ТулГУ, 1999. 110 с.
14. *Zohuri B.* Scalar Waves // Scalar Wave Driven Energy Applications. Springer, 2019. P. 443. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91023-9_6
15. *Николаев Г. В.* Непротиворечивая электродинамика : теории, эксперименты, парадоксы. Томск, 1997. 144 с.
16. *Томилин А. К., Мисюченко И., Викулин В. С.* Исследование квазистационарного электромагнитного поляна оси тороидального соленоида электрометрическим методом // Прикладная физика. 2024. № 5. С. 5–11. https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-5-5-11
17. *Meyl K.* Scalar Waves: Theory and Experiments // Journal of Scientific Exploration. 2001. Vol. 15, no. 2. P. 199–205.
18. *Sacco B., Томилин А. К.* The Study of Electromagnetic Processes in the Experiments of Tesla. 2012. URL: http://viXra.org/abs/1210.0158
19. *Томилин А.К., Лукин А.Ф., Гульков А.Н.* Эксперимент по созданию канала радиосвязи в морской среде // ПЖТФ. 2021. Т. 47, № 11. https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710 [Tomilin A. K., Lukin A. F., Gulkov A. N. An Experiment to Form a Radio Communication Channel in a Marine Environment // Technical Physics Letters. 2021. Vol. 47, no. 6. https://doi.org/10.1134/S1063785021060146]
20. *Лукин А.Ф., Томилин А.К., Гульков А.Н., Кремс К. А.* Оценка характеристик канала радиосвязи в морской среде // ЖТФ. 2022. Т. 92, № 9. https://doi.org/10.21883/JTF.2022.09.52935.43-22. [Lukin A. F., Tomilin A. K., Gulkov A. N., Krems K. A. Radio communication channel characteristics estimation in the marine environment // Technical Physics. 2022. Vol. 92, no. 9. https://doi.org/10.21883/TP.2022.09.54688.43-22]
21. *Томилин А.К.* Принцип организации канала подводной радиосвязи с использованием шаровых антенн // ЖТФ. 2023. Т. 93, № 3. https://doi.org/10.21883/JTF.2023.03.54852.255-22
22. *Tomilin A., Panchelyuga V., Panchelyuga M.* Theoretical Basis and Development of Short-Wave Underwater Radio Communication Systems. 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). P. 517–521. https://doi.org/10.1109/RMC62880.2024.10845899

23. *Hively L. M.* Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves. Patent № US 9, 306,527 B1. Apr. 5. 2016.

24. *Hively L. M., Land M.* Extended electrodynamics and SHP theory // Journal of Physics: Conference Series 1956 (2021). Article no. 012011. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1956/1/012011

25. *Monstein C., Wesley J. P.* Observation of Scalar Longitudinal Electrodynamic Waves // Europhysics Letters. 2002. Vol. 59, no. 4. P. 514–520.

LONGITUDINAL ELECTROMAGNETIC WAVES

Aleksandr K. Tomilin[1*], Victor A. Panchelyuga[2]**

[1]Department of Mechanical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Ave, Tomsk, 634050, Russian Federation
[2]Institute of Theoretical and Experimental Biophysics
of the Russian Academy of Science
3b Institutskaja St, Pushchino, Moscow region, 142290, Russian Federation

Abstract. The initial idea of potential-vortex electrodynamics theory is discussed. Differential equations of generalized electrodynamics and wave equations describing both transverse and longitudinal electromagnetic waves are presented. The process of radiation of both types of waves by a half-wave Hertz vibrator is described. It is shown that longitudinal electromagnetic waves propagate in electrically conducting media. A short review of publications containing the results of experiments with longitudinal waves is given.

Keywords: transverse electromagnetic waves, longitudinal electromagnetic waves, Maxwell's equations, Helmholtz theorem, scalar magnetic field

[*] E-mail: aktomilin@tpu.ru
[**] E-mail: VictorPanchelyuga@gmail.com