

УДК 537.87

ЗОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ МАЛЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

А. Н. Думин¹, В. А. Плахтий¹, Я. С. Вольвач², О. А. Думина³

¹ Харьковський національний університет ім. В.Н. Каразіна, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: dumin@karazin.ua

² Material Science & Engineering Department, University of California, San Diego (UCSD), 9500 Gilman Drive,
La Jolla, CA 92093-0418, USA

³ К.З. Харьковський фізико-математический лицей №27 61004, г. Харьков, ул. Марьянская, 12/14
Поступила в редакцию 21 марта 2017 г.

Методом векторного потенциала во временной области решена задача об излучении тонкого импульсного излучателя малых электрических размеров с равномерным распределением электрического тока. Сравняется классическое решение для поля излучения диполя Герца с полученным ранее путем учета большего количества слагаемых в разложении в ряд подынтегрального выражения для векторного потенциала, и с точным решением, рассчитанным численно для произвольных расстояний, включая предельно близкие расстояния до излучателя. Анализируются зоны излучения малого источника заданного нестационарного тока с точки зрения классических определений зон и определений, содержащих зависимость от времени, сформулированных Х.Ф. Хармутом. Предложен новый энергетический критерий зон импульсного излучения на основе подхода Х.Ф. Хармута.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диполь Герца, временная область, нестационарные поля, зоны излучения

Методом векторного потенціалу в часовому просторі розв'язана задача про випромінювання тонкого імпульсного випромінювача малих електричних розмірів з рівномірним розподілом електричного струму. Порівнюється класичний розв'язок для поля випромінювання диполя Герца з отриманим раніше шляхом врахування більшої кількості доданків в розкладанні в ряд підінтегрального виразу для векторного потенціалу, і з точним розв'язком, розрахованим чисельно для довільних відстаней, включаючи гранично близькі відстані до випромінювача. Аналізуються зони випромінювання малого джерела заданого нестационарного струму з точки зору класичних визначень зон і визначень, що містять залежність від часу, сформульованих Х.Ф. Хармутом. Запропоновано новий енергетичний критерій зон імпульсного випромінювання на основі підходу Х.Ф. Хармута.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: диполь Герца, часовий простір, нестационарні поля, зони випромінювання

The problem of the radiation of thin impulse radiator of small electrical sizes with uniform distribution of the electric current is solved by vector potential method in time domain. The classical solution for the Hertzian dipole field is compared with the one obtained earlier by taking into account a larger number of terms in the expansion of the integrand for the vector potential, and with the exact solution calculated numerically for arbitrary distances, including the extremely close distances to radiator. The radiation zones of the small source of a given nonstationary current are analyzed from the point of view of the classical definitions of zones and definitions containing the time dependence, formulated by H.F. Harmuth. New energy criterion for impulse radiation zones is proposed on the basis of H.F. Harmuth approach.

KEY WORDS: Hertzian dipole, time domain, nonstationary fields, radiation zones

ВВЕДЕНИЕ

Излучение многих реальных источников импульсного тока малых электрических размеров можно описать формулами для поля классического электрического диполя Герца во временной области в силу близкого к постоянному амплитудного распределения. Ранее было показано [1], что поведение поля в ближней зоне диполя не может быть точно описано классическими выражениями из-за сложного процесса образования свободной электромагнитной волны [2]. Во-первых, классические формулы получены в результате упрощения решения задачи путем представления подынтегрального выражения для векторного потенциала в виде разложения в ряд Тейлора по степеням малого параметра – отношения расстояния от начала координат до точки излучателя к расстоянию от начала координат до точки наблюдения. Во-вторых, легко видеть, что поток энергии импульсной волны, порожденный компонентами поля, преобладающими в дальней зоне, имеет место, согласно классическим выражениям для поля диполя, на любых сколь угодно близких расстояниях от излучателя. Это противоречит описанию физического процесса формирования электромагнитной волны, представленному ранее еще в работах Г. Герца, например в [3]. Источником электромагнитной волны Герц называл пространство, окружающее излучатель, следовательно, ее энергия не может присутствовать в центре излучателя.

С целью нахождения математического подтверждения правильности представления Г. Герца о процессе излучения, было получено в аналитической форме более точное решение задачи излучения во

временной области [4]. Для этого были учтены дополнительные слагаемые в разложении подынтегрального выражения в ряд Тейлора для векторного потенциала, взяты интегралы по объёму, окружающему источник, и получены аналитические выражения для всех компонент поля при сохранении в явном виде произвольной временной зависимости возбуждающего тока. Показано, что полученные формулы более точно описывают поведение поля вблизи диполя Герца и в пределе, при малых размерах источника тока в продольном направлении и поперечном сечении, переходят в классические выражения [4]. Также полученное решение физически более корректно описывает составляющие электромагнитного поля, преобладающие в дальней зоне потому, что при приближении к источнику они уменьшаются. Тем самым объём, окружающий излучатель, выступает как реальный источник волны [5], что полностью согласуется с физической интерпретацией формирования свободного электромагнитного поля, данной Г. Герцем [3]. Хотя новые выражения для излучаемого поля сложнее, чем классические – содержат толщину источника нестационарного тока и дополнительные степенные зависимости высших порядков от его длины

отношение энергии волновой составляющей магнитного поля (W_{wave}), представленной членом, содержащим первую производную от тока, и энергии полного магнитного поля (W). График зависимости данного отношения изображён на рис. 5 для $\theta = \pi/4$ в случае возбуждения коротким импульсом $Q(t) = Q_0 \exp(-t/\tau) \sin(t/\tau)$, где $\tau = 1$ нс. Предлагаем ближнюю границу волновой зоны определить как расстояние, на котором данное отношение достигает некоторого постоянного уровня, например 0,5 [12], [16]. Такой критерий даёт приблизительную границу дальней зоны в 0,4 м для выбранного возбуждающего тока и излучателя. Интересно проследить изменение положения границы волновой зоны в зависимости от длительности импульса возбуждающего тока, т.е. от τ . На рис. 6 построено отношение энергии волновой компоненты магнитного поля к суммарной энергии магнитного поля для разных расстояний наблюдения и угла $\theta = \pi/4$. Видно, что увеличение длительности импульса приводит к увеличению расстояния до ближней границы волновой зоны. В данном случае это указывает на схожесть с одним из классических критериев дальней зоны из [7]: $R \gg \lambda/2\pi$.

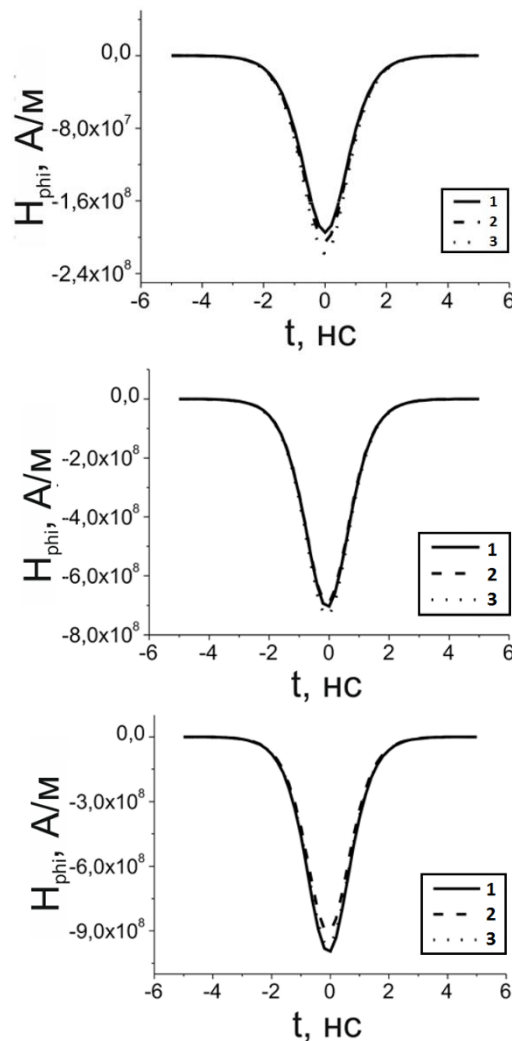


Рис. 2. Временные зависимости амплитуды поперечной составляющей магнитного поля для углов наблюдения $\theta = \pi/16, \pi/4, \pi/2$ (сверху вниз) на расстоянии наблюдения $r = 0,02$ м, полученные по классическим формулам (1), из улучшенного (2) и точного решения (3).

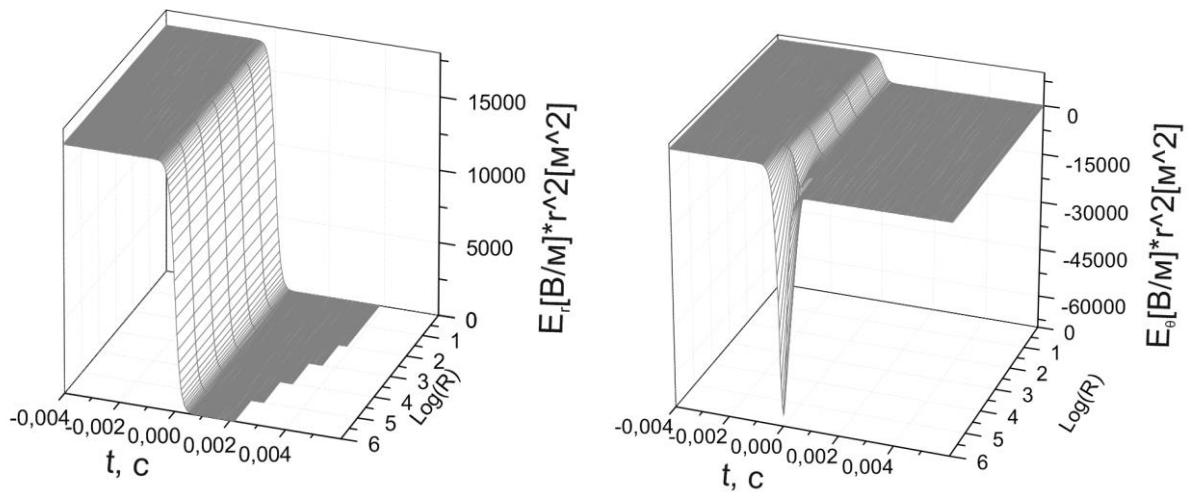


Рис. 3. Временные зависимости нормированных амплитуд продольной и поперечной компонент электрического поля для различных расстояний наблюдения для угла $\theta = \pi/2$.

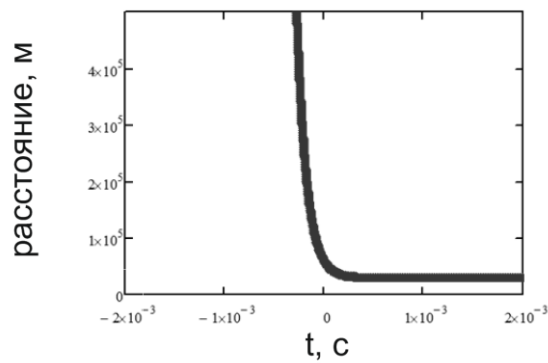


Рис. 4. Зависимость расстояния до ближней границы волновой зоны от времени по определению Хармута (3) для магнитной компоненты.

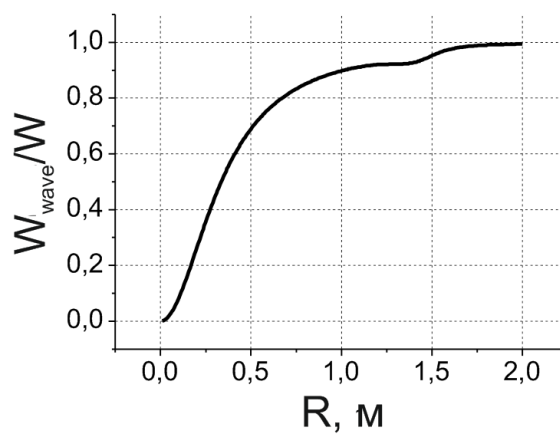


Рис. 5. Отношение энергии волновой компоненты магнитного поля к суммарной энергии магнитного поля в точке наблюдения, удаленной от излучателя на расстояние R , при угле $\theta = \pi/4$.

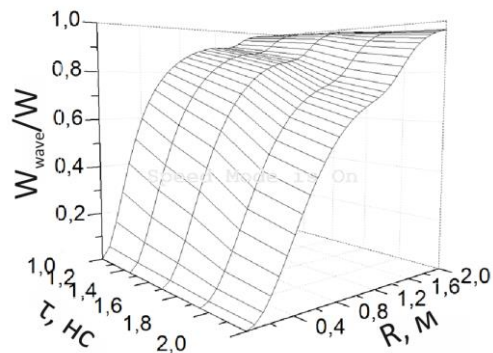


Рис. 6. Отношение энергии волновой компоненты магнитного поля к суммарной энергии магнитного поля при угле $\theta = \pi/4$ в точке наблюдения, удаленной от излучателя на расстояние R , для различных длительностей переходного процесса τ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано электромагнитное поле электрически малого излучателя, возбуждаемого импульсным током. Изучена трансформация временных форм полей на различных расстояниях, зоны излучения и критерий Хармута границы волновой зоны. Проиллюстрировано, что критерий Хармута, в котором граница дальней зоны зависит от временных параметров возбуждающего источника, в целом согласуется с классическим критерием для излучателя малых электрически размеров. Предложен новый энергетический критерий для нахождения расстояния дальней зоны импульсного излучателя, основанный на анализе отношения энергии волновой компоненты магнитного поля к полной его энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volvach Y.S., Dumin O.M., Dumina O.O., "The energy of the field radiated by Hertz dipole," Proc. VII International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2011), Kyiv, Ukraine, pp.86-88, 2011.
2. Schantz H.G., The art and science of ultrawideband antennas. – Artech House, London. – 2005. – 331 pp.
3. Герц Г. Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла / 50 лет волн Герца -М.: Академия Наук СССР, 1938. С. 92 – 119
4. Dumin O., Volvach I.S., Dumina O., "Transient Near field of Hertzian dipole", Proc. 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2012), Sevastopol, Ukraine, pp. 69-71, 17-21 September 2012.
5. Dumin O.M., Plakhtii V.A., Volvach I.S., Dumina O.O., "Near field of Hertzian dipole excited by impulse current", Proc. 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015), Kharkiv, Ukraine, pp. 90-92, 21-24 April 2015
6. Думин А.Н., Плахтий В.А., Вольвач Я.С., Думина О.А. Ближнее нестационарное поле диполя Герца // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2014, №1115, вип. 24. – С.29-34.
7. Balanis C.A., Antenna Theory. – New York: Wiley. – 1997. – 941 pp.
8. Hansen R.C., Microwave Scanning Antennas. – New York: Academic Press. – 1964. – 442 pp.
9. Содин Л.Г. Импульсное излучение антенны (электромагнитный снаряд) // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т.36, №5. – С.1014-1022.
10. Горобец Н.Н. Особенности волновых процессов в ближней зоне датчиков электрического и магнитного поля // Труды III Украинской конференции «Измерения в области ЭМС». – Винница (Украина, 21-25 октября). – 1991. – С.95-100.
11. Хармут Х. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. – М.: Радио и связь. – 1985. – 376 с.
12. Почанин Г.П., Почанина И.Е., Холод П.В. Антенна большого тока. Ближнее и дальнее поля. Международная научно-техническая конференция "Антенно - фидерные устройства, системы и средства радиосвязи.", г. Воронеж, 28 - 30 мая, 1997, т.1, с.47-56.
13. Почанин Г.П. Излучение сверхширокополосных импульсных электромагнитных полей антеннами большого тока Хармута. Дисс. канд. Физ.-мат. наук: 01.04.03. – Харьков, 2003. – 206 с.
14. Pochanin G.P., Masalov S.A. Large current radiators. Problems and progress Electromagnetic phenomena. – 2007. – Vol.7, №1 (18). – P.45-75.
15. Plakhtii V. A., Dumin O. M., Katrich V. A., Dumina O. O., Volvach I. S. Energy transformation of transient field of herzian dipole // Proc. 16 th IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2016). – Lviv (Ukraine, July 5-7). – 2016. – EMA-8.
16. Plakhtii V. A., Dumin O. M., Katrich V. A., Dumina O. O. Field regions of impulse current radiator of small size // Proc. 9 th International Kharkiv Symposium On Physics And Engineering Of Microwaves, Millimeter And Submillimeter Waves (MSMW-2016). – Kharkiv (Ukraine, June 21-24). – 2016. – D-27.