

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ИМПЕДАНСНЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН

Введение. Для радиосвязи в свободном пространстве и поглощающих средах широко используются резонансные проволочные антенны. Данные излучатели широко применяются в устройствах микроволновой диатермии, гипертермии и технологических микроволновых устройствах [1]. Как при радиосвязи, так и в технологических микроволновых устройствах, возникают особенности, связанные с образованием ближних реактивных полей как единичных излучателей, так и антенных решеток [2].

Известно, что ближние реактивные поля от излучения мобильных телефонов определенным образом воздействуют на организм человека. Однако единого мнения о характере этих воздействий в настоящее время не существует. Одни ученые считают, что антенны мобильных телефонов представляют опасность для мозга, другие обеспокоены генетическими заболеваниями, третьи утверждают об эффекте нагревания микроволновым излучением.

Достаточно давно был принят одинаковый предельно допустимый поток мощности для радиодиапазона, миллиметрового, субмиллиметрового, инфракрасного и оптического излучения, хотя он не учитывал ни рабочей частоты, ни вида модуляции [3]. В настоящее время установлены строгие ограничения на воздействие микроволнового излучения, например на частоте 1900 МГц, используемой в персональных коммуникационных службах (Personal Communications Services), люди не должны подвергаться микроволновому излучению плотностью более 1 мВт/см^2 . Для сотовых телефонов существует более строгий стандарт, основанный на норме удельного поглощения (Specific Absorption Rate, SAR) – показателе, определяющем сколько энергии реально поглощается телом. В работе [4] показано, что плотность потока мощности на поверхности полуволнового симметричного вибратора (частота – 900 МГц, радиус – 1,5 мм, мощность излучения – 1 Вт) превосходит временно допустимый уровень 10 Вт/м^2 [5] для пользователей радиотелефонов в 300 раз.

Ограничения, основанные на учете плотности излучения, не очень хорошо работают на расстояниях в пределах 20 см от передатчика, поскольку картина усложняется наличием у него собственных электрических и магнитных полей. Необходимы знания строгих критериев границ ближних полей излучателей, основанных на законах электродинамики излучающих систем [6]. В работах [6,7] показано, что оценка границы вредного реактивного излучения по разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля является более эффективной, нежели оценка только амплитудных характеристик проволочных вибраторных излучателей.

В данной работе проведен анализ реактивных свойств ближнего излучения поля телекоммуникационных тонких импедансных вибраторов в свободном пространстве. Представлены зависимости разности фаз поперечных компонент электромагнитного поля вибраторов от расстояния от излучателя при значениях поверхностного импеданса комбинированного (вещественного и комплексного) типа, позволяющие оценивать мнимую составляющую мощности ближнего поля.

Постановка задачи. Для вибраторов, представляющих собой прямолинейный импедансный цилиндр [8] ограниченных размеров, находящийся в произвольной однородной изотропной (в том числе проводящей) среде, исходным для анализа распределения тока является интегральное уравнение типа Поклингтона :

$$\left(\frac{d^2}{ds^2} + \kappa^2 \epsilon_1 \mu_1\right) \int_{-L}^L J(s') \frac{e^{-ik\sqrt{\epsilon_1 \mu_1} R(s, s')}}{R(s, s')} ds = -i\omega \epsilon_1 E_{os}(s) - i\omega \epsilon_1 z_i J_s, \quad (1)$$

где: $E_{os}(s)$ – поле сторонних источников; $R(s, s') = \sqrt{(s-s')^2 + r^2}$ – расстояние между точками наблюдения и интегрирования; ϵ_1 и μ_1 – диэлектрическая и магнитная проницаемость материала среды ($|kr\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}| \ll 1$); $k = 2\pi/\lambda$; s – продольная координата; z_i – комплексный внутренний импеданс; $Z_s = R_s + iX_s = 2\pi r z_i$ – поверхностный импеданс вибратора.

Для данного уравнения, которое является справедливым при произвольной реализации поверхностного импеданса, существует решение, пригодное для случая, когда вибратор представляет собой проводящий стержень с диэлектрической оболочкой [9]. Воспользуемся решением интегрального уравнения (1), которое было получено в работе [9], близким к решению, Миллера [10] для вибратора с импедансными граничными условиями и решению интегро-дифференциального уравнения Леонтовича – Левина для импедансных антенн.

С учетом асимптотического решения интегрального уравнения (1), полученного методом усреднения, были проведены исследования распределения тока и сопоставлены с экспериментальными данными [9, 10], показавшие хорошее совпадение. Для чисто мнимых импедансов фазовое распределение токов и их абсолютные значения в значительной мере зависят от величины поверхностного импеданса и могут быть как меньше, так и больше, чем в случае идеально проводящего вибратора [9]. Это следует из асимптотического решения для тока уравнения (1), когда вместо k используется $\tilde{k} = k_1 + i(\alpha/r)\bar{Z}_s\sqrt{\epsilon_1/\mu_1}$, где $\alpha = 1/2 \ln(r/2L)$, $k_1 = k\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$, $\bar{Z}_s = Z_s/120\pi$ [10]. Различные комбинации активного и реактивного импедансов дают возможность получать требуемое амплитудно-фазовое распределение токов и, следовательно, характеристики импедансных вибраторных излучателей в ближней зоне в свободном пространстве и окружающей среде.

Воспользуемся выражениями [7], однозначно определяющими поле излучения тонкого вибратора в материальной среде в сферической системе координат ρ, θ, φ :

$$\begin{aligned} E_\rho(\rho, \theta) &= \frac{k_1 \rho}{\omega \epsilon_1} \int_{-L}^L J(s) G(\rho, \theta, s) \left(\frac{2R}{\rho} W_1 \cos \theta - ik_1 s W_2 \sin^2 \theta \right) ds, \\ E_\theta(\rho, \theta) &= -\frac{k_1 \rho}{\omega \epsilon_1} \int_{-L}^L J(s) G(\rho, \theta, s) \left[\frac{2R}{\rho} W_1 - ik_1 W_2 (\rho - s \cos \theta) \right] ds, \\ H_\varphi(\rho, \theta) &= -\frac{ik_1 \rho \sin \theta}{c \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}} \int_{-L}^L J(s) G(\rho, \theta, s) R W_1 ds, \quad G(\rho, \theta, s) = \frac{e^{-ikR}}{R^3}, \\ R &= \sqrt{\rho^2 - 2\rho s \cos \theta + s^2}, \quad W_1 = 1 + 1/ik_1 R, \quad W_2 = 1 + 3/ik_1 R - 3/k_1^2 R^2. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 1 представлены зависимости разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля полуволнового резонансного вибратора от расстояния, отнесенного к длине волны в направлении максимума диаграммы направленности, т.е. при $\theta = 90^\circ$, с поверхностным комбинированным импедансом. Комбинация вещественного и комплексного импеданса представлена выражениями: $\bar{Z}_s = 1/[120\pi\sigma d - i(kr\mu \ln(r/h))]$, $\bar{Z}_s = 1/[120\pi\sigma d + i(kr(\epsilon - 1)/2)]$ [9], которые характеризуют магнитодиэлектрический металлизированный цилиндр с внутренним проводником радиуса h , при толщине металлизированного покрытия d , проводимости металла σ , диэлектрической проницаемости ϵ [9]. На рис. 1 представлены расчеты для антенны с $L_{\text{вибр}} = 0,5\lambda$, $r = 0,021\lambda$, $h = 0,007\lambda$, $\mu = 1$. В последующих расчетах значения $r/h = 3 \div 10$, значения σd составляли $10^{-2}/12\pi$, $10^{-3}/12\pi$, $10^{-4}/12\pi \text{ Ом}^{-1}$.

Анализ результатов. Результаты исследования функции распределения тока $J(s) = |J| e^{i \arg(J)}$ импедансных вибраторов с длиной, заметно отличающейся от резонансной, позволили уста-

новить, что магнитодиэлектрический импеданс оказывает существенное влияние на абсолютное значение и фазовое распределение тока. Расчеты распределения тока проводились для импеданса, моделирующего металлизированный магнитодиэлектрический штывровой вибратор при значениях σd и r/h , приведенных выше. Сопоставление результатов расчетов зависимостей абсолютного значения тока и его фазового распределения для импедансного излучателя длиной $0,4\lambda$ с безимпедансным в свободном пространстве показало, что абсолютное значение тока и фазовое распределение первого больше, чем в случае идеально проводящего излучателя. Для импедансного излучателя длиной $0,6\lambda$ в сравнении с идеально проводящим излучателем закономерности являются противоположными в сопоставлении с $L_{\text{вibr}}=0,4\lambda$.

Анализ амплитудных характеристик данных излучателей, т.е. компонент E_θ и H_ϕ при $\theta = 90^\circ$, зависимости от расстояния (R/λ) в сравнении с амплитудными характеристиками обычных вибраторов показал, что абсолютное значение компонент электромагнитного поля импедансного вибратора длиной $0,4\lambda$ в области ближнего поля превосходит абсолютное значение поперечных компонент электромагнитного поля проволочного идеально проводящего вибратора той же электрической длины. Для идеально проводящего излучателя длиной $0,6\lambda$ и более, в сравнении с импедансным излучателем того же электрического размера, наблюдалось меньшее абсолютное значения компонент электрического поля при расстояниях от излучателя, меньших $0,1\lambda$.

Было рассмотрено влияние мнимого импеданса на разность фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля для резонансного вибратора в ближней зоне при значениях $\bar{Z}_s = 2i/kr, i/3kr, i/40kr, i10^{-4}/kr$ (диэлектрический цилиндр). Результаты анализа показали, что уменьшение абсолютного значения мнимого поверхностного импеданса приводит к тому, что разность фаз

между поперечными компонентами электромагнитного поля уменьшается, как и в обычных излучателях [7].

Исследование влияния вещественного импеданса позволило установить, что с увеличением абсолютного значения поверхностного импеданса от $0,001kr$ до $0,1kr$ разность фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля изменяется от 0° до -90° при расстоянии от поверхности, вибратора меньшем $0,01\lambda$. Комбинация вещественного и мнимого импеданса также оказывает существенное влияние на величину реактивности ближнего поля вблизи резонансного импедансного вибратора длиной $0,5\lambda$, что подтверждается зависимостями, приведенными на рис. 1 для значений импеданса, при $\theta = 90^\circ$.

Общие результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что абсолютное значение комбинированного импеданса, т.е. $R_s + iX_s$, равное абсолютному значению как мнимого, так и вещественного импеданса, в отдельности дает разное значение разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля импедансного вибратора резонансной длины. Использование комбинированного импеданса позволяет получить требуемое значение разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля. Это дает основание полагать, что явление уменьшения реактивности ближнего поля, которое присутствует в тонких

исследования позволило установить, что с увеличением абсолютного значения поверхностного импеданса от $0,001kr$ до $0,1kr$ разность фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля изменяется от 0° до -90° при расстоянии от поверхности, вибратора меньшем $0,01\lambda$. Комбинация вещественного и мнимого импеданса также оказывает существенное влияние на величину реактивности ближнего поля вблизи резонансного импедансного вибратора длиной $0,5\lambda$, что подтверждается зависимостями, приведенными на рис. 1 для значений импеданса, при $\theta = 90^\circ$.

Общие результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что абсолютное значение комбинированного импеданса, т.е. $R_s + iX_s$, равное абсолютному значению как мнимого, так и вещественного импеданса, в отдельности дает разное значение разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля импедансного вибратора резонансной длины. Использование комбинированного импеданса позволяет получить требуемое значение разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля. Это дает основание полагать, что явление уменьшения реактивности ближнего поля, которое присутствует в тонких

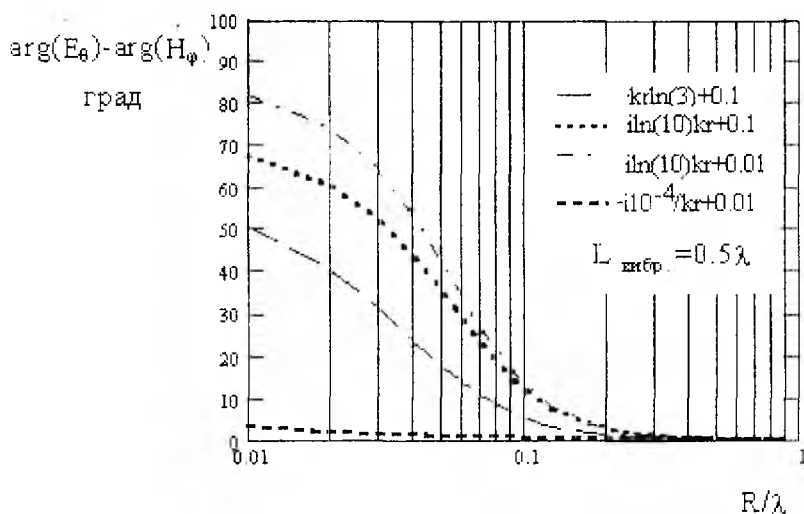


Рис. 1

резонансных вибраторах, будет иметь место и в некоторых нерезонансных вибраторных излучателях.

На рис. 2. представлены зависимости $\arg(E_\theta) - \arg(H_\phi) = f(R/\lambda)$ для импедансного вибратора длиной $0,4\lambda$ при тех же значениях импеданса, что и на графиках приведенных, на рис. 1. Здесь зависимости $\arg(E_\theta) - \arg(H_\phi) = f(R/\lambda)$, когда угол $\theta = 90^\circ$, при $Z_n = const.$ являются нелинейными в отличие от импедансного излучателя резонансной длины.

Из этого рисунка видно, что для вибратора с импедансом, $0,01 - i10^{-4} kr$ (диэлектрический цилиндр с покрытием из металла) зависимость разности фаз фактически не отличается от зависимости разности фаз безимпедансного вибратора той же длины [7]. Увеличение мнимой составляющей импеданса до значения $i\ln(10)kr$ приводит к существенному качественному и количественному изменению фазовых

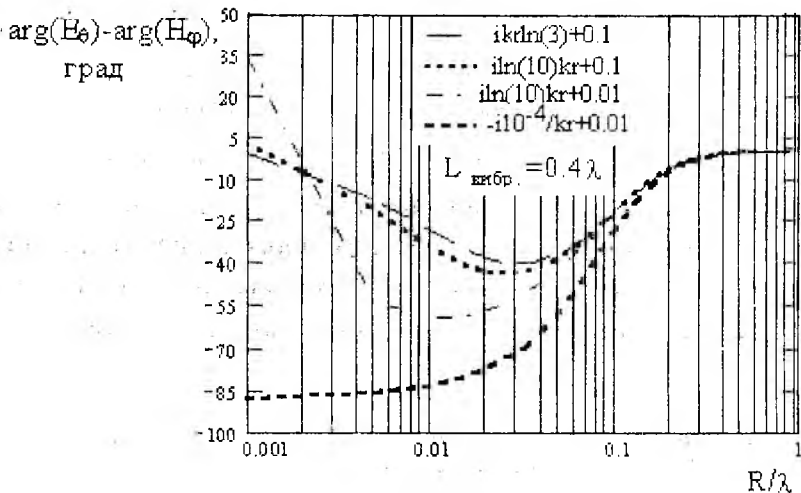


Рис. 2

характеристик вибратора на расстояниях $0,001\lambda - 0,1\lambda$. Разность фаз на данном интервале изменяется от $+35^\circ$ до -55° на расстояниях $0,001\lambda - 0,01\lambda$ и при увеличении расстояния до $0,1\lambda$ уменьшается до нуля градусов, как у безимпедансных вибраторов той же электрической длины. При значениях импедансов, равных $0,01 + i\ln(10) kr$ и $0,1 + i\ln(3) kr$, так же наблюдается увеличение и уменьшение разности фаз в зависимости от расстояния характеристик, которое показывает на уменьшение реактивности ближнего поля при уменьшении расстояния от $0,03\lambda$ до $0,001\lambda$, чего не наблюдалось в обычных проволочных излучателях [7].

Для излучателя длиной $0,6\lambda$ также наблюдается стремление разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля к величинам, абсолютное значение, которых существенно меньше 90° , при расстояниях от излучателя $0,001\lambda - 0,01\lambda$. Однако нелинейные зависимости (увеличение и уменьшение абсолютного значения разности фаз), которые наблюдались в вибраторе длиной $0,4\lambda$, в излучателях с длиной, большей, чем $0,5\lambda$ не наблюдаются.

Закономерности, связанные с влиянием абсолютного значения импеданса на разность фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля, характерные для вибратора меньшей электрической длины, в вибраторе длиной $0,6\lambda$ не присутствуют, о чем свидетельствуют графики, приведенные на рис. 3. Как видим, для вибратора с импедансом $0,1 + i\ln(3) kr$ наблюдается уменьшение разности фаз между компонентами электромагнитного поля до минимального значения, равного $+50^\circ$ при $R/\lambda = 0,001$,

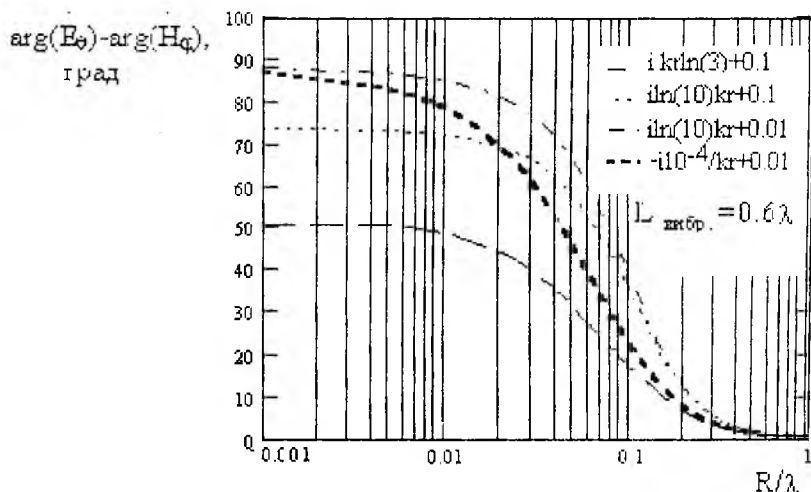


Рис. 3

чего не наблюдалось для безимпедансных вибраторов той же длины [7]. На характеристиках разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля, которые приведены на рис. 1 и 2, четко видны пересечения кривых, которые характеризуют неравномерность влияния величины импеданса на характер данных зависимостей.

Выводы. Общий вывод, который следует из анализа реактивных свойств ближнего поля, вытекающий из теоремы Пойтинга для комплексных амплитуд, позволяет утверждать, что поверхностное сопротивление приводит к качественному отличию реактивных свойств проволочных излучателей. Разность фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля в зависимости от расстояния в направлении максимума диаграммы направленности ($\theta = 90^\circ$) приобретает нелинейный вид при $L_{\text{вибр}} < 0,5\lambda$.

Влияние комбинированного импеданса, характерного для магнитодиэлектрического металлизированного цилиндра с внутренним проводником, приводит к существенному уменьшению реактивности ближнего поля телекоммуникационного излучения вибраторных излучателей, электрическая длина которых заметно превосходит резонансное значение, равное $0,5\lambda$.

Список литературы: 1. *Мальшенко Ю. И.* Выбор микроволновых технологий для медицинских установок гипертермии // Микроволновые технологии в народном хозяйстве, Киев-Одесса. 2000. Вып. 2-3. С. 147-152. 2. *Gorobets N. N. and Tsekhmistro R. I.* Effect of the Near Field on the Electromagnetic Power Distribution in Annular Antenna Arrays // Telecommunications and Radio Engineering. 1999. V. 53. N 4-5. P. 71-75. 3. *Булгаков Б. М., Нарытчик Т. Н.* Телекоммуникационное радиоизлучение // Сети и телекоммуникации. 2001. № 4 Т.18. С.61-63. 4. *Бузов. А.Л., Казанский Л. С., Минкин М. А., Юдин В. В.* Расчет плотности потока энергии вблизи симметричного вибратора методом обобщенной эквивалентной цепи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2000. Т.3. № 2. С. 51-53. 5. *МУК 4.3.043.-96.* Определение плотности потока мощности электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 70-300 ГГц.: Метод. указания М.: Госкомсвязьнадзор России, 1996. 42. С. 6. 6. *Горобец Н. Н.* Особенности волновых процессов в ближней зоне датчиков электрического и магнитного поля // Методы и средства измерения в области электромагнитной совместимости: Труды III Республиканской НТК. Винница, 1991. С. 95-100. 7. *Горобец Н.Н., Цехмистро Р.И.* Эффекты ближней зоны резонансных проволочных антенн // Вісник Харківського національного університету. Радіофізика та електроніка. 2001. № 513. С.112-118. 8. *Глушковский Э. А., Левин Б. М., Рабинович Е. А.* Интегральное уравнение для тока в тонком импедансном вибраторе // Радиотехника. 1967. Т 22, № 12. С. 18-23. 9. *Нестеренко М. В., Петленко В.А.* Тонкий импедансный вибратор в поглощающей среде // Вестник Харьковского университета. 1985. № 273. С. 11-14. 10. *Миллер М.А.* Применение однородных граничных условий в теории тонких антенн // ЖТФ. 1954. Т.24. № 8. С. 1483 - 1495.

*Харьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 12.08.2004