

Л. И. Степанова

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ АНТЕННЫ МОБИЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА С ГОЛОВОЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

В статье проведена оценка взаимодействия электромагнитного поля (ЭМП) антенны мобильного терминала (МТ) на биологическую модель головы человека во время телефонного разговора путем моделирования данного процесса в программном комплексе FEKO. Это позволило определить величину удельной мощности поглощения SAR, которая является одной из характеристик мобильного терминала, в биологических тканях головы пользователя МТ при различных расстояниях между ними. Благодаря этому можно проверить соответствие величины SAR требованиям международных стандартов на допустимое электромагнитное воздействие мобильных терминалов, а также на этапе проектирования определять фактическую мощность излучения антенны средств мобильной связи (СМС).

Ключевые слова: электромагнитное поле, антенна мобильного терминала, мощность излучения антенны, мощность поглощения в теле человека, напряженность электрического поля.

Введение

На сегодняшний день современные мобильные терминалы относят к наиболее сложным микроволновым устройствам, так как в их небольшом объеме размещается большое количество микросхем, выполняющих самые разнообразные функции в условиях ограниченного энергопитания. Как известно, мобильный терминал обладает определенной величиной мощности, излучаемой его антенной, для обеспечения заданного качества и дальности мобильной связи. Однако наряду с этим в условиях широкого применения мобильных терминалов одной из важных актуальных задач проектирования СМС и электромагнитной экологии является оценка воздействия ЭМП антенны МТ на голову пользователя во время телефонного разговора для установления соответствия величины электромагнитного облучения требованиям международных стандартов, а также определения фактической мощности излучения антенны.

Постановка задачи

Переход к сетям третьего и четвертого поколений значительно усложняет процесс проектирования МТ, увеличиваются трудовые и материальные затраты на проведение экспериментальных исследований. Жесткие требования к уровню мощности излучения, поглощаемого в теле пользователя МТ, то есть SAR (Specific Absorption Rate) [1], который характеризует степень влияния «телефон – человек», требуют проведения сложных и дорогостоящих измерений. Средства такого контроля должны быть неинвазивными (невозможно непосредственно измерять поле внутри человеческого тела или отдельных органах) и неискажающими (внесение измерительных зондов в ближнее поле мобильных телефонов изменяет их параметры). В этих условиях значительно возрастает роль математического (имитационного) моделирования высокочастотных электромагнитных полей, создаваемых мобильными терминалами, и в первую очередь, расчета уровня мощности излучения, поглощаемого телом человека.

Существует ряд работ, например, [2, 3, 4], в которых показана последовательность разработки конструкции антенны мобильного терминала, расчет величины SAR в зависимости от положения антенны внутри мобильного терминала, а также расчет и оценка степени влияния электромагнитного излучения на человека с точки зрения биоэффекта, то

есть реакции организма на уровень электромагнитного излучения (например, величина температуры нагрева головы), и времени его действия. Анализ этих работ показал, что задачи определения величины SAR и мощности потерь ЭМП антенны МТ в зависимости от расстояния между мобильным терминалом и головой пользователя во время телефонного разговора, а также учета изменений характеристик МТ в непосредственной близости головы пользователя остались вне их внимания, поэтому **целью** данной работы является моделирование процесса взаимодействия ЭМП антенны мобильного терминала и головы человека во время разговора для определения величины SAR, мощности потерь ЭМП при различных расстояниях между МТ и головой пользователя.

Энергетические соотношения электромагнитного поля вблизи антенны мобильного терминала

Согласно нормативному документу [5], понятие удельной мощности поглощения SAR определяется как производная по времени от приращенной энергии ЭМП, которая поглощена (рассеяна) приращенной массой, находящейся в бесконечно малом элементе объема заданной плотности, и выражается с помощью выражения

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right), \quad (1)$$

где SAR – удельная мощность поглощения излучения, Вт/кг; dW – приращение энергии; $dm = \rho dV$ – приращение массы в объеме V ; dV – бесконечно малый элемент объема; ρ – плотность биологической ткани тела человека.

То есть, другими словами, SAR – это превращение энергии ЭМП в другую форму материи (тепло) при приближении тела с заданной массой к источнику излучения. В результате этого появляется мощность потерь ЭМП, которое излучается МТ, поэтому фактическую мощность излучения антенны МТ предлагаем определять по выражению

$$P_{\Sigma \text{реал}} = P_{\Sigma} - P_{\text{пот.чел}}, \quad (2)$$

где $P_{\Sigma \text{реал}}$ – фактическая мощность излучения антенны МТ; P_{Σ} – мощность излучения антенны МТ; $P_{\Sigma} = \oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$; \vec{P} – вектор Пойнтинга, который показывает направление движения энергии и равен по величине плотности ее потока; S – единичная площадь пространства, которая перпендикулярна направлению распространения вектора Пойнтинга; $P_{\text{пот.чел}}$ – мощность потерь в теле пользователя МТ.

Таким образом, для нахождения фактической мощности излучения антенны МТ на этапе его проектирования необходимо учитывать мощность поглощения в голове человека во время телефонного разговора.

Моделирование взаимодействия ЭМП антенны МТ и головы пользователя

В данной работе исследование взаимодействия электромагнитного излучения телефона с головой пользователя было проведено с помощью программы FEKO v 5.5 [6]. Эта программа основана на методе FDTD (метод конечных разностей во временном диапазоне (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD) – один из самых популярных методов вычислительной электродинамики, основанный на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме) и позволяет найти все необходимые характеристики поля в ближней и дальней зонах.

В работе сначала была смоделирована антенна МТ и рассчитаны некоторые ее характеристики, в первую очередь, модуль комплексного коэффициента отражения МТ,

диаграмма направленности (ДН) при отсутствии рядом головы пользователя, а затем на нескольких расстояниях между головой и МТ.

Очевидно, что большое диэлектрическое тело, а именно – модель головы человека, которое находится в ближнем поле антенны МТ, должно повлиять на характеристики антенны, а именно – на модуль коэффициента отражения (рис. 1), а также на ее диаграмму направленности (рис. 2).

Числовые расчеты характеристик МТ в присутствии головы человека, проведенные с помощью FEKO, подтверждают это.

На рис. 1 показаны частотные зависимости модуля комплексного коэффициента отражения S_{11} (зависимость согласования его антенны в свободном пространстве) при расстояниях 0 мм и 5 мм между антенной МТ и головой пользователя, а также при ее отсутствии. Данная характеристика показывает, что при разном расстоянии между антенной МТ и головой пользователя рабочая (резонансная) частота меняется.

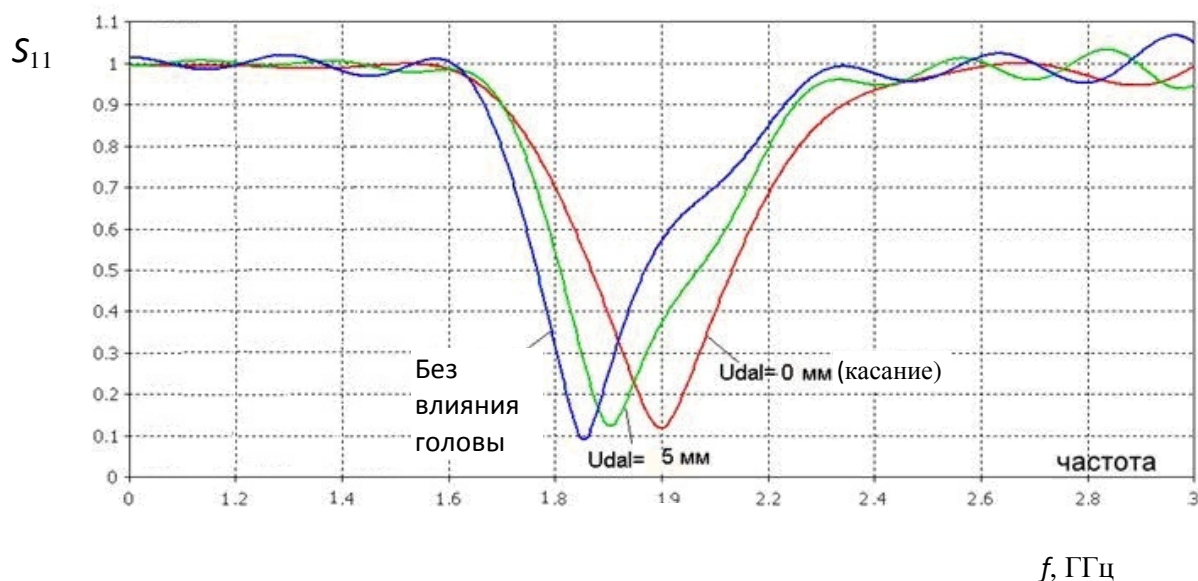


Рис. 1. Рассчитанные частотные характеристики антенны при отсутствии и в присутствии фантома головы пользователя

Если $S_{11} = 1$, то вся мощность отражается от антенны – и ничего не излучается, если $S_{11} = 0$, то это означает, что мощность, которая подводится к антенне, полностью излучается без потерь. Допустимые границы значения этой величины, как правило, составляют от 0 до 0,3. Из графика видно, что без влияния головы рабочая частота находится на 1,82 ГГц, а $S_{11} = 0,1$, а когда рядом с антенной на расстоянии 5 мм находится голова пользователя, то частотная характеристика сдвигается вправо, однако главное то, что теперь на рабочей частоте 1,82 ГГц модуль комплексного коэффициента отражения увеличился до 0,3, т. е. увеличился в три раза. Таким образом, теперь напряжение отражения увеличилось, либо же голова поглотила больше излученной мощности.

На рис. 2 показаны диаграммы направленности антенны МТ при расстояниях от 0 до 10 мм между данной антенной и головой пользователя.

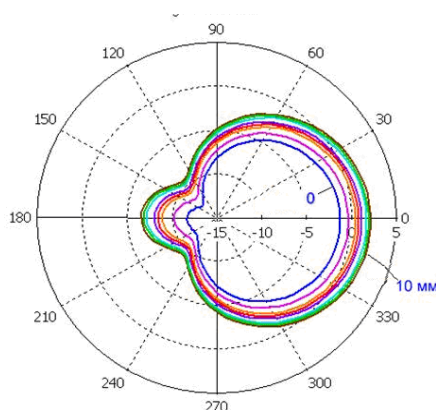


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны МТ при расстояниях от нее до головы человека от 0 до 10 мм

На рис. 2 голова человека экранирует поле антенны в направлении $\varphi = 180$ град, поэтому поле излучения имеет значительно меньшую величину в этом направлении.

Таким образом, вышеприведенное указывает на факт влияния присутствия головы человека рядом с МТ во время телефонного разговора на характеристики мобильного терминала, что требует учета этих явлений на этапе проектирования СМС.

В работе были проведены расчеты SAR для различных расстояний между антенной МТ и головой человека. Расчет поля, создаваемого антенной, проводился на частоте 1,8 ГГц для PIFA-антенны мощностью 2 Вт в зависимости от расстояния между головой и антенной от 0 мм до 10 мм. Модель головы человека представляла собой трехсферный шар с единым центром, каждая из сфер имела биологические параметры тканей головы пользователя, а именно – мозг, кость, кожа.

При воздействии пользователя мобильного терминала величина КПД антенны, определённая программным комплексом FEKO, уменьшается в пределах 10 %, появляется мощность потерь в пределах 20 % от всей мощности излучения, в результате чего уменьшается интенсивность излучения (например, ДН), что объясняется несогласованностью антенны с возбуждающим устройством. На рис. 3 показана расчетная энергетическая характеристика антенны (конкретно для SAR) для расстояния между головой и антенной 0 мм.

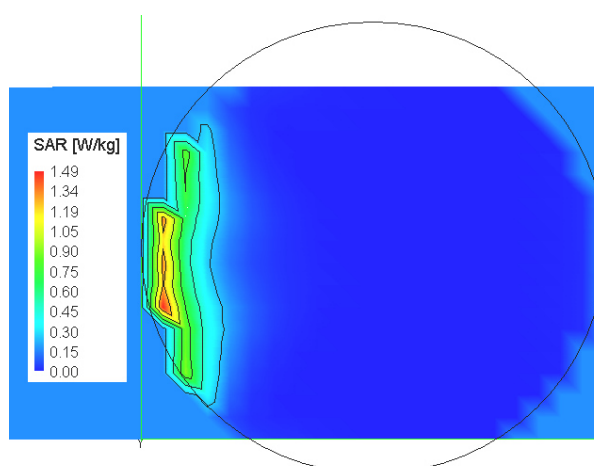


Рис. 3. Визуализация уровней SAR в модели головы человека на расстоянии 0 мм от антенны мобильного терминала

Для установления связи между величиной SAR и расстоянием между МТ и головой

пользователя предлагаем известное в [1] выражение для определения SAR представлять в виде

$$SAR(r) = \frac{\sigma \cdot E(r)^2}{\rho}, \quad (3)$$

где σ – удельная электрическая проводимость ткани тела, См/м; $E(r)$ – среднеквадратическое значение напряженности электрического поля в ткани, В/м; r – расстояние между МТ и головой пользователя; ρ – плотность ткани тела, кг/м³.

Используя выражение (3) и значения вектора напряженности электрического поля, полученных с помощью программного комплекса FEKO, в данной работе мы рассчитали значения SAR при расстояниях от 0 мм до 5 мм между МТ и головой пользователя во время телефонного разговора. Результаты расчета максимального значения величины удельной мощности поглощения в голове человека и соответствующие значения мощности потерь ЭМП антенны МТ представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что самый высокий показатель SAR на частоте 1,8 ГГц, который наблюдаем при расстоянии между МТ и головой пользователя 0 мм, составляет 1,49 Вт/кг, что соответствует установленной норме [5], которая составляет по европейским стандартам 2 Вт/кг.

Зависимость SAR от расстояния между антенной и головой человека имеет довольно ожидаемый характер, а именно: по мере отдаления антенны от головы пользователя величина SAR уменьшается.

Следует отметить, что поглощение и распределение электромагнитной энергии в организме – очень сложный феномен, который зависит от массы, формы и размера тела; ориентации тела по отношению к векторам поля и электрических свойств тела и окружающей среды. Другими переменными, которые могут играть существенную роль в возможных биологических эффектах, являются те, которые характеризуют окружающую среду (например, температура окружающего воздуха, скорость движения воздуха, относительная влажность и изоляция тела) и те, которые характеризуют индивида (например, возраст, пол, уровень активности, истощение или болезни). Поскольку многочисленные факторы могут взаимодействовать, для определения конкретных биологических результатов воздействия электромагнитных полей любая документация по организации мер защиты должна рассматривать максимальное усиление биологических эффектов в результате взаимодействия поля тела, состояние окружающей среды и физиологических параметров.

Таблица 1

Зависимость максимального значения величины SAR и мощности потерь $P_{\text{пот.чел}}$ от расстояния между антенной и головой человека на частоте, приближенной к 1,8 ГГц

Расстояние от антенны МТ до головы пользователя r , мм	SAR_{max} , Вт/кг	$P_{\text{пот.чел}}$, Вт
0	1,49	0,399
1	1,45	0,397
2	1,33	0,391
3	1,30	0,384
4	1,29	0,377
5	1,28	0,369

Полученная модель взаимодействия антенны МТ и головы его пользователя имеет следующие преимущества по сравнению с реальными макетами и применением физиологических растворов:

Параметры вычислительной модели могут быть почти свободно избранными в широком диапазоне, например, место расположения электродов, размещение тела в системе отображения, модификация расчета устройств и т. д.

Параметры воздействия могут варьировать в широких пределах, включая радиочастоты, что сложно выполнить с помощью коммерческого томографа магнитного резонанса.

Геометрические и физиологические параметры вычислительной модели часто более точные по сравнению с фантомом.

Необходимые объемы вычислений могут быть большими, но это не помеха для современных вычислительных машин.

В ходе исследований установлено, что значение SAR в общем случае зависит от следующих факторов:

- параметров падающего поля, например, частоты, интенсивности, поляризации, геометрической конфигурации «источник-объект» (ближняя или дальняя зоны);
- характеристики тела, которое облучается, например, его размера, внутренней и внешней геометрии, диэлектрических свойств различных составляющих его тканей; и эффектов экранирования или отражения от других объектов, находящихся в поле вблизи облучаемого тела.

В работе также было проведено сравнение теоретически полученных результатов с экспериментальными исследованиями, проведенными в США лабораторией RF Exposure Lab, LLC [7]. В рамках этих исследований были проведены измерения величины SAR для различных моделей МТ: Motorola Droid, iPhone, Blackberry Curve, Samsung SGH-T255G в диапазоне частот стандарта GSM 1800 МГц при расстоянии 4 мм от МТ до фантома головы человека на максимальной мощности. В ходе этих экспериментальных исследований, например, модели МТ iPhone получено значение SAR, равное 1,163 Вт/кг. Сравнение экспериментального с теоретически полученным результатом значение SAR, что составляет при том же расстоянии 1,29 Вт/кг, позволило установить различие в 9 %. То есть полученные в работе значения мощности потерь на поглощение электромагнитной энергии поля в голове пользователя можно считать адекватными и пригодными для учета на этапе проектирования антенн МТ с целью уточнения величины мощности передачи мобильного терминала и обеспечения допустимой степени влияния на биологические объекты.

Выводы

Учитывая вышесказанное можно сделать следующие выводы:

1. В работе выполнена оценка взаимодействия электромагнитного поля антенны мобильного терминала на голову человека во время разговора за счет определения SAR, характеризующий степень такого влияния, мощности потерь ЭМП антенны МТ в зависимости от расстояния между телефоном и головой пользователя от 0 мм до 5 мм.

2. В ходе имитационного моделирования в программном комплексе FEKO и исследовании характеристик ЭМП антенны МТ было установлено, что в присутствии головы пользователя возле мобильного терминала во время телефонного разговора появляются потери мощности ЭМП за счет появления мощности поглощения в биологических тканях головы пользователя телефона, в результате чего уменьшается интенсивность излучения и размер диаграммы направленности, в результате чего величина КПД антенны уменьшается в пределах 10 %. Поэтому автором впервые предложено выражение расчета фактической мощности излучения антенны МТ, учитывающее потери мощности ЭМП антенны за счет появления удельной мощности поглощения в биологических тканях головы пользователя телефона. Сравнение

полученных в работе в ходе имитационного моделирования расчетов значения SAR МТ с экспериментальными данными, выполненными лабораторией RF Exposure Lab, показало различие на 9 %.

3. Полученные результаты работы и разработанную имитационную модель воздействия ЭМП антенны МТ на голову его пользователя можно рекомендовать для использования на этапе проектирования антенн мобильных терминалов с заданными частотными характеристиками, что обеспечит одновременно уточнение расчета фактической мощности передающей антенны МТ и определения соответствия меры воздействия электромагнитного излучения на биологические объекты установленным нормам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basic standard to demonstrate the compliance of fixed equipment for radio transmission (110 MHz - 40 GHz) intended for use in wireless telecommunication networks with the basic restrictions or the reference levels related to general public exposure to radio frequency electromagnetic fields, when put into service [Электронный ресурс] / EN 50400 European Standard. – June 2006. – Режим доступа: <https://shop.austrian-standards.at/Preview.action;jsessionid=9A023FDB48EF88C57A951410CDBF1AEE?preview=&dockey=481694&selectedLocale=en>.

2. Слюсар В. И. Антенны PIFA для мобильных средств связи / В. И. Слюсар // Научно-технический журнал «Электроника: наука, технология, бизнес». – 2007. – Вып. № 1. – С. 64 – 74.

3. Гайнутдинов Т. А. Расчет SAR микрополосковых антенн сотовых телефонов / Т. А. Гайнутдинов, С. А. Савичева // Научно-аналитический журнал «Технологии информационного общества». – Спецвыпуск T-Comm. – 2009. – С. 23 – 29.

4. Думанський В. Ю. Гігієнічна оцінка електромагнітної ситуації та наукове обґрунтування вимог до її безпеки в сучасних населених місцях України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. мед. наук: 14.02.01 «Гігієна та професійна патологія» / В. Ю. Думанський. – Київ, 2009. – 41 с.

5. Обладнання систем радіозв'язку абонентське. Підтвердження відповідності базовим граничним рівням, пов'язаним з дією електромагнітних полів від 300 МГц до 3 ГГц на людину (EN 50360:2001, IDT) ДСТУ EN 50360:2007. [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – IV, 4 с. – (Національний стандарт України).

6. Altair HyperWorks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.feko.info/applications/biomedical>.

7. SAR evaluation: report [Електронний ресурс] / RF Exposure Lab LLC, USA. – 2011. – 74 p. – Режим доступу: <https://www.feko.info/download>.

Степанова Людмила Игоревна – аспірантка кафедри волоконно-оптичних ліній зв'язи.

Одесская национальная академия связи им. О. С. Попова.