



ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

О.Л. Сокол-Кутыловский

В статье рассмотрен физический механизм возникновения бегущей электромагнитной волны в ближней зоне электрической дипольной антенны. Показано, что для корректного описания излучения радиоволн необходимо учитывать действие электромагнитной силы инерции электронов, ответственной за явление самоиндукции в проводнике антенны. Приведена структура элементарной электромагнитной волны, удовлетворяющая требованию непрерывности потока энергии. Дано объяснение причины скин-эффекта в проводниках.

Физический механизм возникновения электромагнитных волн (ЭМВ) в свободном пространстве в различных литературных источниках объясняется по-разному. В одних учебниках это делается с помощью манипуляций с воображаемыми силовыми линиями электрического и магнитного полей [1], в других — при помощи математического аппарата, путем введения так называемых «опережающих и задерживающих потенциалов» [2], которые еще больше запутывают ситуацию. В физическом энциклопедическом словаре предпочтение отдано первой версии [3].

Современная наука не в состоянии внятно объяснить механизм возникновения ЭМВ даже, казалось бы, в простейшем случае — в дипольной электрической антенне, которая успешно применяется в радиотехнике уже более ста лет. Проблема заключается в том, что для этого необходимо было решить целый комплекс взаимосвязанных задач классической физики и электродинамики. Однако это не было сделано из-за появления революционных релятивистской и квантовой теорий, которые объявили себя единственными обладателями прав на постижение истины. Классическая физика была представлена как малосущественный частный случай новых теорий и, якобы за ненадобностью, была фактически остановлена в своем развитии.

Теория распространения ЭМВ основывается на уравнениях макроскопической электродинамики (уравнениях Максвелла), описывающих электрическое и магнитное поля в вакууме:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (2)$$

Считается, что распространение электромагнитных волн в свободном пространстве в дальней (волновой) зоне не встречает каких-либо пре-

пятствий, и только в проводящей среде возникают проблемы в правильном описании распространения ЭМВ.

Бегущая ЭМВ возникает в ближней зоне электрической дипольной антенны, и ее формирование всегда связано с антенной, которая выполнена из хорошо проводящего электрический ток материала. Электрическое и магнитное поля, создаваемые электрическим током в антенне, взаимодействуют с материалом, из которого она выполнена. Это взаимодействие учитывается при помощи материальных уравнений электродинамики, связывающих электрическое и магнитное поля в вакууме (\mathbf{E} и \mathbf{H}) с электрическим и магнитным полями в веществе (\mathbf{D} и \mathbf{B}):

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}; \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; $\varepsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1}$ Ф/м — электрическая постоянная (c — скорость распространения света в вакууме); ε и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости материала антенны соответственно.

Здесь сразу следует отметить, что векторы \mathbf{D} и \mathbf{H} являются вспомогательными, а реальные электрическое и магнитное поля как в вакууме, так и в веществе характеризуются векторами \mathbf{E} и \mathbf{B} [4], которые далее будем использовать в уравнениях электродинамики.

Поскольку в антенне течет электрический ток, то к материальным уравнениям (3) и (4) для полей в веществе необходимо добавить материальное уравнение для плотности электрического тока (закон Ома):

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad (5)$$

где σ — электрическая проводимость материала антенны.

Уравнение (1), с учетом закона Био — Савара — Лапласа и материальных уравнений (3), (4), в проводниках принимает следующий вид:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mu_0 \mathbf{j}. \quad (6)$$

Физический смысл материальных уравнений электродинамики состоит в следующем. Так как в уравнениях Максвелла первоначально заложено движение несжимаемой электрической субстанции, не имеющей инерции и движущейся по идеальному проводнику без трения [5], материальные уравнения введены как раз для учета дви-

жения электрических зарядов в реальном веществе, не обладающем отмеченными выше идеальными свойствами. К особым свойствам реального вещества следует также отнести эффект усиления внешнего магнитного поля в ферромагнетиках — уравнение (4).

Таким образом, уравнение (3) учитывает смещение электрических зарядов в веществе под действием электрического поля (электрическую поляризацию); уравнение (4) — степень усиления магнитного поля в веществе по отношению к магнитному полю в вакууме; уравнение (5) — силы трения, препятствующие движению электронов в проводящем электрический ток веществе.

Основные уравнения электродинамики в веществе в системе СИ имеют вид:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu\epsilon_0 \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mathbf{j} \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon \epsilon_0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

где ϵ и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества соответственно; ρ — плотность электрического заряда, а под \mathbf{j} подразумевается сумма всех плотностей токов проводимости.

Уравнение (7) представляет собой одну из форм записи закона Кулона, а уравнение (8) фиксирует факт отсутствия в природе магнитных зарядов.

Кроме уравнений (2), (6-8), в систему уравнений электродинамики включают еще одно уравнение — уравнение для силы Лоренца, действующей на электрически заряженные частицы (электроны):

$$\mathbf{F}_L = e \cdot \mathbf{E} + e \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (9)$$

где e — заряд электрона;

\mathbf{v} — скорость электрона.

При этом принято считать, что воздействие на электроны со стороны электрического и магнитного полей осуществляется только посредством силы Лоренца и никаких других электромагнитных сил нет. Однако сила Лоренца (9) не является полной электромагнитной силой, действующей на электроны. Так как электроны имеют массу, они обладают инерцией. Но инерция электронов не учитывается материальными уравнениями электродинамики (3-5), а электромагнитная сила инерции электронов не входит в уравнение Лоренца (9). Таким образом, теория электродинамики полностью игнорирует инерцию электронов в проводнике. И только в некоторых приложениях электродинамики (в частности, в электротехнике) инерция электрического тока косвенно учитывается введением так называемой эквивалентной индуктивности проводника [6].

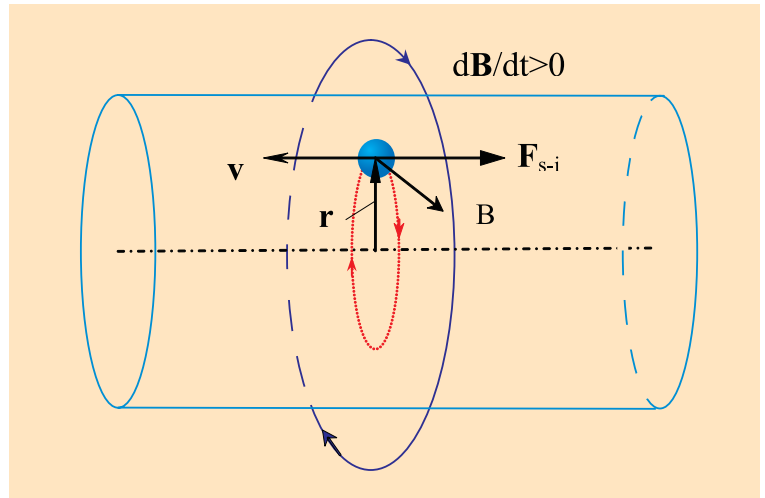


Рис. 1. Направление электромагнитной силы \mathbf{F}_{s-i} , ответственной за самоиндукцию в проводнике с электрическим током при $d\mathbf{B}/dt > 0$; \mathbf{r} — радиус-вектор, соединяющий ось симметрии источника магнитной индукции с электроном, движущимся со скоростью \mathbf{v} .

Согласно [7] попытка ввести силу инерции электрона в электромагнитном виде предпринималась еще Дж. Дж. Томсоном. Однако эта «сила самоиндукции»

$$\mathbf{F} = -\frac{4U}{3c^2} \mathbf{w},$$

где U — электрическая энергия электрона в состоянии покоя; c — скорость света и \mathbf{w} — ускорение электрона, являлась смесью электрических и механических параметров, не отражала реальные свойства электромагнитной инерции и в дальнейшем не использовалась.

Электромагнитная сила инерции электронов, ответственная за явление самоиндукции в металлическом проводнике, может быть представлена следующим образом [8, 9]:

$$\mathbf{F}_{s-i} = -e \cdot \left(\mathbf{r} \times \frac{\partial \mathbf{B}_2}{\partial t} \right), \quad (10)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор, соединяющий ось симметрии источника магнитного поля с заряженной частицей; \mathbf{B}_2 — магнитное поле тока самоиндукции. Знак «минус» показывает, что сила инерции направлена против силы, вызывающей движение электрона.

Сила (10) направлена в сторону движения электронов в проводнике при $(d\mathbf{B}/dt) > 0$ и против движения электронов — при $(d\mathbf{B}/dt) < 0$ (рис. 1).

Так как электрический ток самоиндукции направлен противоположно первичному электрическому току, магнитное поле тока самоиндукции \mathbf{B}_2 (вторичное поле) направлено противоположно магнитному полю первичного тока \mathbf{B} . В среде без потерь $\mathbf{B} = -\mathbf{B}_2$. Поэтому, заменив \mathbf{B}_2 на $-\mathbf{B}$, можно привести уравнение (10) к виду [8, 9]:

$$\mathbf{F}_{s-i} = e \cdot \left(\mathbf{r} \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \quad (11)$$

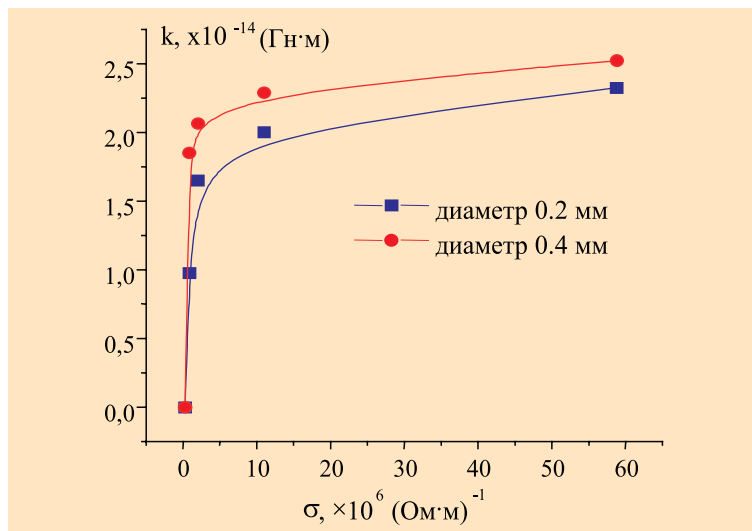


Рис. 2. Зависимости $k(\sigma)$ в проводах диаметром 0,2 мм (нижняя кривая) и 0,4 мм (верхняя кривая). Длина проводников 0,1 м

Тогда действующая на электрон полная электромагнитная сила, включающая силу инерции электрона, но не учитывающая его внутреннее движение (собственный магнитный момент), может быть представлена в виде [8, 9]:

$$F_{EM} = e \cdot E + e \cdot \left(\frac{\partial r}{\partial t} \times B \right) + e \cdot \left(r \times \frac{\partial B}{\partial t} \right) \quad (12)$$

Электромагнитная сила (12) включает в себя электрическую силу Кулона, магнитную силу Лоренца и силу электромагнитной инерции (11). Эта же сила может быть представлена в свернутом виде:

$$F_{EM} = e \cdot E + e \cdot \frac{d(r \times B)}{dt} \quad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) видно, что сила Лоренца (9) соответствует лишь частному случаю, когда магнитное поле не изменяется ни по величине, ни по направлению.

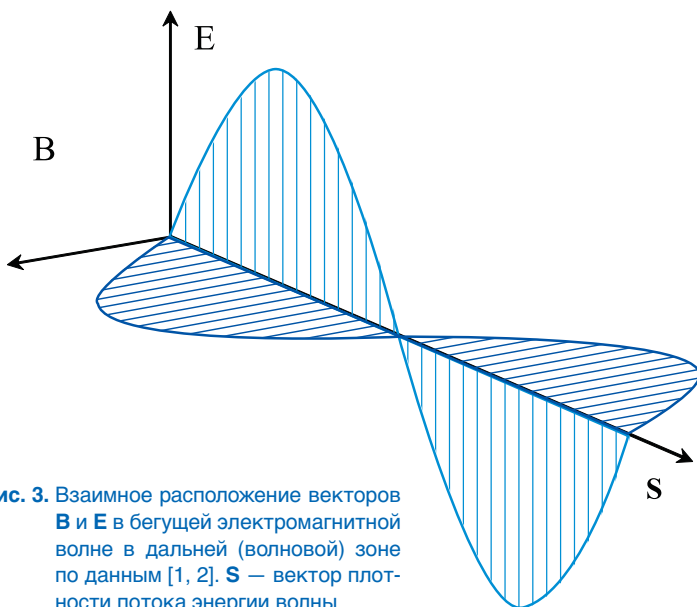


Рис. 3. Взаимное расположение векторов B и E в бегущей электромагнитной волне в дальней (волновой) зоне по данным [1, 2]. S — вектор плотности потока энергии волны

Инерция свободных электронов (и ее следствие — явление самоиндукции) имеет место только в проводниках с достаточно высокой электрической проводимостью. При этом электрический ток самоиндукции может быть выражен через первичное электрическое поле [8]:

$$j_{s-i} = k(\sigma, d)\sigma^2 E, \quad \sigma_{s-i} \geq 0,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (14)$$

где коэффициент k зависит от формы проводника, его размеров и проводимости; может быть определен из опыта (рис. 2) или рассчитан по макро- и микроскопическим свойствам конкретного проводника.

Ток самоиндукции, выраженный через уравнение (14), формально можно ввести в уравнение электродинамики (6) как один из токов проводимости. Однако этот ток имеет совершенно иные свойства, чем электрический ток, вызываемый действием электрического поля. Прежде всего, ток самоиндукции может существовать без первичного электрического тока, сам являясь причиной возникновения электродвижущей силы самоиндукции и, следовательно, вторичного электрического поля самоиндукции, возникающего благодаря разделению зарядов в проводнике при движении электронов по инерции. Это свойство электрического тока самоиндукции влечет за собой другое свойство: его магнитное поле синфазно электрическому полю, создаваемому электрическим током самоиндукции. Уравнение (14), по сути, является четвертым материальным уравнением электродинамики. Оно устанавливает величину тока самоиндукции в проводниках и предел для проводимости вещества, σ_{s-i} , ниже которого электрический ток самоиндукции в проводниках не возникает.

Прежде чем рассеяться, часть энергии нестационарного электрического тока переходит в энергию электрического тока самоиндукции. Максимум этой энергии соответствует ситуации, когда вынуждающая сила со стороны электрического поля равна противодействующей ей силе инерции свободных электронов проводника:

$$eE = -e \cdot \left(r \times \frac{\partial B}{\partial t} \right) \quad (15)$$

Эта ситуация может возникнуть, например, в проводнике с электрическим током высокой частоты, когда сила, действующая на электрон со стороны первичного электрического поля, изменяется настолько быстро, что оказывается в противофазе с силой инерции электронов. Уникальность ситуации, отражаемой формулой (15), состоит в том, что взаимосвязь электрического и магнитного полей в этом случае не зависит от электрона и его электрического заряда, в результате чего может быть получена формула для взаимного преобразования электрического и магнитного полей. Если взять «ротор» от обеих частей формулы (15), она преобразуется в уравнение (2), представляющее собой закон электромагнитной индукции Фарадея [8, 9].

Излучение ЭМВ дипольной антенной представляет собой процесс синхронного излучения множества микроскопических «элементарных» ЭМВ отдельными электронами проводника антенны. Макроскопические ЭМВ с заданной диаграммой направленности излучения формируются антенной.

Простейшая дипольная антенна излучает свободные ЭМВ, в которых макроскопические электрическое и магнитное поля изменяются обратно пропорционально расстоянию, а плотность потока энергии волны — обратно пропорционально квадрату расстояния. Диаграмма направленности — это макроскопический параметр, который определяется и формируется «геометрией» антенны, ее конструкцией и собственно к излучению электронами микроскопических ЭМВ отношения не имеет.

Для формирования бегущей ЭМВ необходимо не только, чтобы максимумы электрического и магнитного полей ЭМВ совпадали во времени, но и выполнялось бы условие непрерывности потока энергии волны. Совпадение максимумов электрического и магнитного полей имеет место и в первичном электрическом токе. Считается, что структура электромагнитной волны имеет вид, показанный на рис. 3 [1, 2]. Действительно, в такой структуре максимумы электрического и магнитного полей совпадают. Но через каждую половину периода колебаний электрическое и магнитное поля в этой волне становятся равными нулю. Тем самым нарушается принцип непрерывности потока энергии, так как никаких промежуточных преобразований энергии ЭМВ, распространяющейся в свободном пространстве, нет. Это создает почву для предположений о существовании так называемого эфира — некой упругой среды, которая якобы и передает энергию электромагнитного поля. Кроме подобных предположений, нет никаких достоверных признаков существования эфира.

Наиболее вероятный механизм возникновения бегущей ЭМВ в электрической дипольной антенне состоит в следующем. Первичное переменное электрическое поле $\mathbf{E}(t)$ вызывает в проводнике переменный электрический ток $\mathbf{j}(t)$, вокруг которого возникает переменное первичное магнитное поле $\mathbf{B}(t)$. Ускоренное движение электронов в проводнике диполя вызывает силу инерции, которая создает вторичный электрический ток самоиндукции \mathbf{j}_{s-i} , магнитное поле которого $\mathbf{B}_2(t)$ синфазно электрическому току самоиндукции. Этот же ток самоиндукции вызывает в проводнике электрическое поле самоиндукции $\mathbf{E}_2(t)$, синфазное магнитному полю самоиндукции. То есть магнитное и электрическое поля первичного тока и магнитное и электрическое поля тока самоиндукции образуют комбинацию синфазных полей. При этом синфазные взаимно-ортогональные поля $\mathbf{E}(t)$ и $\mathbf{B}(t)$ имеют фазовый сдвиг 90 град по отношению к синфазным взаимно-ортогональным полям $\mathbf{E}_2(t)$ и $\mathbf{B}_2(t)$. Так как источник всех этих макроскопических полей один (проводник

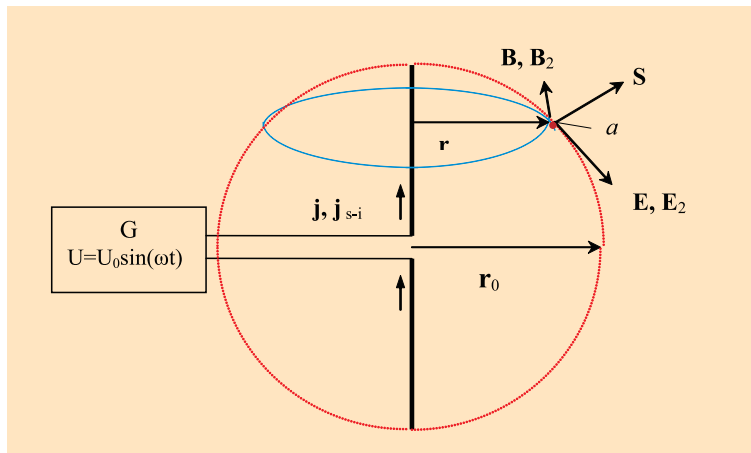


Рис. 4. Направление электрических полей \mathbf{E}, \mathbf{E}_2 и магнитных полей \mathbf{B}, \mathbf{B}_2 первичного электрического тока и тока самоиндукции \mathbf{j}_{s-i} в точке a вблизи электрической дипольной антенны. \mathbf{S} — направление распространения энергии волны; \mathbf{r} — радиус-вектор, соединяющий точку a с осью симметрии источника магнитного поля; \mathbf{r}_0 — радиус-вектор направления максимального излучения; \mathbf{G} — источник электрического напряжения, создающий вынужденные колебания электрического тока в дипольной антенне

антенны), то все они пространственно совмещены (рис. 4) и в каждой точке вблизи антенны образуют структуру (рис. 5), которая является элементарной первичной ячейкой бегущей ЭМВ.

И так как это процесс динамический, то для каждой из пар электрических и магнитных полей в силу вступают взаимные преобразования (1) и (2), которые повторяют во времени сформированную элементарную ЭМВ, «заставляя» ее двигаться в направлении \mathbf{S} .

Возникшая и распространяющаяся в направлении \mathbf{S} элементарная ЭМВ имеет постоянную плотность энергии в любом ее сечении, то есть соответствует принципу непрерывности потока энергии и, следовательно, закону сохранения энергии. Так как излучение дипольной антенны распространяется почти на все пространство, то

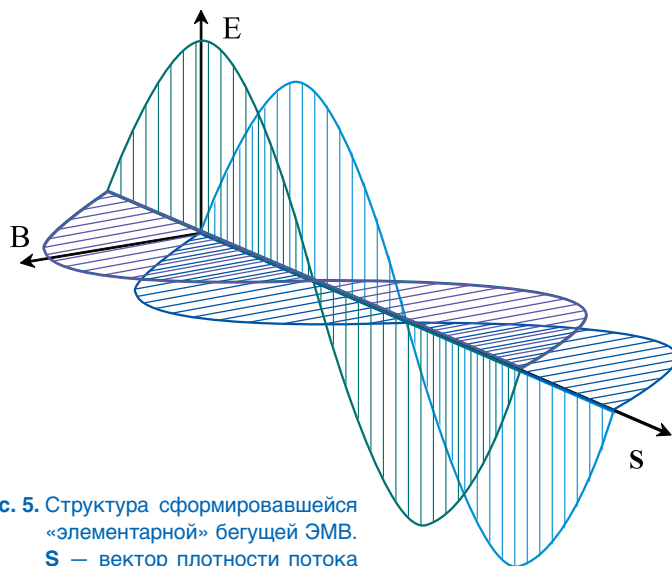


Рис. 5. Структура сформированной «элементарной» бегущей ЭМВ. \mathbf{S} — вектор плотности потока энергии волны

ее энергия с увеличением расстояния от нее убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Определение импульса, энергии и плотности потока энергии ЭМВ представляет собой отдельный вопрос, рассмотренный в [9].

Так как элементарные электромагнитные волны излучаются электронами радиально во всей плоскости, ортогональной направлению их вынужденного направленного движения (то есть направления электрического тока), в свободное пространство излучается только половина от их общего числа. Вторая половина направлена внутрь проводника. В результате этого даже в практически идеальном проводнике дипольной антенны на излучение электромагнитных волн непосредственно в свободное пространство идет только половина энергии, взятой электронами от источника тока.

Роль электрического тока самоиндукции в формировании и излучении ЭМВ может быть проверена на опыте. Для этого достаточно измерить амплитуду электрического поля в ближней (индукционной) и дальней (волновой) зонах для дипольных электрических антенн с проводниками одинаковых геометрических размеров, изготовленных из материалов с различным удельным электрическим сопротивлением. Для сравнения в подобном опыте подходят, например, медь и никром. При этом должно быть выполнено согласование передатчика с антенной так, чтобы сила тока в антеннах во всех случаях была одинаковой. При увеличении удельного электрического сопротивления материала излучателя интенсивность электромагнитной волны в дальней зоне будет уменьшаться, а при удельном электрическом сопротивлении проводника антенны $\rho \sim 2 \cdot 10^{-6}$ Ом м — исчезнет совсем. В процессе формирования и излучения ЭМВ участвуют далеко не все электроны проводника, а только находящиеся вблизи его поверхности. Известно [1 3], что переменный электрический ток высокой частоты распространяется только по тонкому поверхностному слою проводника (скин-эффект). Поэтому на высоких частотах поверхностный слой проводника (в том числе проводника электри-

ческой антенны) должен иметь максимально высокую проводимость. Но что заставляет электроны в проводнике двигаться только вблизи поверхности на высоких частотах электрического тока и почему? Современная теория не дает ясного ответа на этот вопрос, потому что не учитывается инерция свободных электронов в проводнике, которая в электромагнитном виде выражается силой (11). Согласно закону Ампера между параллельными токами одного направления существует сила отталкивания. Эта сила одинаково действует на проводники, по которым течет и постоянный, и переменный ток, но скин-эффект на постоянном токе не проявляется. Одна магнитная часть силы Лоренца, к которой сводится взаимодействие движущихся в магнитном поле электронов, не может объяснить их вытеснение к поверхности проводника с переменным электрическим током высокой частоты.

Физической причиной скин-эффекта является совместное действие силы Лоренца (9) и электромагнитной силы инерции (11) в нестационарном электрическом токе при его быстром изменении [8, 9]. При достаточно быстром изменении магнитной индукции в проводнике, например при пропускании через проводник электрического тока высокой частоты, сила $F_{\text{ин}}$ многократно превосходит кулоновскую силу $F_{\text{к}} = eE$. Следовательно, на высокой частоте под действием силы $F_{\text{ин}}$ электроны в проводнике приобретают значительно более высокую дрейфовую скорость, чем при постоянном электрическом токе, когда магнитная часть силы Лоренца меньше силы, действующей на электрон со стороны электрического поля. А так как скорость электронов на высокой частоте увеличивается во много раз, то во столько же раз возрастает и величина силы Лоренца, которая теперь уже многократно превосходит кулоновскую силу и стремится вытолкнуть движущиеся в любом направлении электроны к поверхности проводника.

Следует также отметить, что в электропроводности при нормальной температуре участвует только $\sim 10^{-4}$ от общего числа валентных электронов проводника.

Поэтому средняя дрейфовая скорость электронов в металле в $\sim 10^4$ раз выше, чем это было принято считать, и связано это с механизмом электронной проводимости [9], на котором сейчас останавливаться не будем.

Таким образом, учет всего лишь одной не принятой ранее во внимание физической величины — силы электромагнитной инерции (11), действующей на электроны проводника на высокой частоте электрического тока, позволяет приблизиться к пониманию механизма формирования, излучения и распространения ЭМВ, а также понять физическую причину возникновения скин-эффекта. Уравнение (13), содержащее основные законы электромагнетизма (закон Кулона, закон электромагнитной индукции Фарадея, силу Лоренца), позволяет дать наиболее полное количественное описание взаимодействия электрически заряженных частиц (электронов) с электромагнитным полем. И все это сделано в рамках классической электродинамики, возрождение и развитие которой позволит дать ясное и логичное объяснение известных эффектов, а также предсказывать новые электромагнитные эффекты и явления.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1969.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1966.
3. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1984.
4. Халилеев П.А. Основные понятия электродинамики сплошных сред. Свердловск: Издательство УрО АН СССР, 1989.
5. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. Т. 2. М.: Наука, 1989.
6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Л.: Энергоиздат, 1981. С. 189.
7. Френкель Я.И. Собрание избранных трудов. Т. 1. Электродинамика. М.-Л., 1956. С. 193.
8. Сокол-Кутыловский О. Л. Об электродинамике проводящих сред // Практика приборостроения. 2003. № 2. С. 85-90.