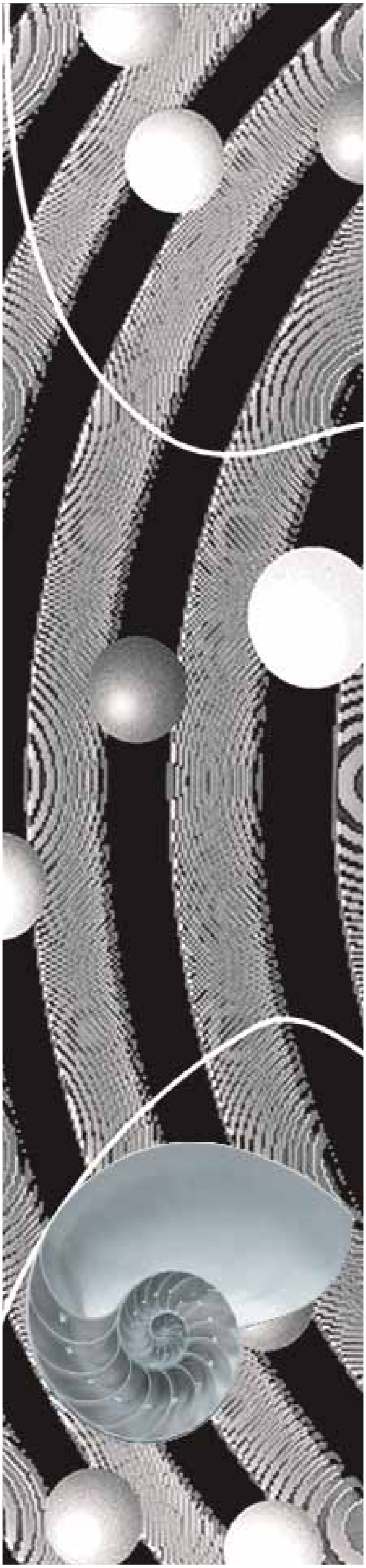


РАДИОВОЛНЫ - это что?

Харченко К.П. главный конструктор компании ООО "НПФ" Антенна XXI"

В приложении к работе [1] этот вопрос обозначен и поставлен на основании выявленных расхождений существующей теории излучения линейных антенн и результатов эксперимента. Здесь он нашел свое продолжение. По ходу развития темы было бы неправильно не упомянуть ряд исторических личностей, результатами ума которых пользуется человечество до сих пор, и показать их хронологически последовательно, чтобы вклад в дело одного нельзя было приписать другому. Статья предназначена специалистам из области радиотехники, но будет интересна и любознательным читателям. В дальнейшем будем употреблять термин "проводник", имея в виду, что он идеальный (без потерь) и линейный, l >> d, где l - длина, а d его диаметр.

Майкл Фарадей (1791-1867гг), изучая законы электромагнетизма, открыл, в частности, "силовые линии" поля H, где H - вектор напряженности магнитного поля. Он доказал, что, если по проводнику 1 протекает ток проводимости

$$i_п = \rho V_\rho \qquad (1),$$

где ρ - погонная плотность электрических зарядов, V_ρ - скорость их движения, то в плоскости P, ортогональной проводнику, возникают концентрические силовые линии поля H, рис. 1. Направление их вращения зависит от направления движения тока, а число - пропорционально силе тока. Своим видением физических процессов электромагнетизма он сподвиг Джеймса Клерка Максвелла (1831-1879гг) на обобщение и описание их в математической трактовке (1873г). Закономерную взаимозависимость между электрическими зарядами и сопутствующими им полями H и E (E - вектор напряженности электрического поля) Д. Максвелл представил системой уравнений, которая впоследствии получила его имя.

Размышляя над поведением зарядов в токопроводящей цепи с разрывами, которые могут быть эквивалентно представлены некоторой емкостью - C, Д.Максвелл, в силу логики физической непрерывности тока в этой цепи, был вынужден "сконструировать" новый (иной вид) тока. Он назвал его током смещения. Ток смещения по Максвеллу имеет вид

$$i_c \quad \partial D/\partial t \quad \left[\frac{кулон}{м^2 \cdot сек} \right] \qquad (2),$$

где выражение [ ] - размерность тока,

D = εE - вектор электрического смещения, ε - диэлектрическая проницаемость среды. Тем самым ток смещения можно трактовать как вид движения (существования) энергии электрических зарядов в нетокопроводящем пространстве - диэлектрике. Другими словами, можно трактовать, как некоторую группу зарядов [кулон], которые пересекают некоторую поверхность [$м^2$] за некоторое время [сек].

Весьма вероятно, что на возможность реального существования тока ic ученого навела именно размерность вектора

$$D\text{-}\left[\frac{кулон}{м^2} \right].$$

Чтобы превратить неподвижный, "мертвый" объект D в "живой", изменяющийся процесс i_c (в ток), Максвеллу было достаточно математически представить, что D изменяется во времени, т.е. взять производную $\partial D/\partial t$. Этой производной он в итоге достигал и необходимой для тока размерности, и нового понятия о токе, которого до Максвелла не было. Ток Максвелла "рожден" не по закону Ома. Как сказали бы сегодня: "Он из пробирки". Кто его "родители" не ясно. У этого тока только "фамилия" токовая. Откуда и куда он движется в пространстве не ясно.

Назовем ic колебательным процессом вида

$$\partial D/\partial t - \left[\frac{\text{кулон}}{\text{м}^2\text{сек}}\right],$$

в котором одна из составляющих размерности, а именно [сек$^{-1}$], была введена гением предвидения и определила "движение" этого процесса по "координате" времени.

Электрическая цепь, рис. 2, состоящая из источника знакопеременной эдс, проводников, конденсатора С и резистора $R_н$ оказывается замкнутой, если использовать токи двух видов: $i_п$ - ток проводимости (движение зарядов по пространству проводника) и ток i_c ("движение" вектора D во времени).

В цепи по рис. 2 энергия P_0 источника колебаний преобразуется в энергию электрических зарядов, которые в виде тока $i_п$ переносятся проводниками, в виде тока i_c переносятся диэлектриком конденсатора и попадают в резистор Rн , где энергия электрических зарядов преобразуется в тепловую и рассеивается в соответствии и в согласии с законом сохранения энергии (ЗСЭ), с выполнением равенства для данной цепи

$$P_0 = P\,(T^0) \qquad (3),$$

где P (T^0) - энергия Джоулева тепла.

Последующий анализ уравнений Максвелла работами Джона Генри Пойнтинга (1884г) показал, что энергия электрических зарядов может существовать самостоятельно в окружающем пространстве в виде своеобразного состояния, которое сегодня именуют свободными волнами или радиоволнами. Практическое обнаружение радиоволн история доверила Генриху Рудольфу Герцу (1857-1894гг). Молодой человек, получивший такую фундаментальную задачу, мог рассуждать так. Д.Максвелл "изобрел" ток смещения в обоснование факту прохождения переменного тока через емкость. Ток смещения, проходя метаморфозы математических уравнений, указывает на теоретическое существование радиоволн. Если радиоволны в природе действительно существуют, то искать их надо в пространстве "большого конденсатора". Г.Герц сделал "большой" конденсатор, рис. 3а, развернул его обкладки, рис. 3в, выполнил их в виде сфер с зазором Δ для ввода эдс и получил прообраз диполя Герца, рис. 3с. Фактически он сделал первое в истории человечества антенное устройство - симметричный вибратор с двумя плечами длиной l каждое. С его помощью Г.Герц обнаружил радиоволны (1887г) и разработал теорию излучения своего диполя.

Схематично работу диполя Герца можно представить сравнительно просто. К зазору Δ, рис. 3с, приложена периодическая ЭДС так, что в первую 1/4 Т периода колебаний напряжение нарастает от нуля до максимума. На протяжении этого времени объемы V сфер-плечей диполя заполняются зарядами (-) и (+), а в вакууме вокруг них образуется магнитное поле Н. Во вторую 1/4 Т периода колебаний напряжение спадает от максимума до нуля. На протяжении этого времени объемы V освобождаются от зарядов (-) и (+) путем трансформации их энергии в энергию электрического поля Е, которое "замыкает" заряды разных знаков. "Опустошенные" объемы V оказываются готовыми принять очередную порцию зарядов, но уже с переполюсовкой их знаков, и процессы повторяются. Магнитное Н и электрическое Е поля энергетически взаимодействуют с образованием радиоволн, плотность потока которых характеризуется вектором Пойнтинга П и равна векторному произведению

$$П = [E \cdot H] \qquad (4).$$

Энергия радиоволн со скоростью света ***С*** удаляется, освобождая пространство для следующей порции. Если принять, что мощность источника колебаний равна P_0 и что на проводниках и в пространстве вокруг потерь энергии нет, то справедливо соотношение

$$P_0 = П \cdot S = P_\Sigma \qquad (5),$$

где S - поверхность, которую пронизывает весь поток излучения, P_Σ - мощность излучения. Если же радиоволны попадают в среду с потерями, то энергия радиоволн превращается в энергию электрических зарядов, которая в итоге переходит в тепловую. Этим равенство (3) выполняется всегда (в крематории Джоулева тепла).

Из предыдущего следует, что радиоволны являются лишь промежуточным продуктом в цепочке превращений энергии источника колебаний в энергию Джоулева тепла. Отвлечемся и отметим, что Природа неподкупно соблюдает свои фундаментальные законы, рационально избегая состояния, влекущие за собой их нарушение.

Каким же образом из казалось бы тупиковой ситуации совместного существования зарядов разных знаков на проводнике отыскивает Природа нужный выход, оставляя незыблемым закон сохранения энергии? Для понимания последующего, разберемся в существующей теории излучения. Изложенная здесь (очень кратко) суть вопроса взята из работы [2], гл.VI,которую нетрудно найти, чтобы разобрать вопрос в деталях. Она (суть) не является оригинальной, т.к. своими корнями уходит к работам Г.Герца.

Элементарным электрическим вибратором считают бесконечно малый элемент линейного электрического тока. Ток в пределах такого элемента предполагается одинаковым по амплитуде и фазе

$$i \;\; -\partial\rho/\partial t \qquad (6).$$

Удачным практическим приближением к такому идеализированному излучателю считают диполь Герца. Элементарный вибратор можно также представить себе, как элемент длинного провода, обтекаемого током.

В работе [7], с.97, утверждается, что поле излучения в пространстве определяют, полагая заданным распределение тока на проводнике произвольной длины l, основываясь на (6).

Г.Герц, определяя поле излучения E_r от своего диполя, выделил в пространстве три зоны: ближнюю $r < \lambda$, промежуточную $r \geq \lambda$ и дальнюю $r >> \lambda$.

В произвольной точке М дальней зоны поле E_r он выразил соотношением

$$E_r = -j \frac{60\,\kappa\, l_r\, i}{r} \sin\theta \; e^{-j\kappa r} \qquad (7),$$

где $j = \sqrt{-1}$,некоторый фазовый

множитель; $к = 2\pi/\lambda$ - волновое число свободного пространства, рис.4.

Выражение (7) - это и есть поле Е - радиоволны от очень малого $l_г << \lambda$ отрезка проводника с током i на нем.

Привлечём внимание к одному из уравнений Максвелла, которое "подозревается" автором некорректным, а именно,

$$\text{rot}\, H = i_п + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t},$$

В него ток смещения (переменное во времени поле Е) введён бездоказательно. И тем не менее, на основании этого уравнения определяют поле Е по известному полю Н, что спорно, так как не гарантирует результату истинность. С намёком на последнее в работе [2], стр. 144, даётся оговорка: "В данном случае нас интересует частное решение этой задачи, а именно, определение поля Е на большом расстоянии от вибратора", (то есть в дальней зоне). И уже совсем откровенно там же: "Однако строгое решение задачи определения структуры поля вокруг провода встречает математические трудности. К настоящему времени эта задача ещё не решена до конца".

Создается уверенность, что современная наука "не знает" откуда и как возникает ток смещения

$$\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

без которого не может быть радиоволны. В то же время радиоволна есть, если проводник возбуждён ЭДС. Похоже, что наука "подгоняет" решение этой задачи под ответ, который ей известен, не зная самого решения.

Во времена Г.Герца практика не знала антенн, длина $l \geq \lambda$ проводников которых была бы соизмерима или больше, чем длина волны λ.

Когда такие антенны появились, то их поле излучения E_l в точке М дальней зоны стали определять сравнительно просто и вполне естественно. Расчленяют проводник длиной l на n равных отрезков Δl так, чтобы отрезок Δl походил на диполь Герца и чтобы для каждого из n отрезков можно было применить выражение (7), рис. 5. Суммарное поле E_l находят как векторную сумму полей в точке М от всех n элементов Δl. Распределение тока i по проводнику длиной l определяют в согласии с выражением (6). Этот метод расчета называют "классическим" иногда "токовым".

Следующий пример показывает полную непригодность изложенной методики для рассчета поля излучения E_l, от проводника длиной l, с током по выражению (6), а следовательно, и мощности излучения P_Σ, и сопротивления излучения R_Σ, и к.п.д. антенны в виде этого проводника.

Обратимся к рис. 6. На нем по оси z расположен проводник длиной l с условным концом в точке $Z_к$, в начало которого (Z = 0) включен источник ЭДС. Обозначим заряд, приходящийся на единицу длины проводника, изменяющийся во времени, через $p_z = p_m \cdot e^{j\omega t}$, где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, f - частота колебаний источника ЭДС. При этом распределение тока согласно(6) будет иметь вид, показанный на рис. 7. Рис. 6 и рис. 7 демонстрируют хорошо узнаваемую бегущую волну заряда и тока, которая характерна тем, что ее производная по координате z равна нулю, $\partial\rho/\partial z = 0$; $\partial i/\partial z = 0$. Из теории длинных линий известны понятия о падающей и отраженной волнах.

Бегущая волна адекватна волне падающей. Если источник эдс имеет мощность колебаний P_0, то мощность падающей волны Рпад и мощность бегущей волны $P_б$ связаны соотношением

$$P_0 = P_{пад} = P_б \qquad (8).$$

В соответствие "классическому" методу расчета поля излучения от проводника длиной l с распределением тока проводимости $i_п$ по рис. 7 будет иметь место равенство

$$P_0 = P_\Sigma \qquad (9),$$

где P_Σ - мощность излучения этого проводника. Согласно, опять таки, теории длинных линий падающая волна становится волной бегущей только в том случае, если мощность отраженной волны $P_{отр} = 0$ отсутствует. Такое возможно, если имеется резистивная нагрузка, которая полностью поглощает падающую волну, превращая ее энергию в тепловую, $P(T^0)$. Итожа сказанное, имеем: по рассчету, (9), $P_0 = P_\Sigma$ - мощность источника колебаний перешла в энергию радиоволн; а по физике процесса $P_0 = P\,(T^0)$ - мощность источника колебаний рассеялась в нагрузке в виде Джоулева тепла. Если к сказанному присовокупить еще и работы [3], [4], [5], в которых с помощью тех же уравнений Максвелла теоретически доказано, что бегущая волна на проводнике не создает радиоволн, то становится *вдруг* очевидно, что в уравнениях Максвелла "не все спокойно", так как рассчеты по ним (для данного примера) приводят к противоречивым результатам. Короче, существующая теория не умеет вычислять поле излучения от проводника для тех законов распределения тока на нем, для которых мощность отраженной волны меньше, чем мощность падающей,

$$P_{отр} < P_{пад} \qquad (10).$$

Первые "антенные" работы А.Зоммерфельда относятся к 1909г и тем не менее никто до сих пор не обеспокоился несуразицей между результатами рассчетов и здравым смыслом реальности, в частности, и в первую очередь, названные авторы. Это позволило ошибочной теории "жить" без малого столетие! Отсутствие радиоволн от проводника с бегущей волной можно объяснить проще, чем это сделано в [3], [4], [5]. Заряды, возбуждаемые ЭДС источника колебаний, продвигаются равномерно к концу проводника, не встречая препятствий. Достигая согласованной резистивной нагрузки, все они отдают ей свою энергию, которая переходит в тепловую. Экономная Природа "не видит" здесь необходимости в создании радиоволн для выполнения закона сохранения энергии.

Изменим условия предыдущего примера тем, что в точке $Z_к$ провод оборвем, рис. 8. При этом падающая волна зарядов, дойдя до конца проводника отражается и продолжает движение по проводнику в обратном направлении. Ее называют волной отраженной. Мощность $P_{пад}$ падающей волны равна мощности $P_{отр}$ отраженной

$$P_{пад} = P_{отр} \qquad (11).$$

Обе волны, естественно, когерентны. Суммируясь векторно, они образуют новую волну, которую именуют стоячей. Стоячая волна характерна тем, что ее уровни по координате z изменяются в пределах $0 \leq \rho \leq 2\rho_m$, а фаза изменяется скачком на 180^0 при переходе с одного отрезка проводника на смежный с ним, минуя значение $\rho = 0$. Если рассмотреть отрезок (Z_1Z_2) проводника и определить разность зарядов между точками Z_1 и Z_2, то окажется, что она не равна нулю, т.е. производная $\partial\rho/\partial z \neq 0$ существует. Это означает, что заряды по проводнику начинают двигаться не равномерно, а с ускорением (замедлением), в результате чего образуется некая их "толчея" на равнофазных участках проводника с нарушением закона Ома

$$\Delta u = i\, \Delta R \neq 0 \qquad (12),$$

где Δu - разность потенциалов между точками Z_1 и Z_2, $\Delta R = 0$ - сопротивление отрезка (Z_1Z_2), напомним, идеального проводника, $i \neq 0$ - ток, протекающий по отрезку (Z_1Z_2). Учитывая, что Природа не нарушает свои законы, следует признать неточным существующий взгляд на суть и характер процесса, называемого стоячей волной.

Во первых, такая электрическая "цепь" оказывается незамкнутой по отношению к эдс, порождающей падающую волну.

Во вторых, энергии ее зарядов нет выхода за пределы проводника конечных размеров и не нагруженного на резистор.

Так что же на самом деле происходит на проводнике, около него и в простирающемся пространстве, когда к проводнику приложена эдс источника колебаний?

Рассмотрим подробнее отрезок (Z_1Z_2), рис. 9, проводника диаметром d со стоячей волной. В точке Z_1 есть погонный заряд ρ_1 и распределенная емкость C_1, поэтому потенциал в точке Z_1 можно выразить как

$$u_1 = \rho_1 / C_1 \quad (13).$$

Аналогично для точки Z_2 будем иметь

$$u_2 = \rho_2 / C_2 \quad (14).$$

Разность потенциалов на отрезке (Z_1Z_2) составит

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 1/C \cdot (\rho_2 - \rho_1) \quad (15).$$

Здесь допустимо, что $C_1 \approx C_2$, т.к. отрезок (Z_1Z_2) предполагается малым по сравнению с длиной λ волны. Ёмкостное сопротивление X_C отрезка (Z_1Z_2) выразим как

$$X_C = X_0 (Z_2 - Z_1) = \frac{T(Z_2 - Z_1)}{2\pi C_0} \quad (16),$$

Где X_0 - погонное ёмкостное сопротивление проводника, T- период колебаний источника ЭДС.

По закону Ома ток, протекающий через сопротивление Xc , будет равен

$$i_0 = \frac{\Delta u}{X_c} = \frac{2\pi C_0}{C} \; \frac{\rho_2 - \rho_1}{T} \; \frac{1}{Z_2 - Z_1} \quad (17).$$

Устремляя к нулю длину отрезка (Z_1Z_2) проводника, в пределе получим

$$i_0 = \frac{2\pi C_0}{C} \; \frac{1}{T} \; \frac{\partial\rho}{\partial z} \quad (18),$$

где $\frac{2\pi C_0}{C}$ - некоторый безразмерный коэффициент, зависящий по Кессениху, [6], от d /λ.

Размерность величин, входящих в (18), следующая:

1/T - сек $^{-1}$; $\partial\rho$ - кулон/м ; 1/∂z - м$^{-1}$, что для тока i_0 дает в целом - $\left| \frac{\text{кулон}}{\text{м}^2 \text{ сек}} \right|$

Эквивалентную физическую суть тока i_0 можно трактовать как скорость изменения величины погонного заряда по координате пространства проводника за период T процесса колебаний. Сопоставляя выражение (2) и (18), обнаруживаем, что размерности тока смещения i_c Максвелла и тока i_0 одинаковы. Это обстоятельство позволяет утверждать, что у токов i_c и i_0 одна и та же субстанция - поле E. Назовём ток i_0 дополнительным током смещения - $i_{cд}$ (дополнительным к тому току i_c, который является исторически первым током смещения).

Выражение (18) утверждает, что ток $i_{cд}$ не может существовать при отсутствии колебаний; его ориентация определена координатой проводника; он уменьшается с уменьшением частоты колебаний (ток $i_{cд}$ определён и в пространстве, и во времени, и в "причинах" своего появления). Очевидно, что своим содержанием он богаче тока i_c, о котором известно лишь, что это изменяющийся во времени вектор электрического смещения.

Ток $i_{cд}$ - рожден "законно" по Ому, рожден зарядами тока проводимости при обязательном наличии отраженной волны. Обратим внимание на размерность времени в его формуле. В отличие от i_c Максвелла, где размерность времени введена искусственно по законам математики, в токе $i_{cд}$ размерность времени является наследуемой от "пути", на котором этот ток только и может существовать - на пути через распределенную емкость проводника.

Этот ток буквально "сочится" из и около каждого элемента dZ проводника со стоячей волной. Двигаясь навстречу току проводимости $i_п$ падающей волны, он замыкает "цепь" по отношению к ЭДС источника колебаний. Автор полагает, что ток проводимости $i_п$ и ток $i_{cд}$ имеют одинаковые фазовые скорости распространения колебаний. Однако длины путей по "цепи" у них не одинаковые. Падающая волна имеет прямолинейный путь - проводник. Встречный ей (дополнительный) ток смещения $i_{cд}$ имеет "волнообразный" путь - около проводника, который длиннее первого. Результаты этого обстоятельства проявляются в резонансных длинах $l_р$ проводника, при которых на клеммах источника колебаний оказываются узел или пучность стоячей волны. Получается, что $l_{р1} < \lambda/4$; $l_{р2} < \lambda/2$; $l_{р3} < 3/4\lambda$ и т.д. и тем меньше, чем больше d диаметр проводника при λ=const. Факт известный из практики антенн, но не имеющий убедительного толкования. Теперь логика его обоснования проста и понятна.

Ток $i_{cд}$ снимает недоумение и по поводу нарушения закона Ома на проводнике в режиме стоячей волны. Имеющуюся разность потенциалов (15) здесь следует отнести к емкостному сопротивлению (16).

Проведенный анализ позволяет по новому взглянуть на возбужденный ЭДС проводник, как на объект, который окружает себя силовыми линиями не только поля H, которые в натуре видел М.Фарадей, но и силовыми линиями поля E, которые по своему "видел" Д.Максвелл. То есть позволяет взглянуть на проводник, а увидеть устройство, которое создает радиоволны, (увидеть антенну).

Ее принцип действия заключен в том, что источник колебаний своими зарядами последовательно (один за другим) создает два тока различных по своей физической сути. Их образно можно назвать током - H и током - E. Током проводимости $i_п$ источник "накачивает" пространство, окружающее проводник, силовыми линиями поля H, а дополнительным током смещения $i_{cд}$ - "накачивает" это пространство силовыми линиями поля E.

Силовые линии поля H "прошивают" пространство поперечными "нитями", если их сопоставлять с положением оси проводника. Силовые линии поля E "прошивают" пространство продольными "нитями". Совместно они образуют "ткань" радиоволны. Поля E и H, преодолевая ближнюю и промежуточные зоны, (выделенные Г.Герцем), достигают дальней зоны и заполняют ее пространство тканью радиоволны, образуя замкнутые конфигурации, называемые "пространственной диаграммой направленности", которые зависят от l / λ длины проводника. Они раздуваются в простирающемся пространстве со скоростью

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}},$$

сохраняя принятую форму.

Например, для диполя Герца такая конфигурация имеет вид тороида, стянутого в точку в его центре, рис. 10а.

Для волнового проводника (l =λ) - имеет вид гантели, рис.10в. Нет причин сомневаться, что в дальней зоне ток $i_{cд}$ трансформируется в колебательный процесс вида $\partial D/\partial t$ и становится похожим на ток смещения $i_с$ Максвелла.

Акцентируем и это важно, ток $i_{сд}$ (ток-Е) обусловлен наличием и мощностью отраженной волны. Для линий без потерь справедливо равенство

$$P_0 = P_{пад} = P_{отр} + P_н \qquad (19),$$

где $P_н$ - мощность, поглощаемая нагрузкой.

Отсюда следует, что

$$P_{отр} = P_0 - P_н \qquad (20).$$

Закон сохранения энергии требует, чтобы выполнялось соотношение

$$P_0 = P_н + P_\Sigma \qquad (21),$$

для антенн в среде без потерь. Выражения (19), (20), и (21) приводят к результату

$$P_\Sigma = P_{отр} \qquad (22).$$

Если нет мощности $P_{отр}$ отраженной волны, то нет и P_Σ мощности излучения, нет радиоволны. В этом результате заложен ответ на вопрос, поставленный выше: "из тупиковой ситуации совместного существования на проводнике зарядов разных знаков Природа нашла выход в трансформации их энергии в энергию радиоволны, создав на проводнике особый вид волны - стоячую волну - как сумму двух токов: тока - Н и тока - Е, с торжеством закона сохранения энергии.

Уточним разницу в трактовках рассматриваемых физических процессов. Существующая (см., например, [2]), опираясь на уравнение Максвелла, определяет поле Е, как "продукт" поля Н.

Изложенная в статье, определяет и поле Н, и поле Е, как "продукт" зарядов на проводнике.

В этих трактовках большая и принципиальная разница, так как во второй возникновение поля Е рассматривается как независимое от наличия поля Н, в то время как в первой поле Е есть прямое следствие наличия поля Н.

В результате второй трактовки ток смещения $i_{сд}$ всегда не равновелик току проводимости $i_п$ из-за потерь в нагрузочном сопротивлении (когда оно есть), а в результате первой - эти токи всегда равновелики.

Изложенное подводит к выводу, что историческая ошибка, влекущая за собой нарушение закона сохранения энергии в расчетах параметров и характеристик линейных антенн, заключена в том, что в выражение (7) поставлен ток (определяемый выражением (6)), который не учитывает наличие и влияние нагрузочного сопротивления. В выражении (7) должен стоять неизвестный до сих пор ток, определяемый соотношением (18). Кто и когда первым допустил упомянутую ошибку - сказать трудно. Ясно, что это не Д.Максвелл и не Г.Герц. Г.Герц исследовал не нагруженный проводник, для которого мощность потерь в нагрузке была равна нулю (Pн = 0), а $P_\Sigma = P_0$. Для этого частного случая он получил правильный количественный результат, подставив в свое уравнение (7) "неправильный" ток (6).

Что же касается Д.Максвелла, то он, можно полагать, понятия о радиоволнах не имел.

Уравнение Максвелла

$$\mathrm{rot}\, H = i_п + i_с \qquad (23)$$

следует пополнить током $i_{сд}$ и числить как

$$\mathrm{rot}\, H = i_п + i_с + i_{сд} \qquad (24),$$

чтобы впредь не нарушать закон сохранения энергии в расчетах нагруженных антенн, а также точнее представлять процессы, происходящие на возбужденном эдс проводнике, около него и в простирающемся пространстве. (Не исключено, что в будущем ток $i_с$ уйдёт вообще из уравнения Максвелла за ненадобностью).

Автор приглашает читателей, несогласных с ним, организовать дискуссию по этим вопросам, в которых, как он думает, заинтересованы антеннщики всего мира.

Литература:

1. Харченко К.П. КВ антенны - рупоры без видимых стенок. - М., 2003.
2. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. - М., 1957.
3. Зоммерфельд А. Электродинамика. - М., 1958.
4. Губо Г. Журнал прикладной физики. 1950, 21, с.1119-1128.
5. Лавров Г.А. Князев А.С. Приземные и подземные антенны. - М.,1965.
6. Кессених В.Н. Доклады Академии наук СССР т.27, №6, с.558, 1940.
7. Пистолькорс А.А. Антенны. - М., 1947.

Рис.1

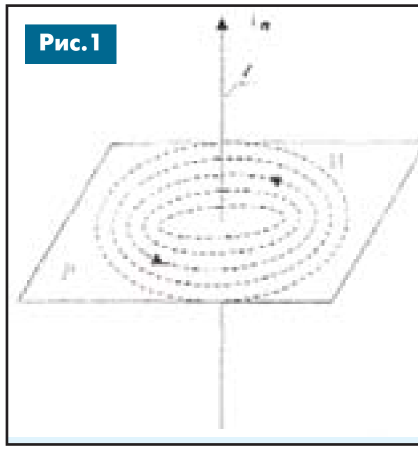


Рис.2

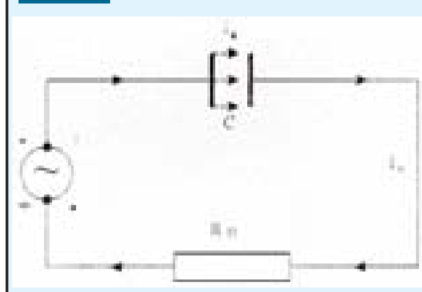


Рис.4

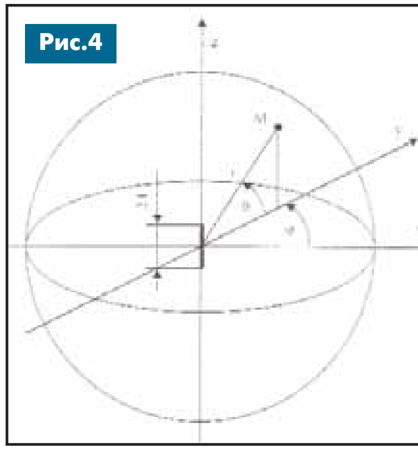
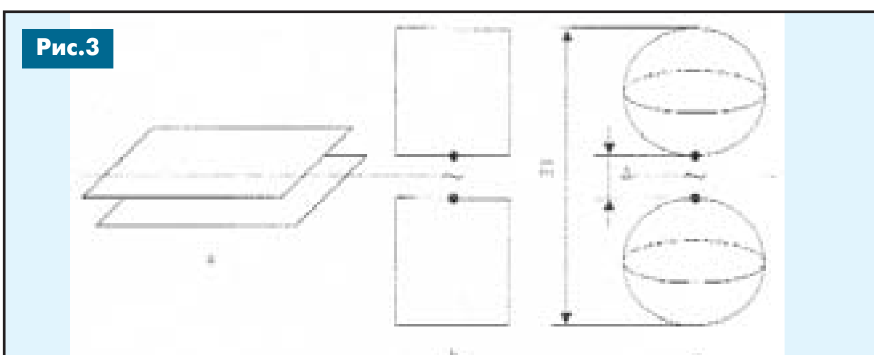


Рис.3



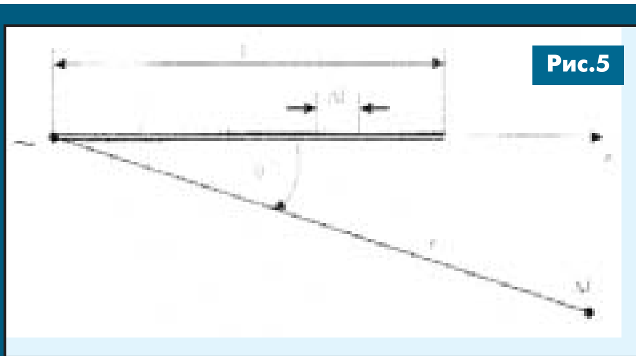


Рис.5

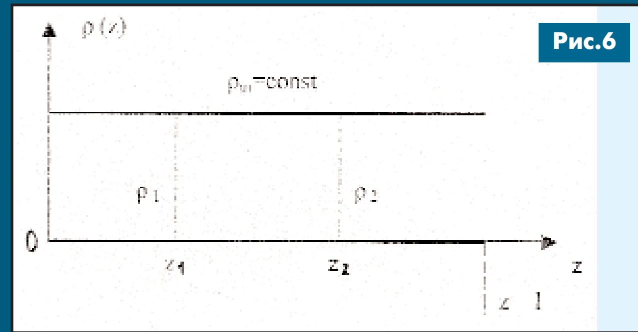


Рис.6

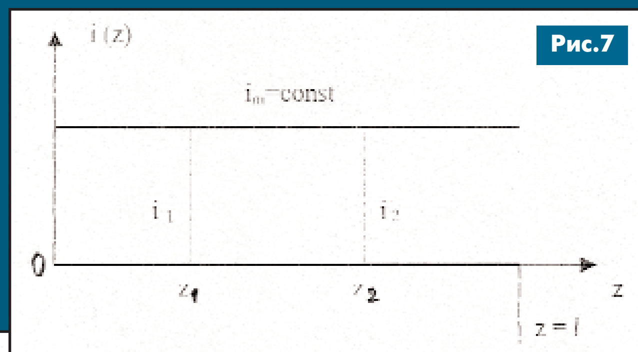


Рис.7

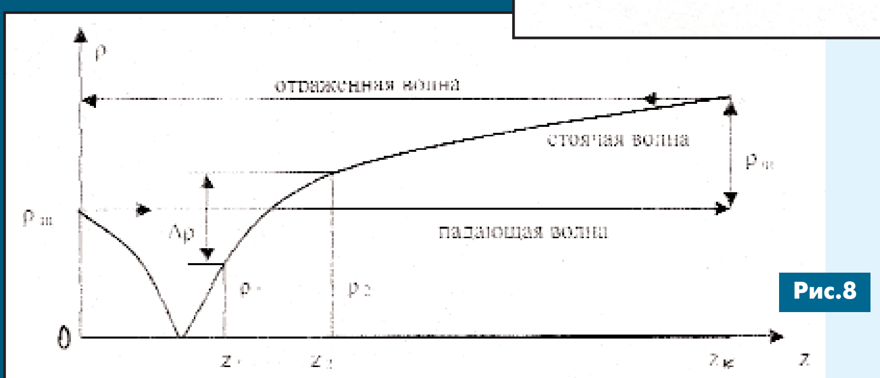


Рис.8

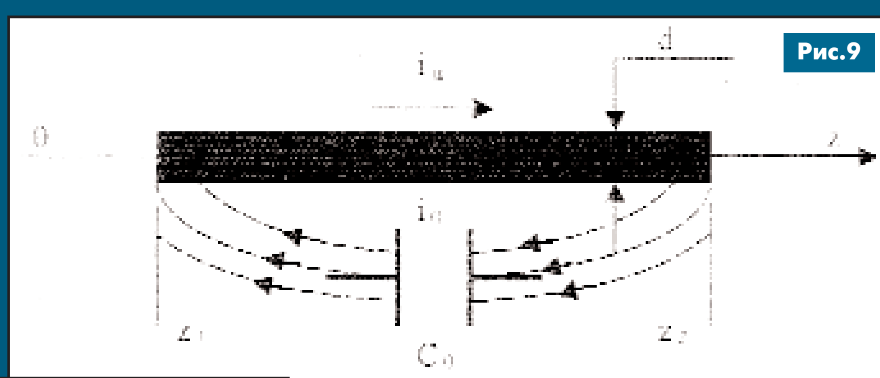


Рис.9

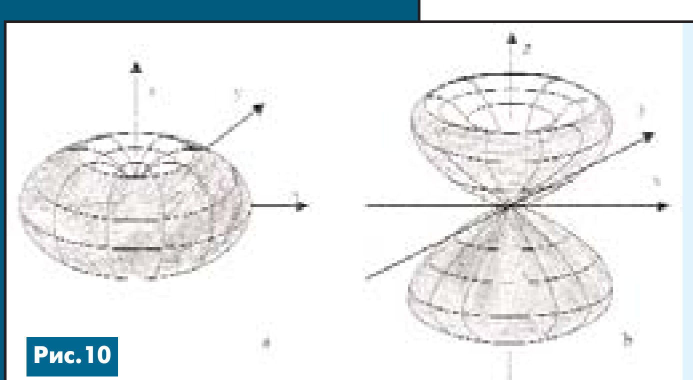


Рис.10