Сферические волны передающей Линейной Магнитной Антенны (Часть I)

Радиоинженер, Кандидат физ.- мат. наук,
Ph.D. **Арий Борисович Ляско**

1. Введение

В данной работе рассматривается особенности работы ***линейных магнитных излучателей электромагнитной энергии типа Магнитных Диполей Герца (МГД) на частотах менее 100 КГц и создаваемое ими электромагнитное поле.***

В дальнейшем такие излучатели названы [1] **передающими «Линейными Магнитными Антеннами»**, или сокращённо, **ЛМА**.

Конструктивно ЛМА представляет собой удлинённое тело магнитопровода, например, в виде цилиндра *(Патент РФ № 2428774 от 10 Сентября 2010 г.: "Передающие Линейные Магнитные Антенны (ЛМА)")* [1] , или, например, в виде набора цилиндров ***(US Patent 4458248 Jul. 3, 1984: "Parametric Antenna")***[2], вокруг которого в центральной его части находится соленоид, по обмотке которого протекает, создающий в ***теле магнитопровода магнитный поток несущей частоты*** **f** ***[Гц], переменный (периода T [сек]) электрический ток I [Ампер].***

Обычно магнитопровод выполнен из ферритового материала, с использованием удлинённых ферритовых стержней, или удлинённые ферритовые стержни выполнены набором закреплённых впритык друг к другу серийно выпускаемых промышленностью ферритовых чашечек, например, типа **P**, или **PM** [Каталог фирмы **EPCOS**].

Для создания однородного магнитного потока в магнитопроводе **ЛМА** длина **lc** [*м*] соленоида ЛМА должна быть на порядок больше его диаметра **dc** [*м*], а для увеличенного эффективного значения относительной величины магнитной проницаемости длина магнитопровода **lm** [*м*] должна быть в 20 – 30 раз выше размера его диаметра **dm** [*м*]. При этом для получения максимально возможного эффективного значения относительной величины μ_{eff} магнитной проницаемости длина соленоида **lc** не должна превышать 1/3 – 1/2 длины **lm** магнитопровода **ЛМА**.

При выборе соотношения **dc**/**dm** необходимо принять во внимание, что μ_{eff} обратно пропорционально значению этого соотношения. Требуемая от ЛМА мощность и используемая частота f электромагнитного излучения определяет величину необходимого значения диаметра магнитопровода **dm**.

1.1 Уравнения Максвелла [3], записываются в следующем виде:

$$rot\,\vec{E} = -\vec{j}_m - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (1.1\text{-}01) \qquad rot\,\vec{H} = \vec{j}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad (1.1\text{-}02)$$

$$div\,\vec{D} = \rho_e \qquad (1.1\text{-}03) \qquad div\,\vec{B} = \rho_m \qquad (1.1\text{-}04)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + div\,\vec{j}_e = 0 \qquad (1.1\text{-}05) \qquad \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + div\,\vec{j}_m = 0 \qquad (1.1\text{-}06)$$

$$\vec{j}_m = \sigma_m \vec{H} \qquad (1.1\text{-}07) \qquad \vec{j}_e = \sigma_e \vec{E} \qquad (1.1\text{-}08)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \qquad (1.1\text{-}09) \qquad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \qquad (1.1\text{-}10)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ (1.1-11) $\mu = \mu_0 \mu_r$ (1.1-12)

$\vec{E}$ - вектор напряженности электрической составляющей электромагнитного поля с единицей измерения, [*Вольт / м*].

$\vec{H}$ - вектор напряженности магнитной составляющей электромагнитного поля с единицей измерения, [*Ампер / м*].

$\vec{D}$ - вектор индукции электрической составляющей электромагнитного поля с единицей измерения, [*Кулон / м*^{2}].

$\vec{B}$ - вектор индукции магнитной составляющей электромагнитного поля с единицей измерения, [*Тесла*], или [*Вольт сек / м*^{2}], или [*Вебер / м*^{2}].

$\vec{j}_e$ - вектор плотности электрического тока, [*Ампер / м*^{2}].

$\vec{j}_m$ - вектор плотности «магнитного тока», [*Вольт / м*^{2}].

ε_0 - коэффициент диэлектрической проницаемости в вакууме, [*Ампер сек / Вольт м*],

или [*Фарад / м*], где численно:

$$\varepsilon_0 = 1/36\pi 10^9 \qquad (1.1 – 13)$$

ε_r - относительная величина диэлектрической проницаемости среды,

μ_0 - коэффициент магнитной проницаемости в вакууме, [*Вольт сек / Ампер м*],

или [*Генри / м*], где численно:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \qquad (1.1\text{-}\ 14)$$

μ_r - относительная величина магнитной проницаемости среды,

σ_e - коэффициент проводимости электрического тока единичного объёма среды, [*1 | Ом м*],

σ_m - коэффициент проводимости « магнитного тока» единичного объёма среды, [*Ом / м*].

1.2. В настоящее время всё больше вызывает в технических и бизнес кругах интерес освоения дна океанов, особенно, покрытых толстым слоем льда. ***Для осуществления цифровой электромагнитной связи между подвижными объектами***, особенно с подводными, или подлёдными объектами, например, с целью дистанционного управления ими, - ***передающие ЛМА в диапазоне (ELF, VF, VLF, LF) частот менее 60 КГц (длина волны в воздушном***

пространстве более 5 км) пригодны для таких целей. Известно, что проводились в морских недрах испытания электромагнитной связи на частоте ***3 КГц*** на глубине до 45 м *с использованием модели «подобных LMA» Антенн* [5].

1.3. Электромагнитные волны ниже 13 КГц при дистанциях

$$Dr = (1/2)\lambda_0/2\pi \qquad (1.3 – 1)$$

от ЛМА до поверхности моря проникают на достаточно большую глубину Hm:

$$Hm << (1/2)\lambda_m/2\pi \qquad (1.3 – 2)$$

где

$$\lambda = c_0/f \qquad (1.3 – 3)$$

f - частота несущей, излучаемая ЛМА в Гц.

$$c_0 = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \qquad (1.3 – 4)$$

$$\lambda_m = \lambda_o / \sqrt{\varepsilon_{meff}\,\mu_{meff}} \qquad (1.3 – 5)$$

ε_{meff} - эффективное значение относительной величины диэлектрической проницаемости морской воды,

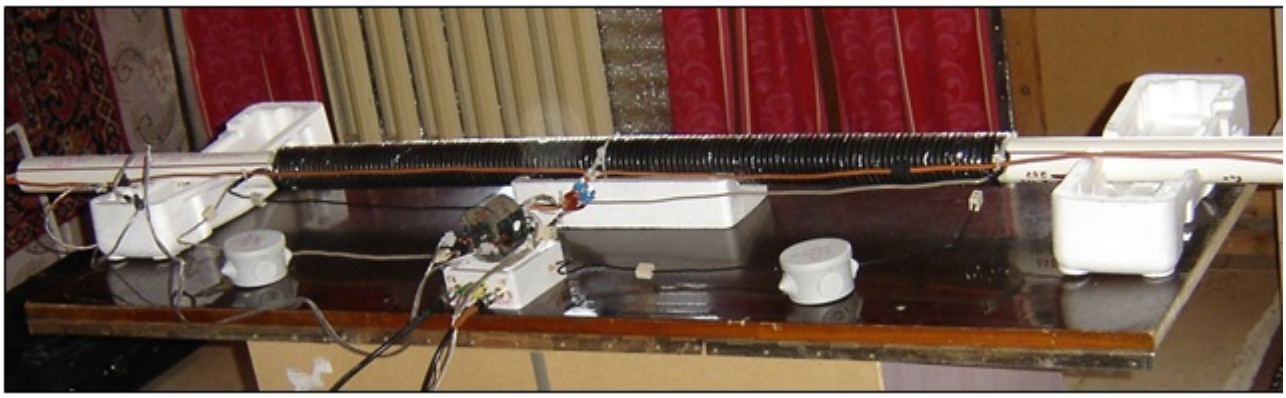
μ_{meff} - эффективное значение относительной величины магнитной проницаемости морской воды,

Следует иметь в виду, что обычные «электрические» антенны для работы на частотах менее 60 КГц (например, наземные станции навигационной системы «Омега» для частот 10 – 15 КГц) – это огромные сложные инженерные сооружения, занимающие площадь не менее 1 км в округе. Такие антенны в «ближней зоне» при дистанциях $Dr \leq (1/2)\lambda_0/2\pi$ обладают мощной (радиальной и «азимутальной») электрической составляющей электромагнитного поля. Если было бы возможно размещение такой антенны на близком расстоянии над уровнем моря, то её излучение будут поглощено тонким слоем морской воды. Тем более не возможно обычную антенну разместить в морской глубине в связи с невозможностью существования « тока смещения» в проводящей морской воде, являющейся источником электромагнитного излучения.

В морской среде возможна электромагнитная связь за счёт присутствия у ЛМА радиальной и «азимутальной» магнитной составляющей электромагнитного поля, как это будет показано ниже.

2. Величина напряжённости магнитного поля в теле ЛМА.

На фотографии (Изо. 2.1) представлен вид модели ЛМА и составных частей её антенного контура: резонансных конденсаторов, согласующего трансформатора и устройства, позволяющего считывать значение амплитуды контурного тока и амплитуды входного напряжения.



Изо.2.1. Вид Модели ЛМА №5.

Основные её геометрические размеры:

Длина магнитопровода ***lm = 198 см***, Магнитопровод представляет собой цилиндрическое ферритовое тело с центральным осевым отверстием. Внешний диаметр магнитопровода *dm = 3 см*. В центральной части магнитопровода расположен внешний соленоид, однослойная обмотка которого выполнена плоским двужильным электрическим кабелем с числом витков *N1,2 = 126*, каждая жила которого является медным проводом, обладающим собственной изоляционной оболочкой. Средний диаметр обмотки соленоида *dc = 5.56 см*, а его длина *lc = 108 см.*

Данная модель рассчитана на работу на одной из частот ***в диапазоне 25 – 52 КГц*** для передачи *символов ASCII* со скоростью *2 Кбит/сек* при использовании **QPSK** (цифровой четырёх фазовой модуляции частоты несущей) в полосе менее *2 КГц*.

Воспользуемся рисунком **Изо. 2.2** для отыскания амплитудного значения напряжённости магнитного поля H_m в теле ЛМА. Амплитуда напряжённости магнитного поля в произвольной точке, лежащей на оси соленоида, вычисляется по формуле:

$$H_m = \frac{I_m N}{2lc}(\cos\psi_2 - \cos\psi_1) \qquad (2-1)$$

, где

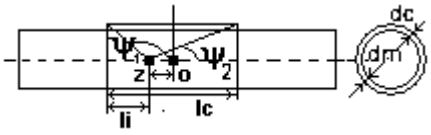
I_m – Амплитуда тока [Ампер], протекаемая по обмотке соленоида ЛМА,

$$\cos\psi_2 = \frac{lc - l_i}{\sqrt{(d_c/2)^2 + (l_c - l_i)^2}} \qquad (2-2)$$

$$\cos\psi_1 = -\frac{l_i}{\sqrt{(d_c/2)^2 + l_i^2}} \qquad (2-3)$$

$$l_i = (l_c/2) + z \qquad (2-4)$$

z - расстояние выбранной на центральной оси точки отсчёта H_m от центральной её точки «о», z > 0 при расположении точки отсчёта справа от точки «о», z < 0 при её расположении слева от точки «о».



Изо.2.2. Для расчёта амплитуды напряжённости магнитного поля $\mathbf{H_m}$.

Для геометрических параметров ЛМА описанных выше, значение напряжённости магнитного

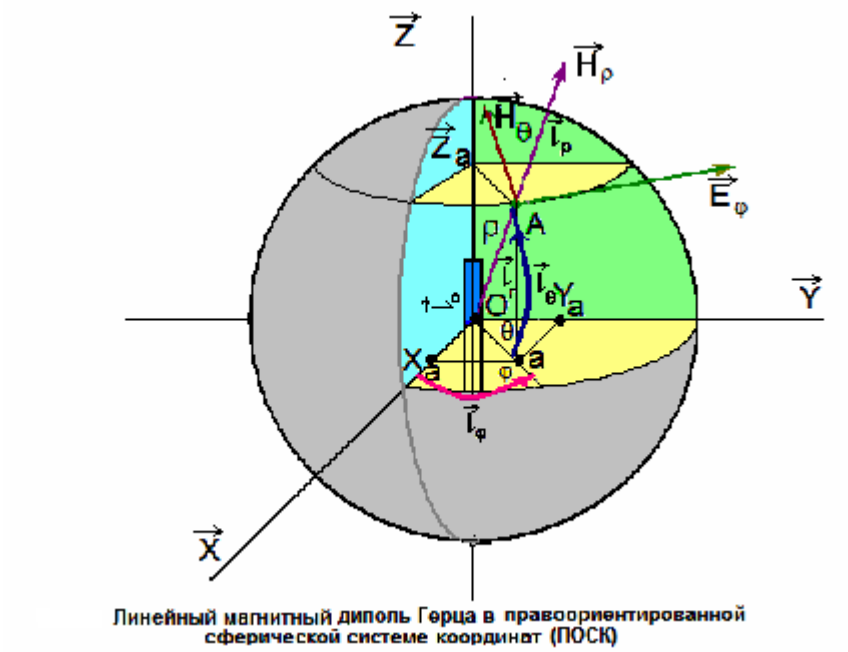
поля продольной оси практически не меняется. В дальнейшем для расчёта амплитудного значения $\mathbf{H_m}$ будет использовано выражение:

$$H_m = \xi \frac{I_m N}{l_c} \qquad (2-5)$$

ξ - поправочный коэффициент, который может принимать значение в пределах 0,5 – 1,5 в зависимости от геометрических параметров антенного контура ЛМА и уточняется в результате теста конкретной модели ЛМА.

3. Основные составляющие электромагнитного поля ЛМА в открытом пространстве.

В связи с тем, что ***длина магнитопровода ЛМА всегда много меньше длины волны*** в диапазоне частот её применения, и ***при соотношении геометрических параметров, оговоренных в самом определении ЛМА, как Линейного Магнитного Диполя (ЛМД)***, можно представить картину ориентации электрической (E_φ) и магнитных (H_ρ и H_θ) составляющих электромагнитного поля в открытом пространстве, как это представлено на **Изо. 3.1**



Изо. 3.1. Изображение Передающей ЛМА (типа МГД) в право ориентированной системе ортогональных векторов.

Обращаясь к выше приведённому изображению, автор составляющую $\vec{E}_\varphi$ условно называет «тангенсальной», или «меридианной», составляющую $\vec{H}_\theta$ - «азимутальной», а составляющую $\vec{H}_\rho$ - «радиальной». Как видим, МГД обладает одной тангенсальной электрической компонентой напряжённости и двумя магнитными компонентами напряжённости электромагнитного поля.

3.1. Для расстояний $\rho < \frac{1}{20}\frac{\lambda_o}{2\pi}$ амплитудное значение магнитных (H_ρ и H_θ) составляющих электромагнитного поля в открытом пространстве, следуя авторам R.Ploncey and R.E.Collin книги «Principles and applications of electromagnetic fields» (page 241-242) [6], и адаптируя их формулы к данному конкретному случаю, можем записать:

$$_{m}H_{\rho} = \mu_{eff}\frac{M_{m}}{2\pi\rho^{3}}\sin\theta \qquad (3.1-1)$$

$$_{m}H_{\theta} = \mu_{eff}\frac{M_{m}}{4\pi\rho^{3}}\cos\theta \qquad (3.1-2)$$

, где

μ_{eff} - эффективное значение относительной величины магнитной проницаемости магнитопровода ЛМА (величина которого меньше, чем величина относительной проницаемости μ материла магнитопровода, измеряемой на образцах с замкнутым магнитопроводом),

M_m - амплитудное значение «Магнитного момента » магнитопровода ЛМА, [*Ампер м*^{2}]:

$$M_m = \pi d_c^2 N I_m l_m / 4 l_c \qquad (3.1-3)$$

Эти составляющие появились бы (в соответствии с законом Фарадея) даже в случае, когда по обмотке внешнего соленоида ЛМА протекал бы постоянный во времени ток, равный I_m, и в магнитопроводе и вокруг него в пространстве существовало бы постоянное магнитное поле.

3.2. О напряжённости электрического поля $\vec{E}$ сферической волны электромагнитного излучения ЛМА в «свободном пространстве» (вакууме)

Предполагается, что в пространстве вне тела ЛМА отсутствуют электрические и «магнитны» заряды (ρ_e = 0; ρ_m = 0), отсутствуют электрические и «магнитные» токи ($\vec{j}_e$ = 0; $\vec{j}_m$ = 0), из уравнений Максвелла раздела 1.1 следует:

$$div\vec{D} = 0;\ div\vec{B} = 0;\ div\vec{j}_e = 0;\ div\vec{j}_m = 0;\ \sigma_e = o;\ \sigma_m = 0 \qquad (3.2-1)$$

Релевантные для этого случая оставшиеся уравнения Максвелла:

$$rot\,\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3.2-1)\text{, где} \quad \vec{B} = \mu_0\vec{H} \quad (3.2-2)$$

$$rot\,\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (3.2-3)\text{, где} \quad \vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} \quad (3.2-4)$$

Ферромагнитное тело ЛМА на **Изо. 3.1** представлено в прямоугольной **[X,Y,Z]** и сферической [*φ, θ, ρ*] системах координат в виде малого сплошного ферромагнитного цилиндра, геометрический центр которого размещён в начале отсчёта этой координатной системы, а его центральная продольная ось совпадает с осью Z.

Предполагаем [2], что переменный электрический ток, протекаемый по обмотке соленоида, создаёт по всей длине равномерно распределённое переменное магнитное поле. Поэтому можем считать, что по данному цилиндру протекает «магнитный» ток

$$J_m = \vec{F}\cdot\vec{j}_m \qquad (3.2-5)$$

F – абсолютное значение поперечного сечения тела ЛМА,

$$F = \pi\frac{dm^2}{4} \qquad (3.2-6)$$

Векторы $\vec{F}$, $\vec{j}_m$ - направлены по оси Z и совпадают с её направлением.

В данном случае считаем, что имеют место соотношения:

$$\rho_e = 0;\ \vec{j}_e = 0;\ div\vec{D} = 0;\ div\vec{B} = 0;\ div\vec{j}_e = 0;\ \sigma_e = o \qquad (3.2-7)$$

Релевантная система уравнений Максвелла:

$$rot\,\vec{E} = -\vec{j}_m - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (3.2\text{-}8) \qquad rot\,\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad (3.2\text{ -}9)$$

$$\vec{j}_m = \sigma_m \vec{H} \qquad (3.2-10) \qquad \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + div\,\vec{j}_m = 0 \qquad (3.2-11),\ \text{где}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \qquad (3.2\text{ -}12) \qquad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \qquad (3.2\text{ - }13)$$

Полагаем, что

$$\vec{j}_m = 0 \qquad (3.2-14),\ \text{тогда} \qquad rot\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (3.2-15)$$

Так как

$$rot(rot\vec{A}) = grad(div\vec{A}) + \nabla^2 \vec{A} \qquad (3.2-16)$$

а $div\vec{D} = 0$ и, следовательно, $div\vec{E} = 0$, поэтому

$$grad(div\vec{E}) \equiv 0 \qquad (3.2-17)$$

применяя, оператор *rot* к правой и левой частям векторного уравнения (3.2 – 15), получим векторное уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 \vec{E}(x,y,z,t) = -\frac{\partial}{\partial t} rot\vec{B}(x,y,z,t) \qquad (3.2-18)$$

Уравнение (3.2 – 18) с учётом (3.2 – 14) и (3.2 – 5) имеет следующий физический смысл:

Протекаемый по обмотке соленоида ЛМА переменный во времени электрический ток создаёт в её магнитопроводе переменный во времени магнитный поток, характеризуемый величиной индукции магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_{eff} \vec{H}(x,y,z,t) \qquad (3.2-19)$$

Исходящий из одного конца тела ЛМА магнитный поток в виде силовых магнитных линий, симметрично относительно продольной оси тела ЛМА (ось Z) пронизывают «свободное пространство», возвращаясь в другой конец тела ЛМА. В правой части уравнения (3.2 – 18) циркуляция вектора индукции магнитного потока и отражает этот процесс замкнутости магнитных линий через «свободное пространство».

Изменение во времени циркулирующего вектора индукции, следовательно, и напряжённости магнитного поля является источником возбуждения в «открытом пространстве электромагнитных волн. Это следует из существования правой части в уравнении (3.2 – 19) для вектора напряжённости электрического поля уравнения Лапласа. Так что ЛМА ни только создаёт в открытом пространстве магнитное поле (в англоязычной литературе, называемое «Фарадэевским»), но и является источником электромагнитных волн в пространстве её

окружающем.

3.3. Основные составляющие электромагнитного поля ЛМА в свободном пространстве

На рисунке **Изо. 3.1** передающий магнитный диполь [2] представлен в виде цилиндра длины l_m, и поперечного сечения F_m, выполненного из ферромагнитного материала с $\mu_r >> 1$, однородного по всему его объёму, по которому протекает магнитный ток J_m :

$$Jm = \vec{j}_m F_m \vec{l}_0 \text{, где} \qquad (3.3-1)$$

$\vec{l}_0$ - единичный вектор (орт) продольной оси магнитного диполя.

На Изо. 3.1 отмечена точка $A(x_a, y_a, z_a)$ на расстоянии ρ от геометрического центра диполя, совпадающего с центром координатной системы 0. В этой произвольной точке А отыскиваем основные электрические и магнитные компоненты электромагнитного поля.

В предположении отсутствия в «окружающем пространстве» электрических зарядов и токов проводимости, другими словами, при условии (3.2 – 7) имеет место основополагающее выражение для элемента с протекаемым по нему током:

$$\vec{E} = -\frac{J_m l_m}{4\pi}[\vec{l}_0 \cdot grad\psi] \qquad (3.3-2)$$

В сферической правосторонней системе координат $[\vec{e}_\varphi, \vec{e}_\vartheta, \vec{e}_\rho]$ (3.3 – 3), где

$$[\vec{e}_\varphi \cdot \vec{e}_\theta] = \vec{e}_\rho, [\vec{e}_\theta \cdot \vec{e}_\rho] = \vec{e}_\varphi \qquad (3.3-4)$$

$$grad\psi = (\frac{i\alpha}{\rho} + \frac{1}{\rho^2})\vec{e}_\rho e^{-i\alpha\rho} \qquad (3.3-5)$$

$$\vec{E} = \frac{J_m l_m}{4\pi\rho^2}(1+i\alpha\rho)[\vec{e}_\rho \cdot \vec{l}_0]e^{-i\alpha\rho} \qquad (3.3-6), \text{ где } \alpha = 2\pi/\lambda_0 \qquad (3.3-7)$$

$$\vec{l}_0 = \vec{e}_\theta \cos\theta + \vec{e}_\rho \sin\theta \quad (3.3-8) \qquad [\vec{e}_\rho \cdot \vec{l}_0] = [\vec{e}_\rho \cdot \vec{e}_\theta]\cos\theta \qquad (3.3-9)$$

$$\vec{E}(\rho,\theta) = -\frac{J_m l_m}{4\pi\rho^2} e^{-i\alpha\rho}(1+i\alpha\rho)\vec{e}_\varphi \cos\theta, \vec{E}_\varphi = \vec{E}(\rho,\theta) \quad \vec{E}_\rho = 0, \vec{E}_\theta = 0 \qquad (3.3-10)$$

Иными словами, вектор напряжённости электрического поля магнитного диполя $\vec{E}_\varphi(\rho,\theta)$ с плотностью «магнитного тока» $\vec{j}_m$ лежит на окружности радиуса $R = \rho\cos\theta$ в плоскости перпендикулярной его оси и совпадает с касательной в данной точке.

Следуя Айзенбергу Г.З автору монографии «Антенны ультракоротких волн» (стр.126 - 135) **[3]** можем записать выражения амплитудных составляющих электромагнитного поля в сферической системе координат для ЛМА:

$$E_{\varphi m} = -\frac{J_m l_m}{4\pi}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2\left[\left(\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}\right)^2 + i\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}\right]e^{-i\alpha\rho}\cos\theta \qquad (3.3-11)$$

$$H_{\rho m} = \frac{2J_m l_m}{8\pi^2\mu_0 f}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^3\left[-i\left(\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}\right)^3 + \left(\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}\right)^2\right]e^{-i\alpha\rho}\sin\theta \qquad (3.3-12)$$

$$H_{\theta m} = -\frac{J_m l_m}{8\pi^2\mu_0 f}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^3\left[-i\left(\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}\right)^3 + \left(\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}\right)^2 + i\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}\right]e^{-i\alpha\rho}\cos\theta \qquad (3.3-13),$$

где $\alpha = 2\pi/\lambda_0$ $\qquad \mu_0 f = W_0/\lambda_0 \qquad \lambda_0 = \frac{c_0}{f} \qquad W_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \qquad (3.3-14)$

W_0 - волновое сопротивление «открытого пространства», [Ом],

после преобразований выражение (3.3 – 11) принимает вид схожий с полученным выше выражением (3.3 – 10) для $\vec{E}_\varphi(\rho,\theta)$

$$E_{\varphi m} = -\frac{J_m l_m}{4\pi\rho^2}(1+i\alpha\rho)e^{-i\alpha\rho}\cos\theta \qquad (3.3-15)$$

$$H_{\rho m} = \frac{J_m l_m \lambda_0}{4\pi^2 W_0\rho^3}(-i+\alpha\rho)e^{-i\alpha\rho}\sin\theta \qquad (3.3-16)$$

$$H_{\theta m} = -\frac{J_m l_m \lambda_0}{8\pi^2 W_0\rho^3}(-i+i\alpha\rho+(\alpha\rho)^2)e^{-i\alpha\rho}\cos\theta \qquad (3.3-17),$$ где

$$e^{-i\alpha\rho} = \cos\alpha\rho - i\sin\alpha\rho$$

В "Ближней зоне", когда $\rho << \lambda_0/2\pi$ для электрической составляющей электромагнитного поля можно упростить выше приведённое выражение и записать в следующем виде:

$$E_{\varphi m} = -i\frac{J_m l_m}{2\pi\rho^2}\cos\theta \quad \text{где } \lim\ \rho\to 0, e^{-i\alpha\rho} = 1 \qquad (3.3-18)$$

Для магнитных составляющих электромагнитного поля можно записать:

$$H_{\rho m} = -i\frac{J_m l_m \lambda_0}{4\pi^2 W_0\rho^3}\sin\theta \qquad (3.3-19)$$

$$H_{\theta m} = i\frac{J_m l_m \lambda_0}{8\pi^2 W_0\rho^3}\cos\theta \qquad (3.3-20)$$

3.4. Для "Дальней зоны", когда $\rho > \lambda_0/2\pi$ уравнения (3.3 – 15,16,17) существенно упрощаются, остаются лишь две ортогональные компоненты распространяющейся «плоской» электромагнитной волны в «открытом пространстве», амплитудные значения которых можно представить в виде:

$$E_{\varphi m} = -i\frac{1}{2}\frac{J_m l_m}{\lambda_0\rho}\cos\theta \qquad \text{где } \lim\ e^{-i\alpha\rho}(\rho\to\infty) = 1 \qquad (3.4-1),$$

$$H_{\theta m} = -i\frac{J_m l_m}{2\lambda_0 W_0\rho}\cos\theta \qquad (3.4-2)$$

Отношение

$$\frac{E_{\varphi m}}{H_{\theta m}} = W_0 \qquad W_0 = (\frac{\mu_0}{\varepsilon_0})^{0.5} \qquad (3.4-3)$$

W_0 - волновое сопротивление «открытого пространства», [Ом],

приблизительно W_0 = 377 Ом (3.4 – 4).

Средние (для гармонических функций) значение нормальной составляющей вектора ***S "Умова-Пойнтинга"*** в данном случае равно:

$$S_{\rho eff}(\rho,\theta) = \frac{1}{2}E_{\varphi m}(\rho,\theta)H_{\theta m}(\rho,\theta) = \frac{H_{\theta m}(\rho,\theta)^2 W_0}{2} \qquad (3.4-5)$$

так как имеет место соотношение:

$$S_{\rho eff}(\rho,\theta) = \frac{1}{8W_0}(\frac{J_m l_m}{\lambda_0})^2 \frac{1}{\rho^2}\cos^2\theta \qquad (3.4-6)$$

С физической точки зрения вектор (S) Умова - Пойнтинга является плотностью секундного расхода энергии электромагнитного потока в **[Ватт/сек]**

3.5 Мощность электромагнитного излучения в «открытое пространство» определяется с помощью соотношения:

$$P_{rad} = \rho^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} S_{reff}(\rho,\theta)\cos\theta d\theta \qquad (3.5-1)$$

Подставляя из (3.4 – 27) среднее значение нормальной составляющей вектора Умова-Пойнтинга получим следующее соотношение в соответствии с классической теорией Элементарного Магнитного Диполя:

$$P_{rad} = \frac{\pi}{3W_0}(\frac{J_m l_m}{\lambda_0})^2 \qquad (3.5-2)$$

3.6 Вывод выражения отыскания амплитудного значения «магнитного тока» J_m

Следуя Айзенбергу Г.З. автору монографии «Антенны ультракоротких волн» (стр.17,133,134) [3] можем записать амплитудное значение «магнитного тока» J_m ,

$$\oint_L E_{0m}dL = \int_{F_c} j_m dF_c \quad (3.6-1), \quad L = \pi d_c \quad (3.6-2), \quad F_m = \pi\frac{d_m^{\ 2}}{4} \quad F_c = \pi\frac{d_c^{\ 2}}{4} \quad (3.6-3)$$

С учётом (3.3 – 1), получим: $E_{0m}\pi d_c = J_m$ (3.6 - 4)

Если воспользоваться (3.3 - 11) $E_{\varphi m} = -\frac{J_m l_m}{4\pi}(\frac{2\pi}{\lambda_0})^2[(\frac{\lambda_0}{2\pi\rho})^2 + i\frac{\lambda_0}{2\pi\rho}]e^{-i\alpha\rho}\cos\theta$,

исходя из рисунка **Изо. 3.1**, можно видеть, что при граничных условиях

ϑ = 0, ρ = d_c получим:

$E_{\varphi m} = E_{0m}$ (3.6 - 5) и

$$E_{\varphi m} = -\frac{J_m l_m}{4\pi}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2\left[\left(\frac{\lambda_0}{2\pi d_c}\right)^2 + i\frac{\lambda_0}{2\pi d_c}\right]e^{-i\omega d_c} \quad (3.6 - 6) \text{ при этом } e^{-i\omega d_c} = 1, d_c << \lambda_0$$

при этом можем записать, что $E_{0m} = \frac{U_{am}}{\pi d_c N}$ (3.6 - 7), где U_{am} - амплитудное значение напряжения на обмотке соленоида ЛМА в **[В]**, обусловленное протеканием по ней переменного тока $I_a(t) = I_{am}Sin\omega t$ (3.6 - 8), где $\omega = 2\pi f$ (3.6 - 9), **f** - несущая частота в [**Гц**], $\mathbf{I_{am}}$ - амплитудное значение тока в [**А**].

Так как $U_{am} = X_{La}I_{am}$ (3.6 - 9) и $X_{La} = i\omega L_a$ (3.6 - 10), где $\mathbf{L_a}$ - индуктивность обмотки соленоида ЛМА в [**Гн**]. При этом $L_a = \mu_{eff}L_0$ (3.6 - 11), где μ_{eff} - эффективное значение ферритового материала магнитопровода ЛМА, L_0 - индуктивность соленоида ЛМА в отсутствии магнитопровода.

Таким образом $E_{0m} = i\frac{\omega L_a I_{am}}{\pi d_c N}$ (3.6 - 12), где N - число витков обмотки соленоида ЛМА.

С учётом (3.6 - 5, 6, 12) для каждого конкретного случая может быть определено значение $\mathbf{J_m}$.

В качестве упражнения рассмотрим **Пример №1**, где данная модель ЛМА №21 имеет параметры: ***d_m =0.36 м, d_c = 0.042 м, N = 42, l_c = 0.28 м, l_m = 0.56 м, μ_{eff} = 53, L_0 = 10.2 мкГн.*** При этом полагаем, что амплитудное значение тока $\mathbf{I_m}$ **= 0.62 А** (именно такое значение использовано было геофизиками компании "Радионда". В процессе испытания обычно автор проводил испытания при значениях $\mathbf{I_m}$ **от** *1 до 7 А*), протекаемого по обмотке соленоида, создающего продольное переменное магнитное поле с амплитудным значением напряжённости магнитного тока $|\mathbf{H_m}|$ = *93 А/м*. Рассчитанное с использованием формулы: $H_m = \xi\frac{I_m N}{l_c}$ (2 - 5) при а ξ= 1. Учитывая, что W_0 = *377 Ом*, а λ_0 = *10152.3 м* для *f = 29550 КГц.* Вид модели ЛМА№21 представлен на переднем плане **Изо. 3.2**, за ней вид конденсатора , используемого в качестве ёмкости в схеме последовательного колебательного резонансного контура питания током $\mathbf{I_{am}}$ обмотки соленоида ЛМА от низко вольтного Усилителя мощности.

Изо. 3.2

Автор воспользовался программой "MathCAD MathSoft, Inc." для отыскания выражения :

Поэтому амплитудное значение напряжения на обмотке U_{am} = i62.34 В, Амплитудное значение напряжённости поля вокруг тела ЛМА№21 E_{0m} = i472.51 В/м (3.6 - 13).

$$E_{\varphi m} / J_m = -\frac{l_m}{4\pi}(\frac{2\pi}{\lambda_0})^2[(\frac{\lambda_0}{2\pi d_c})^2 + i\frac{\lambda_0}{2\pi d_c}]e^{-i\alpha d_c} \quad (3.6 - 14)$$

Вычисления выражения:

дало значение (25.263 - i 5.525) м $^{-1}$ (3.6 - 15). Поэтому J_m = 18.704 В. (3.6 - 15)

Итак, абсолютное значение амплитудного значения | $\boldsymbol{J_m}$ | = ***18.7 В.***

Зная значение $\mathbf{J_m}$ можно рассчитать по формулам (3.3 - 15, 16, 17) все три компоненты напряжённостей поля E_φ , H_ρ , H_ϑ , изображённые на рисунке **Изо. 1.** в точке свободного пространства на удалении от ЛМА, например, на 14 м при $\vartheta = 0$:

Результат, полученный с помощью программы "MathCAD MathSoft, Inc." :

$E_\varphi(\rho = 14$ м, $\vartheta = 0) = (3.091\ 10^{-5} + i\ 4.252\ 10^{-3})$ В/м (3.6 - 16) $|E_\varphi(\rho = 14$ м, $\vartheta = 0)| = 4.253$ мВ/м

$H_\rho(\rho = 14$ м, $\vartheta = 0) = 0$

$H_\vartheta(\rho = 14$ м, $\vartheta = 0) = (8.18\ 10^{-3} - i\ 5.944\ 10^{-5})$ А/м (3.6 - 17) $|H_\vartheta(\rho = 14$ м, $\vartheta = 0)| = 8.18$ мА/м

На фотографии **Изо. 3.3** в лаборатории автора представлены две приёмные антенны (для измерения уровня сигнала на расстоянии 14 м от модели ЛМА №21): Приёмная Рамочная Антенна ЛА №1, квадратной формы со стороной 0.5 м и Приёмная Ферритовая Антенной МА№2 в герметичном корпусе длиной 0.56 м и диаметром 0.05 м (в герметичном корпусе модель ЛМА№21 имеет тот же размер и вид).

Для расчёта $\mathbf{H_{эфф}}$ в **[м]**"Действующей Высоты" Приёмных Рамочных Антенн существует формула $H_{эфф} = \frac{2\pi A_{эфф} N}{\lambda}$ (3.6 - 18), где $A_{эфф}$ - площадь рамки. Поэтому для частоты ***f = 29550 Гц*** при ***N=100*** и $\mathbf{A_{эфф}}$ = 0.25 кв.м для ЛА№1 вычисления дали следующий результат $H_{эфф}$ = 0.0155 м. (3.6 - 19)

Если ЛМА№21 разместить горизонтально так, что её центральная ось направлена плоскости Рамочной антенны на уровне её центр, то ЛА№1 зарегистрирует сигнал этой частоты ***f***

Изо. 3.3.

равный (расчётное значение): $U_{ЛА№1} = H_{эфф}\ W_0\ |H_\vartheta(\rho = 14$ м, $\vartheta = 0)| = 47.7$ мВ. (3.6 - 20), если их центры "тяжести" виртуально лежат на одной прямой с добавкой ***$U_{ЛА№1} = H_{эфф}\ |E_\varphi(\rho = 14$ м, $\vartheta) = 65.92$ мкВ, вызванной воздействием одновременно электрической составляющей E_φ напряжённости электромагнитного поля.***

Можно убедиться (на основе данных вычислений Примера №1), в "Ближней зоне" сигнал в том же месте при регистрации Магнитной составляющей H_ϑ напряжённости электромагнитного поля Приёмной Рамочной или Ферритовой антенной на много больший, чем возможное значение е.д.с. на выходе такого типа антенн при регистрации ими Электрической составляющей E_φ.

На фото **Изо.3.3**- на штативе представлен вид **АКИП -4200/3** (точность измерения 3% для

частот до 3 МГц) портативного измерителя частотного спектра. Представляя собой селективный измеритель электрической или магнитной напряжённости электромагнитного поля, используемый автором для контроля показаний, полученных с помощью приёмных антенн, эдс которых регистрировалась с помощью виртуального двух канального цифрового осциллографа - **Pico ADC - 216** (16 бит А/К преобразование сигналов частотой до 250 КГц) представленный (на заднем плане) на фото **Изо. 3.2**.

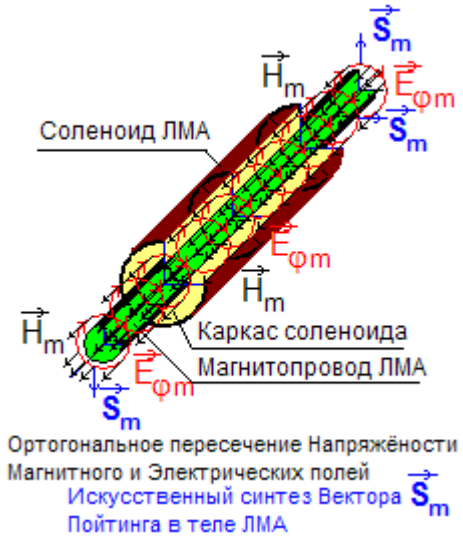
4. Об «искусственном» синтезе Вектора Умова-Пойнтинга в теле ЛМА

Искусственный синтез Вектора Умова-Пойнтинга в основном происходит в пространстве между внутренней поверхностью каркаса внешнего соленоида и боковой поверхностью магнитопровода ЛМА возникает силу того факта, что происходит циркуляция напряженности электрического поля

$$\vec{E}_{\varphi m}(\rho,\theta)\sin\omega t \qquad (4-1)$$

лежащей в плоскости, перпендикулярной оси ЛМА, вокруг боковой поверхности тела магнитопровода ЛМА в пределах радиуса R (см. Изо. 3.4): $\frac{d_m}{2} < R < \frac{d_c}{2}$ (4 – 2) и она ортогонально пересекается с напряженностью магнитного поля H, $H(\omega t) = \frac{H_m}{\mu_{eff}}\sin\omega t$ (4 – 3) созданным соленоидом, по которому протекает ток I: *I(ωt) = Im sinωt* (4 – 4), то в этом пространстве «искусственно синтезируется» вектор S_m Умова-Пойнтинга:

$$\vec{S}_s(\rho,\theta,t) = [\vec{E}_\varphi(\rho,\theta,t)\cdot\vec{H}(t)] \qquad (4-5)$$



Изо. 3.4.

Он лежит в плоскости, перпендикулярный оси тела магнитопровода ЛМА, и направлен радиально наружу через боковую поверхность ЛМА.

Тройка ортогональных векторов (E, H, S) Передающей ЛМА (излучателя типа МГД) - является право ориентированной тройкой ортогональных векторов.

Усреднённое значение нормальной составляющая величины «синтезируемого вектора Умова-Пойнтинга» отыскиваем с помощью выражения:

$S_{zmn}(\rho,\theta) = E_{\varphi m}(\rho,\theta)H_m(\rho,\vartheta)\frac{\varepsilon_{eff}}{2\pi\mu_{eff}}\int_0^{2\pi}\sin\omega t\sin\omega t dt$ (4 – 6), где ε_{eff} - диэлектрической проницаемости каркаса (см. Изо.2). Так как

$\int(\sin\omega t)^2 dt = \frac{1}{2}t - \frac{1}{4\omega}\sin 2\omega t$ (4 - 7) $\int_0^{2\pi}\sin^{2\pi}\omega t dt = \pi$ (4 - 8), то

$$S_{zmn}(\rho,\theta) = \frac{\varepsilon_{eff}}{2\mu_{eff}}E_{\varphi m}(\rho,\vartheta)H_m(\rho,\theta) \qquad (4-8)$$

В точке пересечения напряженности электрического и напряжённости магнитного полей Вектор Умова-Пойнтинга $\vec{S}_{zmn}(\rho,\theta)$ направлен радиально наружу тела ЛМА ортогонально плоскости, в которой упомянутые векторы размещены.

5. "Историческая" справка:

Впервые "Искусственный синтез Вектора Умова-Пойнтинга" в передающей антенне типа Электрического диполя Герца (The crossed field antennas, SFA) применили англичане в **US Patent № 5,495,259** [4]. Воплощение их идеи осуществил в **US Patent № 5,155,495** 1996 г. Gennady Lyasko (Ляско Геннадий Борисович - в настоящее время проживающий в США)[5]. Он в1995 г. ознакомил автора настоящей работы с Описанием этого **US Patent № 5,495,259.**

В 1980 г. в Израиле по просьбе Ph.D. Richard Markoll - президента Американской компании была создана автором "Теория работы и инженерный методом расчёта Передающей Линейной Магнитной Антенны" для диапазона частот менее 100 КГц. Автором собственноручно в 1982 г. по просьбе Ph.D. Richard Markoll была изготовлена первая модель ЛМА в герметичном корпусе (диаметр менее 10 см, длина 80 см). Магнитопровод цилиндрической формы её содержал 7 ферритовых стержней, собранных из чашечек "Р типа" фирмы Сименс.

Летом 1982 г. автор был приглашён Ph.D. Richard Markoll приехать в г. Мюнхен для передачи своей модели ЛМА специально созданной для её испытания Комиссии американских и немецких специалистов.

Однако, как бывшего офицера запаса и научного сотрудника СССР в соответствии с существующим там в те годы порядком не могли допустить к месту проведения испытаний и к участию в заседаниях этой комиссии.

Его моделью и результатами испытаний "приглашающие" остались очень довольны. ***Там автору была вручена копия Документа, подтверждающая принятие в 1982 г. Патентным Бюро США Заявки на Изобретение, и что он является её автором. Ему так же там вручили копию текста Описания этой Заявки на "US Patent 4458248*** **Jul. 3, 1984: "Parametric Antenna"" [2].**

Автор в 2006 г. решил воспроизвести такого рода модель в России, но несколько в изменённом виде (с целью воплотить в ней идею английских изобретателей "искусственного создания в теле ЛМА синтеза вектора Умова - Пойнтинга", изложенную в Описании **US Patent № 5,495,2590 [4]** с целью использования такого рода изделий для передачи цифровой информации в поглощающих средах. В "любительской" домашней лабораторию автор в 2008 г. приступил к реализации поставленной цели.

Выдача **ФИПС РФ Патента № 2428774 от 10 Сентября 2010 г.: «Передающие Линейные Магнитные Антенны (ЛМА)[1]"** - убедила его в целесообразности продолжения исследований в данном направлении.

6. Релевантная справка на 2000 г.

Из источника http://www.pacificsites.com/~broke/FA.shtm1: принята в США следующая классификация поддиапазонов в нижней части электромагнитных волн:

а) ULF – это поддиапазон длин волн в свободном пространстве от 100000 км до 10000 км

(от 3 Герц до 30 Герц соответственно) при этом указаны «официальные пользователи» приведённых ниже частот:

7 Герц - «Schumann fundamental»;

13 Герц – «Schumann second harmonic»;

16 2/3 Герц – «Mains Power Grid».

б) ELF – это поддиапазон длин волн в свободном пространстве от 10000 км до 1000 км

(от 30 Герц до 300 Герц соответственно) при этом указаны «официальные пользователи» приведённых ниже частот:

45 Герц – «Sub coms»;

50 Герц и 60 Герц – «Main Power Grid»;

76 Герц – «SANGUINE – Project ELF».

в) VF – это поддиапазон длин волн в свободном пространстве от 1000 км до 100 км

(от 300 Герц до 3 000 Герц соответственно)

г) VLF – это поддиапазон длин волн в сводном пространстве от 100 км до 10 км

(от 3 000 Герц до 30 000 Герц) при этом указаны «официальные пользователи» приведённых ниже частот:

1) от 10 000 Герц до 15 000 Герц – «Earth Whistlers»,

2) от 11 900 Герц до 21 000 Герц – «Coms SW RTTY».3в) 11 904,7761 Герц; 12 648,809 Герц; 14 880,952 Герц – «RSDN-20» - это глобальная морская навигационная система «Омега»;

4) 21 400 Герц – «NNS – another NNS page off the air»;

5) от 14 000 Герц до 30 000 Герц – «Navy sub coms».

д) LF – это поддиапазон длин волн в свободном пространстве от 10 км до 1 км
(от 30 000 Герц до 300 000 Герц соответственно) при этом указаны «официальные использователи» приведённых ниже частот:

от 30 000 Герц до 60 000 Герц - «Navy sub coms»;

60 000 Герц – «WWVB Time»….

7. Заключение.

С Января 2016 г. Модель передающей антенны ЛМА №21 и модель приёмной магнитной антенны МА№2 переданы компанией "Л.Р.Э.Т." (www.lret.ru) для прохождения испытаний геофизикам компании "РАДИОНДА" в используемой ими аппаратуре зондирования недр земли вместо применяемых ими электрических антенн, относящихся к типу возбудителей электромагнитного поля типа Электрических Диполей Герца (ЭГД). Результатами сравнительных испытаний в Феврале 2016 в скважинах Полигона МГУ руководство компании геофизиков "РАДИОНДА" осталось довольно и отметило полученные преимущества построенных им моделей. Этот факт объяснил причину довольства Американо - Германской Комиссии в Мюнхене , испытавших в 1982 г. первую модель автора Передающей линейной магнитной антенны.

Литература.

1. А.Б. Ляско. Описание Изобретения, Патент РФ № 2428774 от 10 Сентября 2010 г.: "Передающие Линейные Магнитные Антенны (ЛМА)").
2. Arie Lyasko." Теоретическое приложение и инженерный метод расчета" US Patent 4458248 Jul. 3, 1984: “Parametric Antenna”.
3. Г.З. Айзенбергу. монография «Антенны ультракоротких волн» (стр.126 -135). Связь Издат.
4. US Patent № 5,495,259
5. Gennady Lyasko US Patent № 5,155,495 1996 г.
6. R. Ploncey and R.E. Collin книга «Principles and applications of electromagnetic fields» (page 241-242)
7. Программа "MathCAD MathSoft, Inc."