

# Сферические электромагнитные волны линейных электрических антенн в СДВ диапазоне

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

1. Основные уравнения для магнитной ( $H_\varphi(t, \rho)$ ) и электрических

( $E_\rho(t, \rho)$  и  $E_\theta(t, \rho)$ ) составляющих напряжённостей электромагнитного поля для Линейных Электрических Антенн (ЛЭА), относящихся к излучателям типа Электрического Диполя Герца (ЭГД) выведенные автором монографии [1] в право ориентированной сферической системе ортогональных координат являются моно гармоническими функциями круговой частоты  $\omega$ , пространственных координат ( $\rho, \theta, \varphi$ ) и времени  $t$  вида:

$$H_\varphi(t, \rho) = H_{\varphi m} e^{i\omega t} \quad (1-1)$$

$$E_\rho(t, \rho) = E_{\rho m} e^{i\omega t} \quad (1-2)$$

$$E_\theta(t, \rho) = E_{\theta m} e^{i\omega t} \quad (1-3),$$

где амплитудные их значения описываются выражениями:

$$H_{\varphi m} = \frac{I_{am} l_\varepsilon}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \left[ \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^2 + i\frac{\lambda}{2\pi\rho} \right] e^{-i\alpha\rho} \cos\theta \quad (1-4)$$

$$E_{\rho m} = \frac{I_{am} l_\varepsilon}{2\pi\varepsilon\omega} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \left[ -i\left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^2 \right] e^{-i\alpha\rho} \sin\theta \quad (1-5)$$

$$E_{\theta m} = -\frac{I_{am} l_\varepsilon}{4\pi\varepsilon\omega} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \left[ -i\left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^2 + i\frac{\lambda}{2\pi\rho} \right] e^{-i\alpha\rho} \cos\theta \quad (1-6)$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  (1-7)  $\mu = \mu_0 \mu_r$  (1-8)

$\vec{E}$  - 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<sup>2</sup>].

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

$\vec{J}_\varepsilon$  - вектор плотности электрического тока, [Ампер / м<sup>2</sup>].

$\vec{J}_m$  - вектор плотности «магнитного тока», [Вольт / м<sup>2</sup>].

$\epsilon_0$  - коэффициент диэлектрической проницаемости в вакууме, [Ампер сек / Вольт м],

или [Фарад / м], где:

$$\epsilon_0 = 1/36\pi 10^9 \quad (1.9)$$

$\epsilon_r$  - относительная величина диэлектрической проницаемости среды,

$\mu_0$  - коэффициент магнитной проницаемости в вакууме, [Вольт сек / Ампер м],

или [Генри / м], где:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad (1.10)$$

$\mu_r$  - относительная величина магнитной проницаемости среды,

$\sigma_e$  - коэффициент проводимости электрического тока единичного объёма среды, [1 / Ом м],

$\sigma_m$  - коэффициент проводимости « магнитного тока» единичного объёма среды, [Ом / м].

$$\lambda_0 = c_0 / f \quad (1.10)$$

f - частота несущей, излучаемая ЛМА в Гц.

$$c_0 = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (1-12)$$

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1-13)$$

$$\alpha = 2\pi / \lambda_0 \quad (1-14) \quad \mu_0 f = W_0 / \lambda_0 \quad (1-15) \quad \omega = 2\pi f \quad (1-16)$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (1-17) \quad W = W_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (1-18) \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (1-19) \quad c = c_0 \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1-20)$$

$W_0$ ,  $W$  - волновое сопротивление в "открытом пространстве (вакууме) и в окружающей среде, соответственно, [Ом],

$d$  – диаметр стержня цилиндра, изображённого вертикально в центре координатной системы, [м],

$l_e$  - длина стержня, обозначающего тело Линейной Электрической Антенны (ЛЭА) [м],

и при условиях:

$$l_e \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1-21) \quad d \ll l_e \quad (1-22) \quad \text{является элементарным Электрическим Диполем Герца}$$

(ЭГД).

$$I_{am} = j_e F_a \quad (1-23) \quad F_a = \frac{\pi d^2}{4} \quad (1-24) \quad \mathcal{E} = \frac{1}{\lambda W} \quad (1-25)$$

$I_{am}$  – амплитудное значение тока проходящий по телу ЭГД [А],

$F_a$  – сечение поперечное сечение цилиндрического тела ЭГД [кв.м],

Уравнения (1 – 4, 5, 6) можно привести к виду:

$$H_{\varphi m} = \frac{I_{ам} l_{\epsilon}}{4\pi\rho^2} (1 + i\alpha\rho) e^{-i\alpha\rho} \cos\theta \quad (1-26)$$

$$E_{\rho m} = \frac{I_{ам} l_{\epsilon} \lambda W}{4\pi^2 \rho^3} [-i + \alpha\rho + i(\alpha\rho)^2] e^{-i\alpha\rho} \sin\theta \quad (1-27)$$

$$E_{\theta m} = -\frac{I_{ам} l_{\epsilon} \lambda W}{8\pi^2 \rho^3} [-i + \alpha\rho + i(\alpha\rho)^2] e^{-i\alpha\rho} \cos\theta \quad (1-28)$$

В «Дальней зоне» когда  $\rho \geq \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{2\pi}$  (1-29) остаются лишь две компоненты напряжённостей электромагнитного потока, изучаемого ЭГД в окружающее пространство:

$$H_{\varphi m} = i \frac{I_{ам} l_{\epsilon}}{2\pi\lambda\rho} \cos\theta \quad (1-30)$$

$$E_{\theta m} = -i \frac{I_{ам} l_{\epsilon} W}{2\pi\lambda\rho} \cos\theta \quad (1-31)$$

Амплитудное значение  $S_m$  [Вт/сек] вектора Умова-Пойнтинга, который с физической точки зрения являющейся плотностью секундного «расхода» электромагнитной энергии:

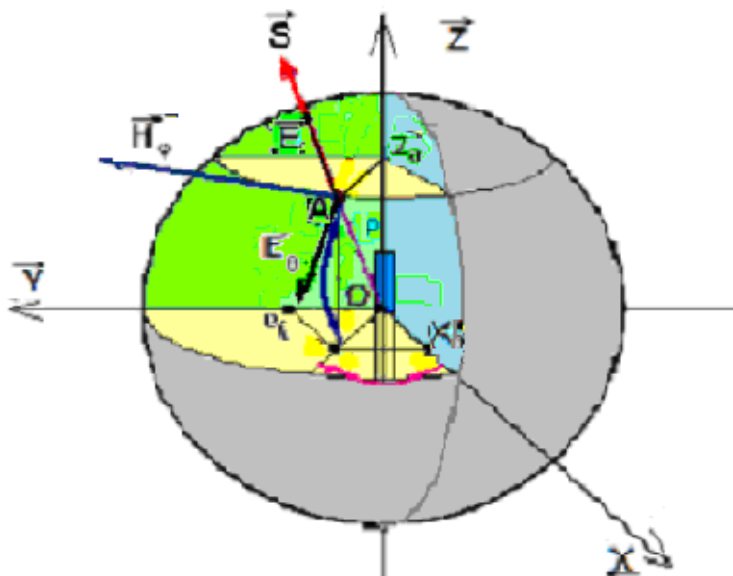
$$S_m = E_{\theta m} H_{\varphi m} \quad (1-33)$$

в право ориентированной системе ортогональных векторов (E, H, S) «Волновое

сопротивление»  $W = \frac{E_{\theta m}}{H_{\varphi m}}$ , исходя из значений выражений (1-31) и (1-32) является отрицательной величиной.

В отличие от МГД, где ориентация ортогональных векторов  $[\vec{E}, \vec{H}, \vec{S}]$  излучаемого потока электромагнитной энергии является «правосторонней», для ЭГД ориентация ортогональных векторов  $[\vec{E}, \vec{H}, \vec{S}]$  излучаемого электромагнитного потока является «левосторонней».

Поэтому анализ Сферических волн, излучаемых ЭГД, требуется проводить [2] в «естественной» для ЭГД левосторонней сферической системе ортогональных координат, как это проиллюстрировано на Изо.1.



### Изо.1.

В этом случае вектор  $\vec{E}_e$  приобретёт обратное направление, а «Волновое сопротивление»  $W$  становится положительным числом, чему было уделено особое внимание автором в тексте [2].

2. В вертикальном положении ЛЭА может быть представлена как «одинокий вертикальный штырь» («Вертикальная Штыревая Антенна») длиной  $l_e$ , выполненный из материала, обладающего хорошей проводимостью для переменного электрического тока, и имеющий по всей длине одинаковый диаметр  $d$ , когда выполняется условие  $\lambda \gg l_e > d$  (2 – 1).

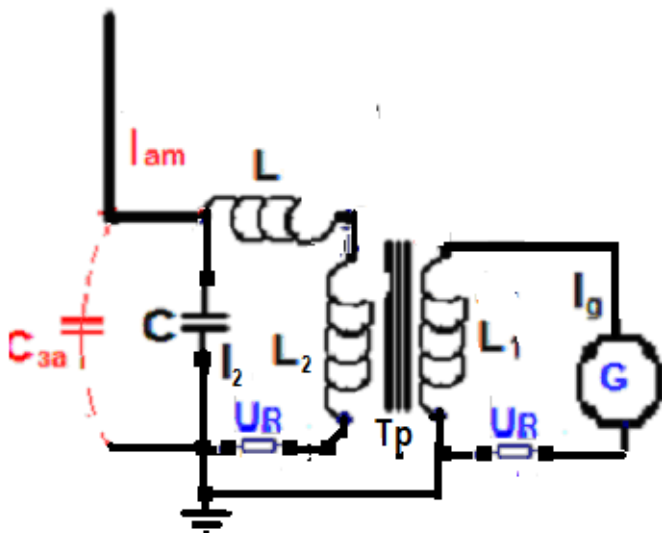
Естественно, что такая «Вертикальная Штыревая Антенна» будет обладать в свободном пространстве "собственной ёмкостью"  $C_{за}$  относительно «Земли».

Штыревая Антенна излучает электромагнитные волны за счёт существования так называемых «Токов Смещения», исходящих с боковой её поверхности к «Земле» (или «заземлению»).

Как известно, эквивалентной электрической схемой Штыревой электрической антенны СДВ частотного диапазона является виртуальный конденсатор  $C_{за}$  (собственной ёмкости Антенны).

Автор для измерения этой виртуальной "собственной ёмкости"  $C_{за}$  передающей вертикальной (штыревой или цилиндрической) антенны предпочитает использовать схему, обеспечивающую прохождения в теле антенны переменного тока с амплитудным значением  $I_{ам}$  частоты  $f$  от источника переменного напряжения, представленную на **Изо. 2**.

Это схема «последовательного резонанса» (см. **Изо.2.**) с обязательным включением во её вторичном контуре конденсатора  $C$  и индуктивности  $L$  с известными значениями их величин. Провод от модели ЛЭА подсоединяется в точке соединения  $C$  и  $L$ . Для контроля величины протекаемого тока  $I_{2m}$  между концом  $L$  и "заземлённого" конца обмотки согласующего трансформатора  $T_p$  включено сопротивление  $Rt2$  (в данном случае  $Rt2 = 4.3$  Ом, 1%). Первичная обмотка  $T_p$  одним концом соединена с клеммой выхода Генератора «напряжения» частоты  $f$ . Второй её конец соединён совместно со второй клеммой Генератора (при необходимости измерения амплитуды тока  $I_{Gm}$  в разрыв включается калиброванное сопротивление  $Rt1$ ) и с шиной "заземления".



### Изо. 2 Эквивалентная схема реального макета в момент теста представлена на Фот.о.2.

Данная схема обеспечения питания током антенну, измерением собственной резонансной частоты  $f_{01}$  во вторичном контуре питания током ЛМА, позволяет определить эффективное значение индуктивности  $L_{2эфф}$  вторичного контура при отсоединённом проводе питания ЛМА для

данной частоты. А в случае подсоединения по значению величины резонансной частоты  $f_{02}$  вычислить величину эффективной ёмкости  $C_{эфф2} = C + C_{за}$ , зная величину  $L_{2эфф}$ . Собственная антенная ёмкость  $C_{за}$  и конденсатор  $C$  контура питания антенны образуют с индуктивностью  $L_{2эфф}$  последовательную резонансную цепь со значением собственной резонансной частоты  $f_{02}$ :

$$f_{02} = 1/2\pi\sqrt{C_{эфф}L_{эфф}} \quad (2 - 2)$$

Напряжение от генератора моно гармонического напряжения частоты  $f$  вызывает в первичной обмотке согласующего трансформатора ток  $I_g$ . При включении калиброванного сопротивления  $R_{т1}$  создаёт на нем напряжение  $U_{Rт1}$ , регистрация которого позволяет с необходимой точностью получить информацию, как о спектре сигнала генератора, так форму и амплитудное значение тока  $I_g$ . Во вторичной обмотке наводится напряжение  $U_{вх2}$  частоты  $f$ , которое вызывает ток  $I_2(t)$  во вторичном контуре и при подсоединении провода ЛМА к нему вызывает ток в её теле со значением амплитуды  $I_{ам}$ .

Напряжение  $U_{Rт2}$ , на калиброванном сопротивлении  $R_{т2}$  дает возможность не только определять амплитудное значение тока  $I_{ам}$ , *обтекаемого контур питания антенной цепи, но его форму и спектр.*

По максимуму значения напряжения  $U_{Rт1}$  или  $U_{Rт2}$  при изменении значения частоты  $f$  выходного сигнала генератора  $G$  можно определить значение собственной частоты  $f_{01}$  или  $f_{02}$  *цепи питания током ЛМА и значение амплитуды  $I_{ам}$ , знание которого позволит определить в заданной точке пространства с помощью формул (1 - 26, 27, 28) амплитудные значения компонент  $(\vec{E}_e, \vec{E}_p, \vec{H}_e)$  напряжённостей электромагнитного поля в свободном пространстве.*

**3. Важно предварительное знание теоретическое значение величины собственной ёмкости  $C_{за}$  для Штыревой или Цилиндрической (как показано ниже) Антенн в СДВ**

В справочнике [3] для определения собственной ёмкости одиночной вертикальной Штыревой антенны имеет место следующая формула:

$$C_i[pF] = \frac{0.24l_e[см]}{\text{Log}(\frac{l_e}{d})} \quad (3 - 1), \text{ где соотношение между } l_e \text{ и } d \text{ определяется выражениями}$$

$$l_e \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (3 - 2) \quad d \ll l_e \quad (3 - 3).$$

Но при сохранении этих требований можно методом суперпозиции использовать эту формулу для определения собственной ёмкости *антенны, типа ЭГД*, тело которой представляет из себя вытянутый (длиной  $l_e$ ) *пустотелый цилиндр диаметра  $D$* , боковая поверхность которого образована *металлической фольгой толщиной  $d$* , при этом

$$D \ll \lambda / 2\pi \quad (3 - 4)$$

$$C_{за}[pF] = M \frac{0.24l_e[см]}{\text{Log}(\frac{l_e[см]}{d[см]})} \quad (3 - 5), \text{ где } M = \xi \frac{\pi D[см]}{d[см]} \quad (3 - 6), \text{ где } \xi < 1 \text{ - поправочный}$$

коэффициент, зависящий от того, каким образом торцовая часть боковой поверхности соединена с схемой её питания переменным напряжением частоты  $f$ .

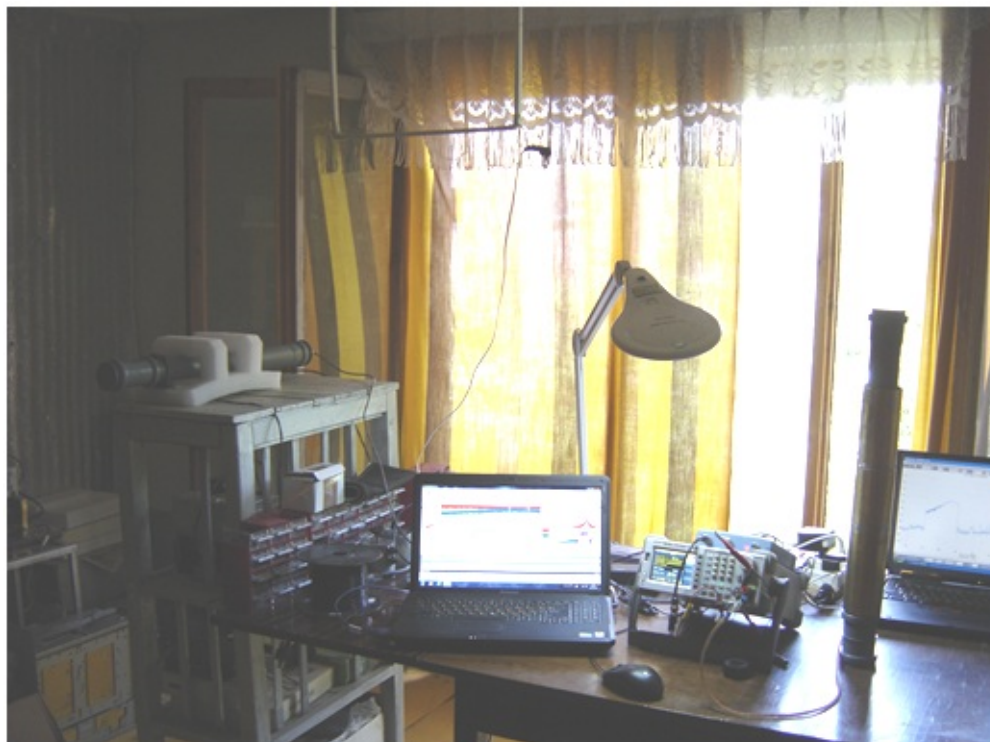
### 3.1 Пример №1. Определение основных данных элементов для эквивалентной

## электрической схемы на *Изо.2*.

Дана модель ЦАН№1 - антенна цилиндрической формы, находящаяся в вертикальном положении, диаметра  $D=6.4$  см и длиной  $l_e = 38$  см, боковая поверхность которой выполнена из латунной фольги толщиной  $d = 0.17$  мм.

Собственная емкость которой определяем по формуле (3 -5) с учётом формулы (3 - 1).

$C_i[pF] = 2.73 M = 1182.8$ . При значении  $\xi = 1$  можно было бы достичь значения  $C_{за}[pF] = 3328.8$  (3 - 7), но при соединении в одной точке в торце боковой поверхности цилиндра провода, как это можно видеть на **Фото.2**, удалось достичь экспериментально лишь значение получено экспериментально значение только  $C_{за}[pF] = 56.7$  pF.



**Фото.1. Слева модель MAN№7, выше модель ЛАН№1 и справа модель ЦАН№1**

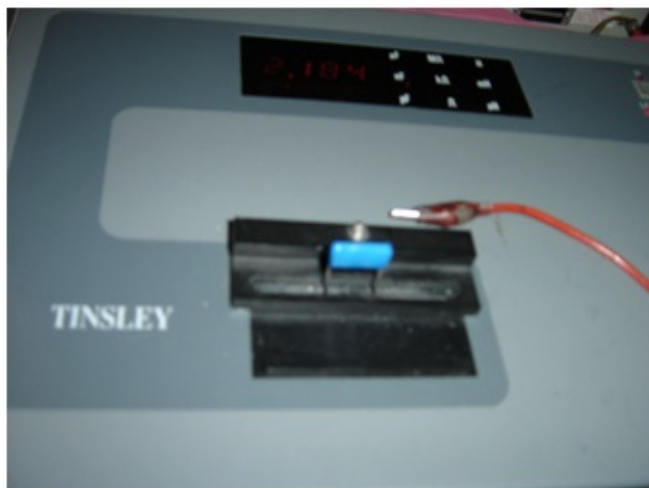
С целью экспериментального определения собственной емкости упомянутой выше модели Цилиндрической антенны ЦФ№1, вид которой изображён на **Фото.1** и **Фото.2** в лаборатории, было организовано "рабочее место" представленное на **Фото.1**.

Провод от макета цилиндрической антенны в соответствии с эквивалентной схемой **Изо. 2**. подсоединялся последовательно к месту соединения калиброванного высоковольтного конденсатора (на Фото 2 он - синего цвета)  $C = 2186$  pF (1%, 1600 В) с одним из концов вторичной обмотки согласующего трансформатора Тр (на Фото.2 он зелёно - красного цвета).

Параметры согласующего трансформатора Тр: число витков первичной обмотки  $N1 = 30$ . Число витков вторичной обмотки  $N2 = 26$ . На частоте 1 КГц измерения с помощью цифрового L-C-R прецизионного моста (дали:  $L2 = 6.106$  мН ,  $r1 = 0.786$  Ohm,  $Q = 48,8$ .  $L1 = 8.627$  мН,  $r2 = 1.012$  Ohm,  $Q = 53.6$ . (см. **Фото.3**.)



**Фото. 2.**

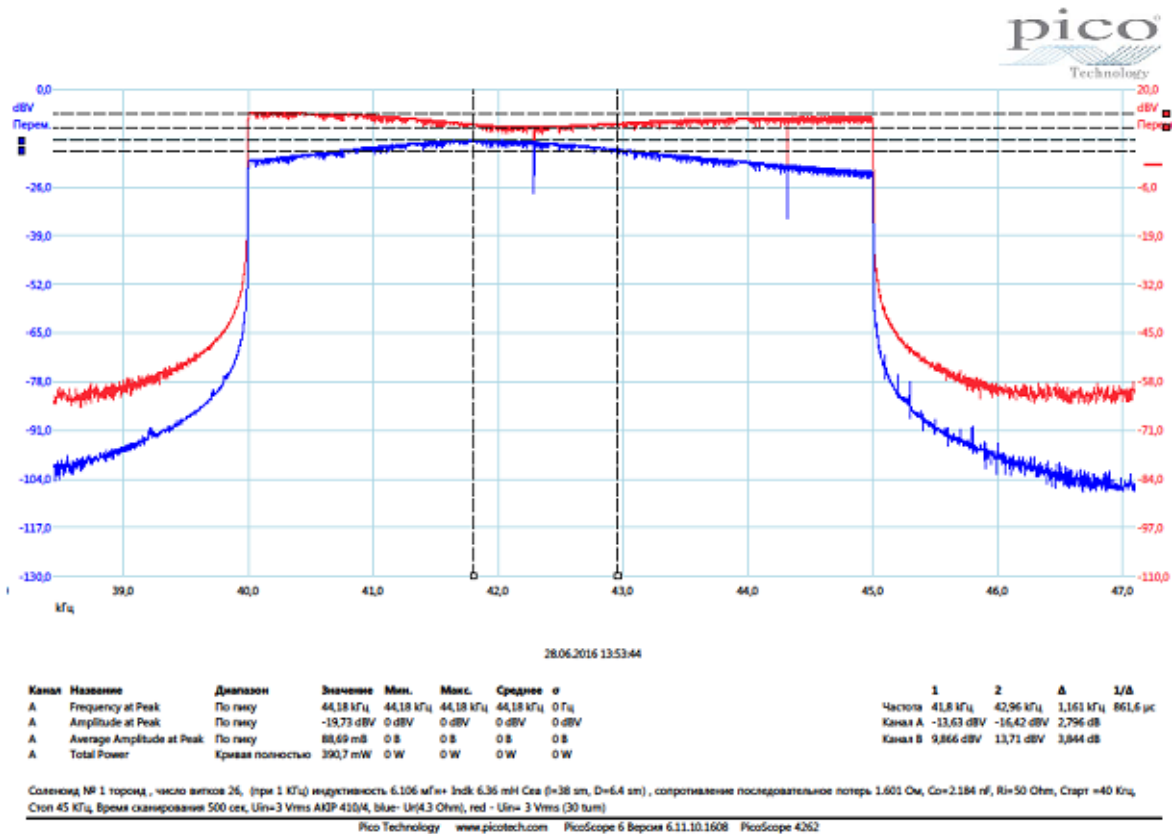


**Фото.3. В момент измерения величины конденсатора С.**

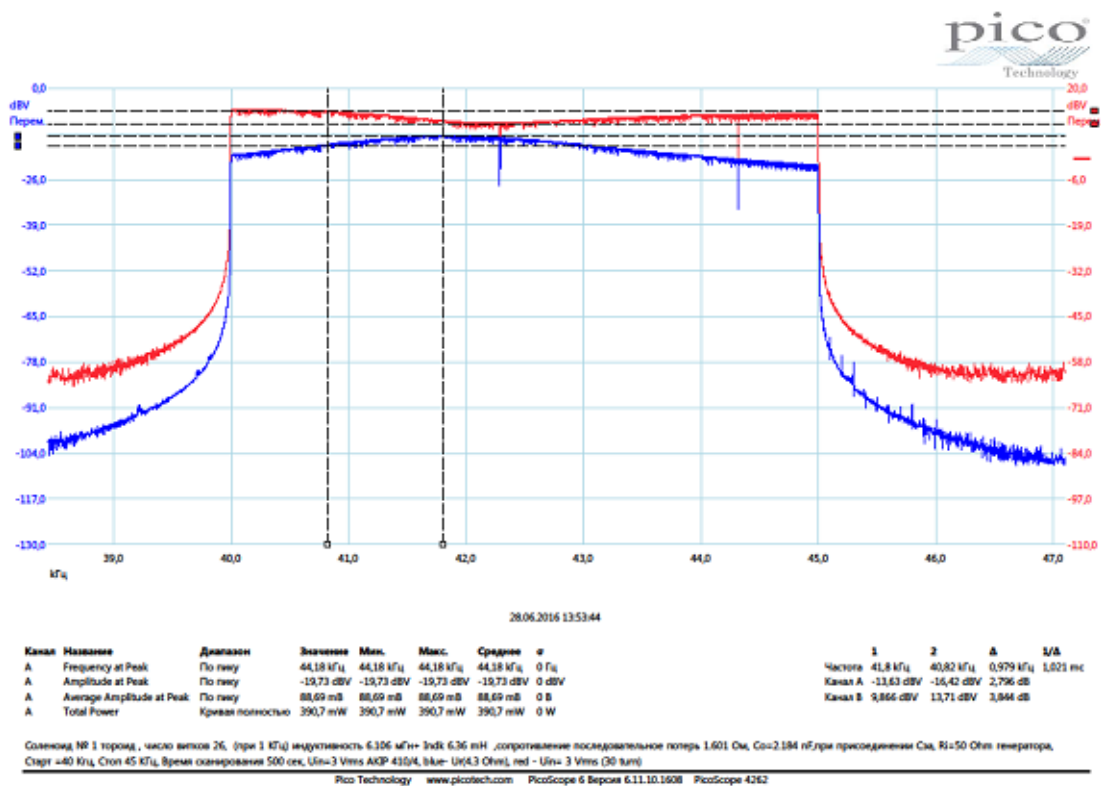
В качестве индуктивности  $L$  использована обмотка тороида (на **Фото.2** - представлен чёрным цветом). На частоте 1 КГц измерения с помощью цифрового L-C-R прецизионного измерителя:  $L = 6.38 \text{ мН}$  (3 - 8) ,  $r = 1.608 \text{ Ohm}$ ,  $Q = 34.95.$ , при этом  $N = 194$  витка содержит его обмотка. На частоте 1 КГц  $C = 2.184 \text{ нФ}$  (3 - 9).

### **3.2. Определение основных характеристик модели Цилиндрической Антенны (ЦАН№1) представленной на Фото. 2.**

Сначала определяют параметры испытываемой схемы обнаружением частоты резонанса  $f_{o1}$  во вторичном контуре по максимуму показаний напряжения  $U_{Rt2}$ , на калиброванном сопротивлении

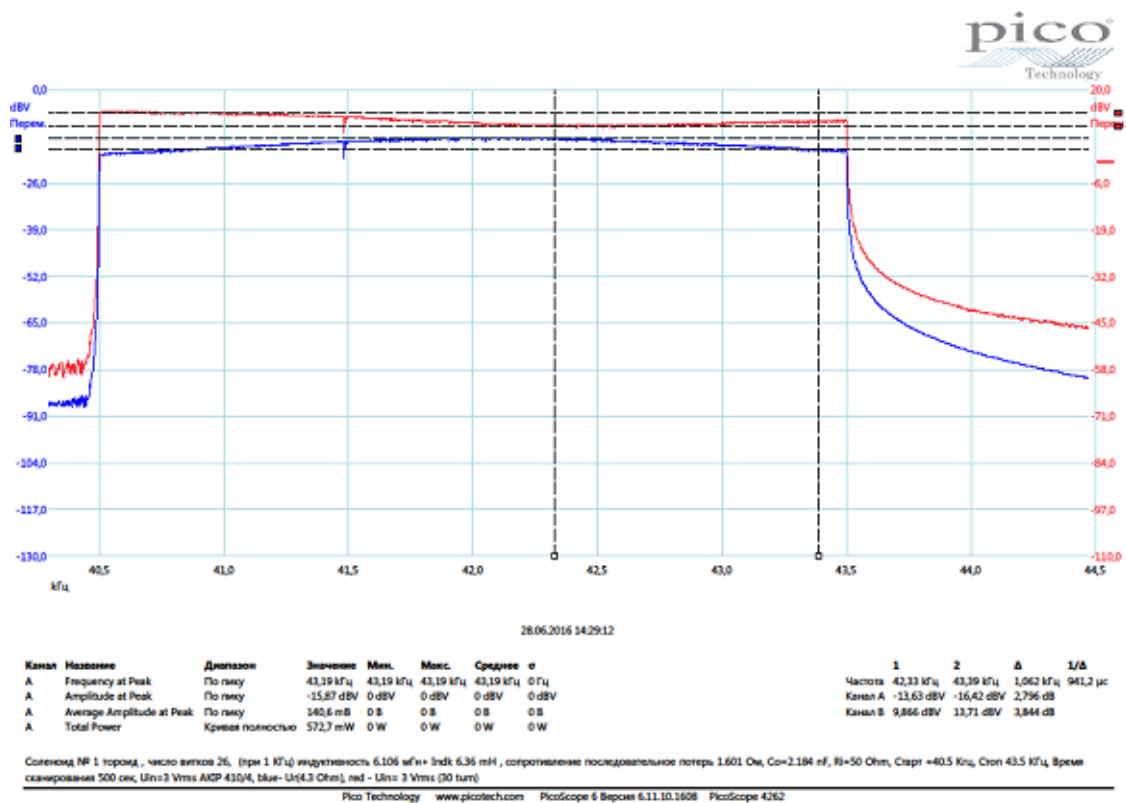


Изо. 4. Синим цветом спектральная характеристика напряжение на калиброванном сопротивлении  $R_{t2}$  (4.3 Ома, 1%) при подсоединении провода модели ЦА№1 ко вторичному контуру.

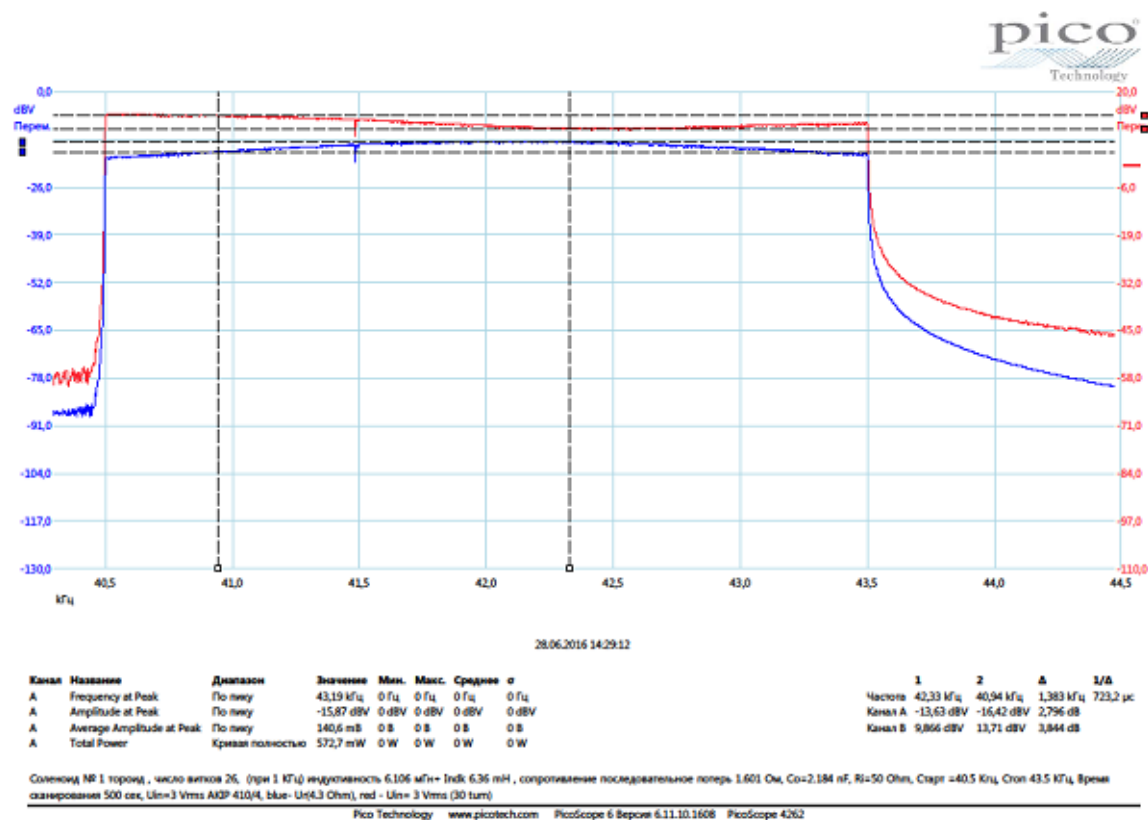


Изо.5. Синим цветом спектральная характеристика напряжение на калиброванном сопротивлении  $R_{t2}$  (4.3 Ома, 1%) при подсоединении провода Рамочной антенны ко вторичному контуру.





Изо. 6. Синим цветом спектральная характеристика напряжение на калиброванном сопротивлении  $R_{t2}$  (4.3 Ома, 1%) без подсоединения провода Рамочной антенны ко вторичному контуру.



Изо. 7. Синим цветом спектральная характеристика напряжение на калиброванном сопротивлении  $R_{t2}$  (4.3 Ома, 1%) без подсоединения провода Рамочной антенны ко вторичному контуру.

$R_{e2} = 4.3 \text{ Ом}$  при отсутствии подсоединения провода питания модели антенны ЦАН№1 ко вторичному контуру с целью определения эффективного значения индуктивности во вторичном

контуре, зная значение ёмкости конденсатора  $C$ . Затем определяется значение частоты резонанса  $f_{o2}$  при подсоединённом проводе модели **ЦАН№1**, как это показано на **Фото. 2.** с целью определения значения собственной ёмкости  $C_{эa}[pF]$ .

При этом одновременно на расстояние 1.4 м регистрировался спектр излученного ей сигнала с помощью, собственноручно изготовленными автором либо **Рамочной приёмной Антенной ЛАН№1**, либо **Ферритовой Антенной МАН№7**, внешний вид которых показан справа на **Фото. 1.** На **Изо. 3, 4, 5** представлены следующие изображения спектра при сканировании сигнала генератора. Время сканирования  $T = 500$  сек. во время регистрации каждого из приведённых изображений.

**3.3** Итак, с помощью изображений **Изо.7.** и **Изо. 6** определяем значение резонансной частоты  $f_{o1} = 42.33$  КГц и значение полосы пропускания  $BW1 = 2.48$  КГц.

Зная величину  $C = 2.184$  nF, определяется эффективная индуктивность вторичного контура

$$L_{эф} = \frac{1}{4\pi^2 f_{o1}^2 C} = 6.47 \text{ мН. (3 - 10).}$$

Интересно отметить, что на частоте 1 КГц индуктивность тороида  $L = 6.38$  мН (3 - 8), поэтому

**Эффективное значение индуктивности  $L_{эф}$  вторичного контура обусловлено лишь значением индуктивности лишь тороида на данной частоте резонанса  $f_{o1}$ .**

Знание значения полосы пропускания  $BW1$ , определяет эффективную добротность вторичного

контура  $Q2_{эф} = \frac{f_{o2}}{BW2} = 17.07$  (3 - 11). Определив Волновое сопротивление вторичного контура

$\rho_2 = \sqrt{\frac{L_{эф}}{C}} = 1721$  Ом. (3 - 12), определяется эквивалентное сопротивление потерь вторичного

контура  $r2_{эф} = \frac{\rho_2}{BW2} = 100.82$  Ом. (3 - 13) По данным выше значениям  $L1$  и  $L2$  согласующего трансформатора  $Tr$  определяется коэффициент трансформации

$k_v = \sqrt{\frac{L2}{L1}} = 0.84$  (3 - 14). Зная внутреннее сопротивление выхода Генератора  $r_i = 50$  Ом,

определяется вносимое им сопротивление потерь во вторичный контур  $r_{gi} = r_i k_v^2 = 35.28$  Ом (3 - 15) и

реальное сопротивление потерь  $r_{a2} = r2_{эф} - R_{t2} - r_{gi} = 61,25$  Ом (3 - 16) вторичного контура для

частоты  $f_{o1} = 42.33$  КГц. Поэтому реальная добротность вторичного контура  $Q = \frac{\rho_2}{r_{a2}} = 28.11$  (3 - 17), а это значит, амплитудное значение напряжения на конденсаторе  $C$ , а следовательно на входе

модели **ЦАН№1** определяется как  $U_{cm} = U_{moutG} k_v Q$  (3 - 18). Так как  $U_{m outG} = 1.41 * 3 \text{ В} = 4.23 \text{ В.}$  (3 - 23).

Поэтому  $U_{cm} = 99.9 \text{ В}$  (3 - 24)

**3.16.** Повторяя подобные вычисления при обработке характера полученных спектров **Изо.4** и **Изо.5.** и зная значение  $L_{эф}$  (см. формулу 3 - 7) и значение величины ёмкости конденсатора  $C$

можно получить значение величины собственной ёмкости рассматриваемой модели Цилиндрической Антенны, указанное ранее  $C_{эa}[pF] = 56.7$  pF. Поэтому возможно вычислить для значения резонансной частоты  $f_{o2} = 41.8$  КГц спектров **Изо.4** и **Изо.5.** амплитудное значение тока в теле модели **ЦАН№1.**

$$I_{ам} = U_{cm} 2\pi C_{эa} f_{o2} = 1.46 \text{ мА (3 - 25).}$$

**Этот пример показывает, что очень трудно получить для диапазона частот СДВ в**

мало габаритных передающих линейных электрических антеннах типа ЭДГ значительную величину протекаемого по их телу тока в силу невозможности получения для этого типа антенн в диапазоне СДВ достаточно большого значения собственной ёмкости.

3.4 Определение амплитудных значений компонентов  $(\vec{E}_\theta, E_\rho, \vec{H}_\varphi)$  напряжённостей электромагнитного поля в свободном пространстве (вакууме) при значении несущей частоты  $f_0 = 41.8$  КГц для расстояния  $\rho = 1.4$  м при значениях амплитуды тока модели ЦАН#1  $I_{am} = 0.015$  А, боковая поверхность которой образована фольгой из латуни толщиной  $d = 0.17$  мм диаметра  $D = 6.4$  см и длиной  $l_e = 38$  см. При значении частоты  $f_0 = 41800$  Гц, длины волны в

открытом пространстве  $\lambda_0 = \frac{c_0}{f_0} = 7177$  м (3 - 20) и при значении углов  $\theta = 0$ ,  $\varphi = 0$  (3 - 21), воспользовавшись (см. рисунок на Изо.1.) формулами (1 - 27, 28, 29) можно отыскать значения  $(\vec{E}_\theta, E_\rho, \vec{H}_\varphi)$ .

Очевидно, что амплитудное значение напряжённости электрического поля

$$E_{\rho m}(\rho = 1.4, \theta = 0) = 0, \quad (3 - 22)$$

Для вычисления амплитудного значения электрической компоненты  $\vec{E}_{\theta m}$  и амплитудного значения магнитной компоненты  $\vec{H}_{\varphi m}$  напряжённостей электромагнитного поля автор воспользовался компьютерной программой [4] уравнений (1 - 27, 29), учитывая, что

$$\alpha D = 1.226 \cdot 10^{-3} \quad (3 - 23) \quad e^{-i\alpha D} = 1 - i1.226 \cdot 10^{-3} \quad (3 - 24)$$

$$H_{\varphi m}(I_{am} = 0.0015 \text{ А}, l_e = 0.38 \text{ м}, \theta = 0) = (4.188 \cdot 10^{-8} + i 3.415 \cdot 10^{-5}) \text{ А/м} \quad (3 - 25)$$

$$|H_{\varphi m}(I_{am} = 0.0015 \text{ А}, l_e = 0.38 \text{ м}, \theta = 0)| = 3.415 \cdot 10^{-5} \text{ А/м} \quad (3 - 26)$$

$$E_{\theta m}(I_{am} = 0.0015 \text{ А}, l_e = 0.38 \text{ м}, \lambda_0 = 7177 \text{ м}, W_0 = 377 \text{ Ом}, \rho = 1.4 \text{ м}, \theta = 0) = (-1.288 \cdot 10^{-7} + i 10.746) \text{ В/м} \quad (3 - 27).$$

$$|E_{\theta m}(I_{am} = 0.0015 \text{ А}, l_e = 0.38 \text{ м}, \lambda_0 = 7177 \text{ м}, W_0 = 377 \text{ Ом}, \rho = 1.4 \text{ м}, \theta = 0)| = 10.477 \text{ В/м} \quad (3 - 28)$$

4. Видим,

а) что составляющая напряжённости магнитного поля  $H_{\varphi m}(I_{am} = 0.0015 \text{ А}, l_e = 0.38 \text{ м}, \theta = 0)$  направлена, в соответствии с рисунком Изо.1 горизонтально

б) тогда как составляющая электрического поля

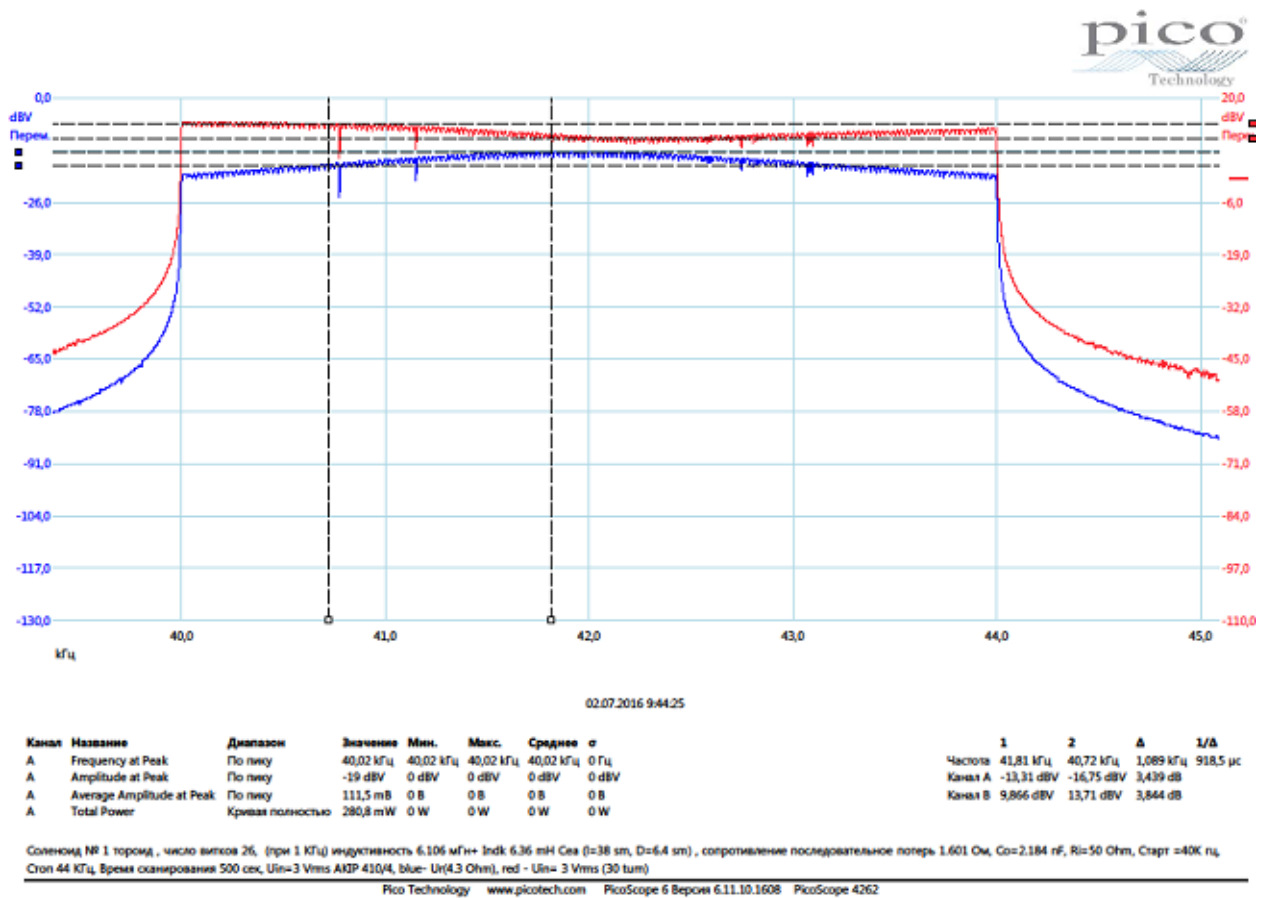
$$|E_{\theta m}(I_{am} = 0.0015 \text{ А}, l_e = 0.38 \text{ м}, \lambda_0 = 7177 \text{ м}, W_0 = 377 \text{ Ом}, \rho = 1.4 \text{ м}, \theta = 0)|$$

направлена вертикально.

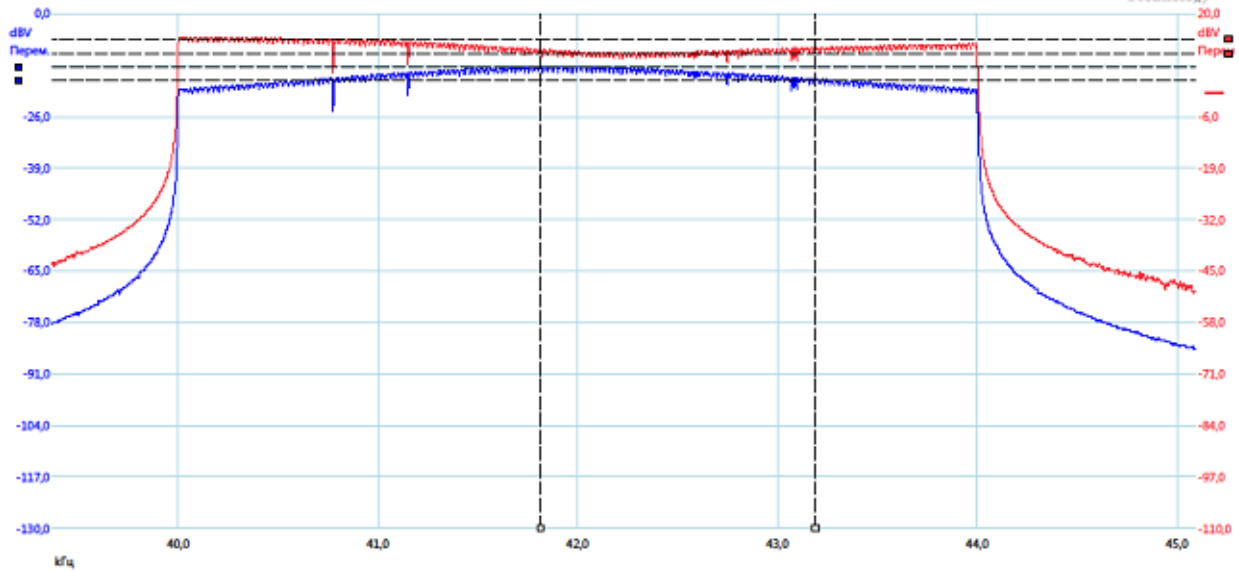
в) Видно, на примере теста модели ЦАН#1, что Передающая Линейная Электрическая Антенна в свободно пространстве "Ближней зоны" создаёт более сильное электрическое поле нежели магнитное поле.



Фото. 4. Иллюстрация "геометрии измерения" уровня излучения модели ЦАН№1. Рамочной Антенной ЛАН№1 и моделью Ферритовой антенны МАН№7 на дистанции 1.4 м.



Изо.8. Форма спектра  $U_T outG$  - (красного цвета кривая) и  $U_{R12}$  (синего цвета кривая)



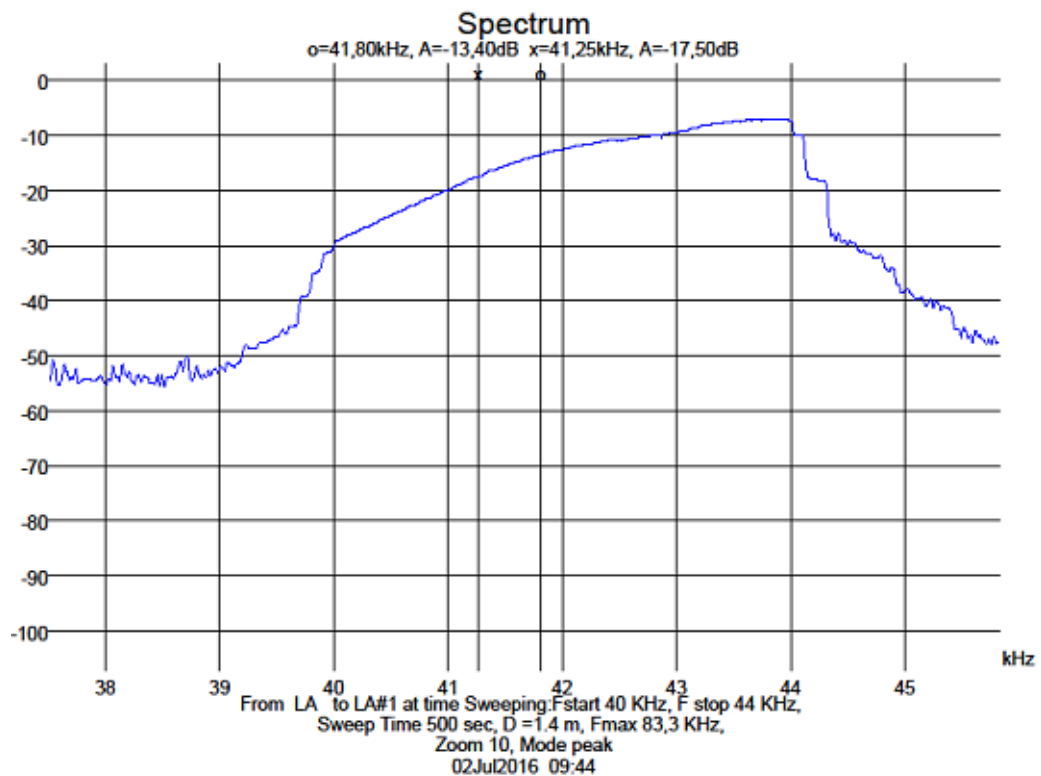
02.07.2016 9:44:25

Канал	Название	Диапазон	Значение	Мин.	Макс.	Среднее	$\sigma$	1	2	$\Delta$	1/8	
A	Frequency at Peak	По пик	40,02 кГц	40,02 кГц	40,02 кГц	40,02 кГц	0 Гц	Частота	41,81 кГц	43,19 кГц	1,38 кГц	724,5 $\mu$ s
A	Amplitude at Peak	По пик	-19 dBV	0 dBV	0 dBV	0 dBV	0 dBV	Канал A	-13,31 dBV	-16,75 dBV	3,439 dB	
A	Average Amplitude at Peak	По пик	111,5 mВ	0 В	0 В	0 В	0 В	Канал B	9,866 dBV	13,71 dBV	3,844 dB	
A	Total Power	Кривая полностью	280,8 mW	0 W	0 W	0 W	0 W					

Соленид №1 торонд, число витков 26, (при 1 кГц) индуктивность 6.106 мГн+ Indk 6.36 мН Cea (l=38 см, D=64 см), сопротивление последовательное потери 1.601 Ом, Co=2.184 нФ, Rl=50 Ом, Старт =40кГц, Стоп=44 кГц, Время сканирования 500 сек, Ulin=3 Vrms АКР 410/4, blue- Uн(4.3 Ом), red - Uл= 3 Vrms (30 turn)

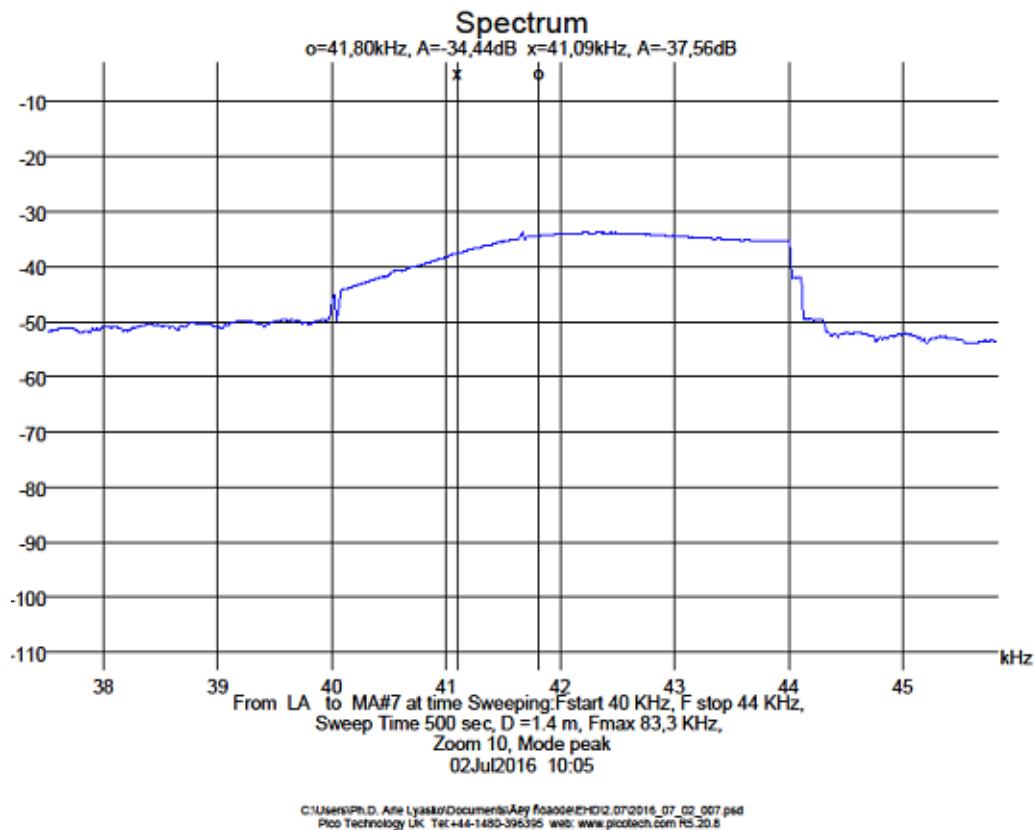
Pico Technology www.picotech.com PicoScope 6 Версия 6.11.10.1608 PicoScope 4262

Изо.9. Форма спектра  $U_{m outG}$  - (красного цвета кривая) и  $U_{Rt2}$  (синего цвета кривая)



C:\Users\PH.D. Arto Lyasko\Documents\Any Photo\EMD\02.07.2016\_07\_02\_005.psd  
Pico Technology UK. Tel: +44-1480-395395 www.picotech.com RS-20.8

Изо.10. Спектр выходного сигнала Рамочной Антенны ЛАН#1



### Изо. 11. Спектр выходного сигнала Ферритовой Антенны МАН#7

Одновременно со сканированием в течении **500 сек.** выходного напряжения Генератора в пределах частоты **40 КГц - 44 КГц** для целей определения **резонансной частоты  $f_{o2} = 41.8$  КГц**, полосы пропускания  **$BW_2 = 2.47$  КГц** и тока в теле модели ЦАН#1 при помощи АЧХ, представленных на **Изо.8** и **Изо. 9** производилась регистрация напряжений на выходе приёмных Антенн ЛАН#1 и МАН#7 (АЧХ зарегистрированных ими сигналов изображены, соответственно на **Изо.11** и **Изо. 10**).

"Эффективная высота" регистрации ЛАН#1 рассчитывается по формуле для Рамочных Антенн:

$$H_{эффЛАН1}(f) = \frac{2\pi N A_{eff}}{\lambda} \quad (4 - 1), \text{ где для ЛАН#1 } A_{eff} = 0,25 \text{ кв.м.}, N = 100 \text{ витков.}$$

для частоты  $f_{o2} = 41.8$  КГц длина волны  $\lambda = 7177$ м, поэтому  $H_{эффЛАН1}(41.8 \text{ КГц}) = 0.022$  м

В соответствии с **Изо.11** на частоте **41.8 КГц** был зарегистрирован уровень сигнала

$$GLA\#1 = -13.40 \text{ dBV} \quad (4 - 2), \text{ это значит } U_{выхЛАН1} = 10^{-13.40/20} = 0.214 \text{ В} \quad (4 - 3).$$

В разделе 3.3 было установлено, что на расстоянии 1.4 м модуль напряжённости электрического поля, созданного моделью ЦАН#1 :

$$|E_{эм}(I_{ам} = 0.0015 \text{ А}, l_e = 0.38 \text{ м}, \lambda_0 = 7177 \text{ м}, W_0 = 377 \text{ Ом}, \rho = 1.4 \text{ м}, \theta = 0)| = 10.477 \text{ В/м} \quad (3 - 28)$$

Поэтому теоретически значение амплитуды напряжен на выходе ЛАН#1 может быть определено по формуле  $U_{ЛА\#1 м} = H_{эффЛА} |E_{эм}| = 0.23 \text{ В.} \quad (4 - 4)$ . Это теоретическим путём полученное значение для амплитуды напряжения на выходе пассивной Рамочной Антенны ЛАН#1, изображённой на **Фото.4.**, хорошо совпадает с экспериментально полученным его значением (4 - 3).

Уровень сигнала, зарегистрированный ферритовой антенной **МАН#7**, представленный на **Фото. 4**,

$$GLA\#1 = -34.44 \text{ dBV} \quad (4 - 5) \text{ на частоте } 41.8 \text{ КГц}, \text{ это значит}$$

---

$$U_{\text{вых}} \text{MAN}\#8 = 10^{-34.44/20} = 0.019 \text{ В} \quad (4 - 6).$$

Сравнивая амплитудные значения принятых антеннами **ЛАН#1** и **МАН#7** сигналов от модели ЦАН#1, создавшей практически в месте их расположения один и тот же уровень электрической напряжённости поля, позволяет определить значение "Эффективная высота" регистрации **МАН#7**:

$$H_{\text{эфф.МАН}\#8} (41.8 \text{ КГц}) = 0.022 * (0.019 / 0.214) \text{ м} = 1.95 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

## 5. Литература

[1] Г. З. Айзенберг, монография "Антенны Ультракоротких Волн", Гос. Изд. Лит. по вопросам Связи и Радио", Москва, 1957 г.

[2] А. Б. Ляско, Описание Изобретения Патента РФ № 25300233 "Способ преобразования в открытом пространстве двух направленных в одну сторону линейно поляризованных моногармоничных потоков электромагнитных волн в направленный поток Волн де Бройля" от 12.08.014 г.

[3] Х. Мейнке Ф. Гудлах, "Радиотехнический Справочник", Госэнергоиздат, Москва, 1960 г.

[4] Компьютерная программа "MathCAD", MathSoft. Inc., 1999 г.