
Испытание излучения мобильной ушестерённой модели передающей линейной магнитной антенны на пересечённой местности в СДВ диапазоне

Арий Борисович Ляско
Радиоинженер,
кандидат физ.-мат.наук, Ph.D.
E-mail: arie.lyasko@yandex.ru

1. 8 Января 2017 г. состоялось испытание излучения электромагнитной энергии в СДВ диапазоне на пересечённой местности Мобильной Ушестерённой Передающей Линейной Магнитной Антенны (УПЛМА) в реальных условиях Московской Области. УПЛМА [1] для возможности перемещения размещена в стандартном «прицепе». Фото.1. дает представление условий её функционирования в процессе проведения этих испытаний.



Фото.1.

В «прицепе» **УПЛМА** размещена совместно с согласующим трансформатором (СТ) и блоком контроля (БК) величины подаваемого напряжения **Утр.вых.** с его вторичной обмотки и величины тока «возбуждения» **I_a**, протекаемого по контуру последовательного резонанса её антенной цепи, состоящей из индуктивности **L_a** соленоидов «возбуждения» продольного магнитного потока на частоте несущей **f** в каждой из шести ЛМА и резонансных конденсаторов **C₀**, размещённых сверху и между герметичных корпусов верхних трёх моделей **ЛМА** (см. **Фото.2**) [1].

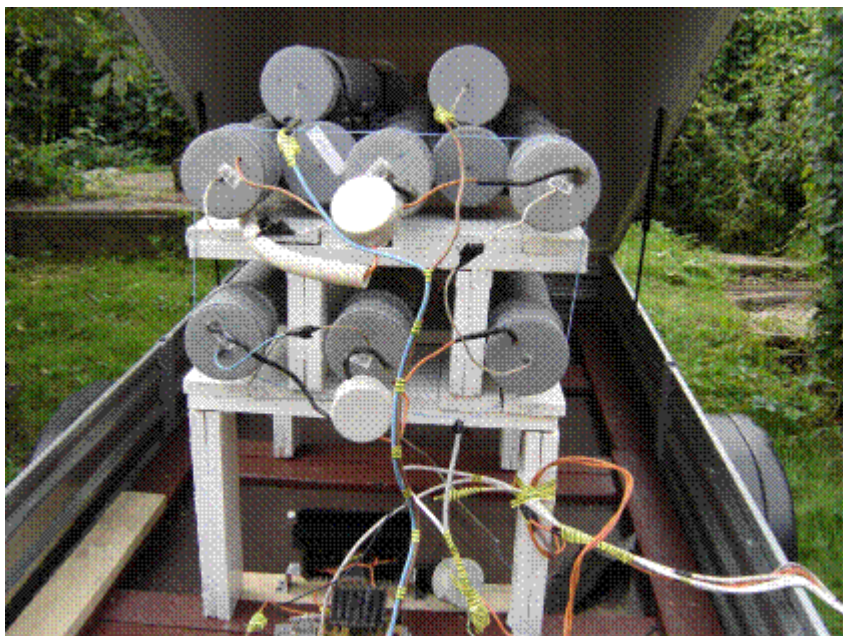


Фото.2.

УПЛМА соединена фидером длиной **25 м** с усилителем мощности (**УМ**) и контрольной аппаратурой, находящейся на расстоянии по прямой порядка **15 м** в лабораторном помещении.



Фото.3.

В верхней части **Фото.3** представлен вид **УМ**, а ниже с лева цифровой Функциональный генератор (**ФГ**) типа **АКИП-3408/1**, с выхода которого подаётся гармонический сигнал с частотой несущей f , равной частоте резонанса f_0 контура тока «возбуждения» **УПЛМА** на вход **УМ**, а правее его — двухканальный аналоговый осциллоскоп для контроля момента совпадения фазы тока возбуждения (I_a) с фазой напряжения (**U тр.вых.**) на выходе вторичной обмотки **СТ**, находящегося рядом с **УПЛМА** в «прицепе». Вид синусоидальных сигналов на экране осциллоскопа соответствует моменту настройки путём изменения выходной частоты f **ФГ** в резонанс с собственной частотой f_0 антенного контура тока «возбуждения» для достижения максимума его амплитуды I_{am} при условии совпадения его фазы с фазой сигнала напряжения **U тр.вых.**.

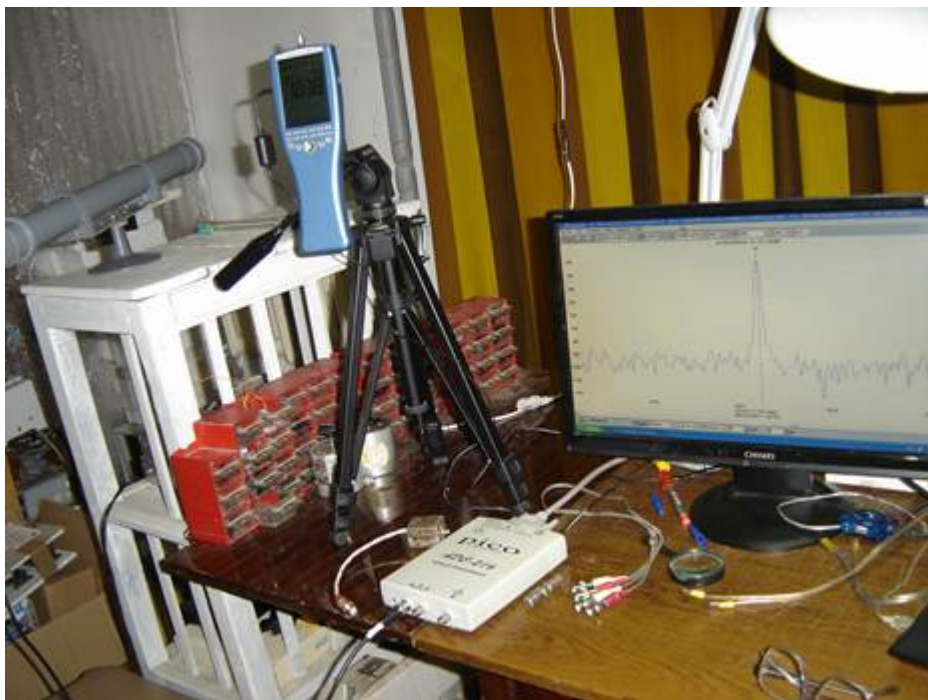


Фото.4.

В момент излучения **УПЛМА** электромагнитных волн в режиме **CW** (без модуляции) на частоте несущей f в пределах отрезка частот **24.2 КГц — 26.7 КГц** в лабораторном помещении в процессе данного испытания автор осуществлял контроль, как величины электрической составляющей напряжённости электромагнитного поля **Е тест** (в единицах **В/м**) с помощью, размещённого на штативе портативного анализатора спектра **АКИП- 4210/3**, представленного на **Фото.4**, так и формы спектра сигнала, зарегистрированного собственноручно автором разработанной и изготовленной пассивной приёмной ферритовой антенной **MAN^о 7**, внешний вид которой в герметичной оболочке представлен на **Фото.4** левее **АКИП- 4210/3**. Выходной сигнал с **MAN^о 7** по длиной в **80 см** экранированному кабелю поступал на один из входов «**Виртуального с 16 бит АКП Двухканального Осциллоскопа — Анализатора спектра**» **Pico ADC- 216**, внешний вид которого представлен на переднем плане **Фото.4**. Кривая полученного изображения спектральной плотности зарегистрированного ими сигнала с помощью специальной программы сохранялась в виде файла памяти **IBM ThinkPad R40e**, а так же представлена как на его, так и на внешнем дисплеи.

2. На Изо.1. представлен план проведения испытаний.



Изо.1.

Начало красной линии в верхней части справа **Изо.1** является местом нахождения «прицепа» с **УПЛМА**. От этой почки зелёная линия указывает на ориентацию продольной его оси, совпадающей с направлением «**Запад — Восток**». В этом направлении ориентированы продольные оси ЛМА в «прицепе».

Сотрудники компании **О.О.О «ЛРЭТ»** (с их деятельностью можно ознакомиться на её сайте www.lret.ru) **Павел Ляско, Елена Дроздова и Алексей Канакин** производили измерение уровня принятого сигнала собственноручно разработанной и изготовленной автором пассивной приёмной ферритовой антенной **MAN^o 2** [2, 3, 4], установленной на специальном кронштейне, изготовленном Павлом Ляско для крепления к багажнику над кабиной своей автомашины, выполняющей роль импровизированной передвижной лаборатории (см. **Фото.6**).

Выходной сигнал **MAN^o 2**, изображённой на **Фото.6**, по 1 м длиной коаксиальному кабелю поступал внутрь салона на вход работающего в режиме селективного вольтметра **Hp 3581 «Wave Analyzer»**.

Фото 5 и Фото. 6 дают представление об реальных «условиях», в которых мои коллеги проводили измерения уровня сигнал, транслируемого **УПЛМА** в окружающее пространство в ряде пунктов местности, указанных на карте **Изо.1**.

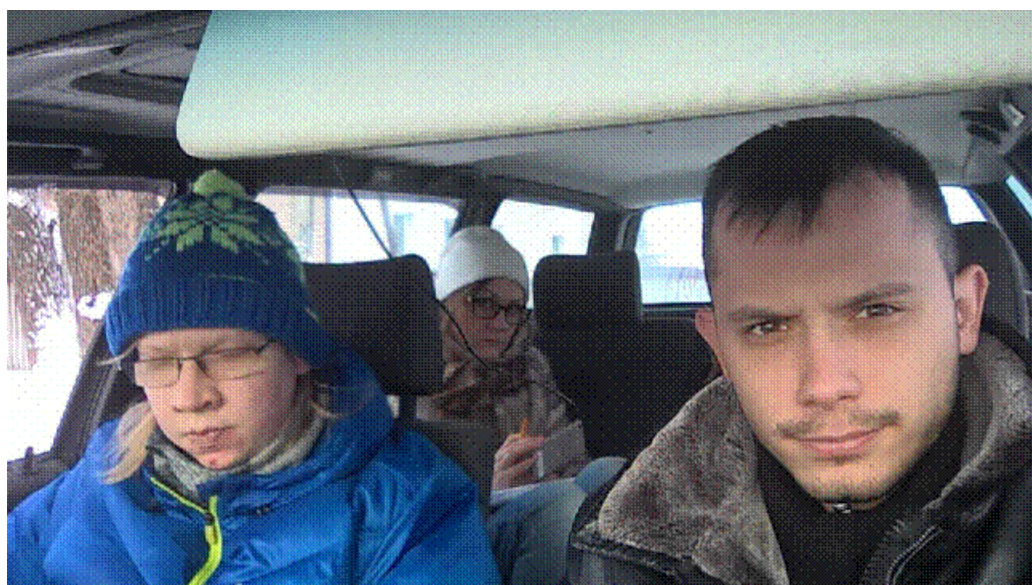


Фото. 5. . На переднем плане слева — Алексей, справа — Павел, а за ними — Елена.



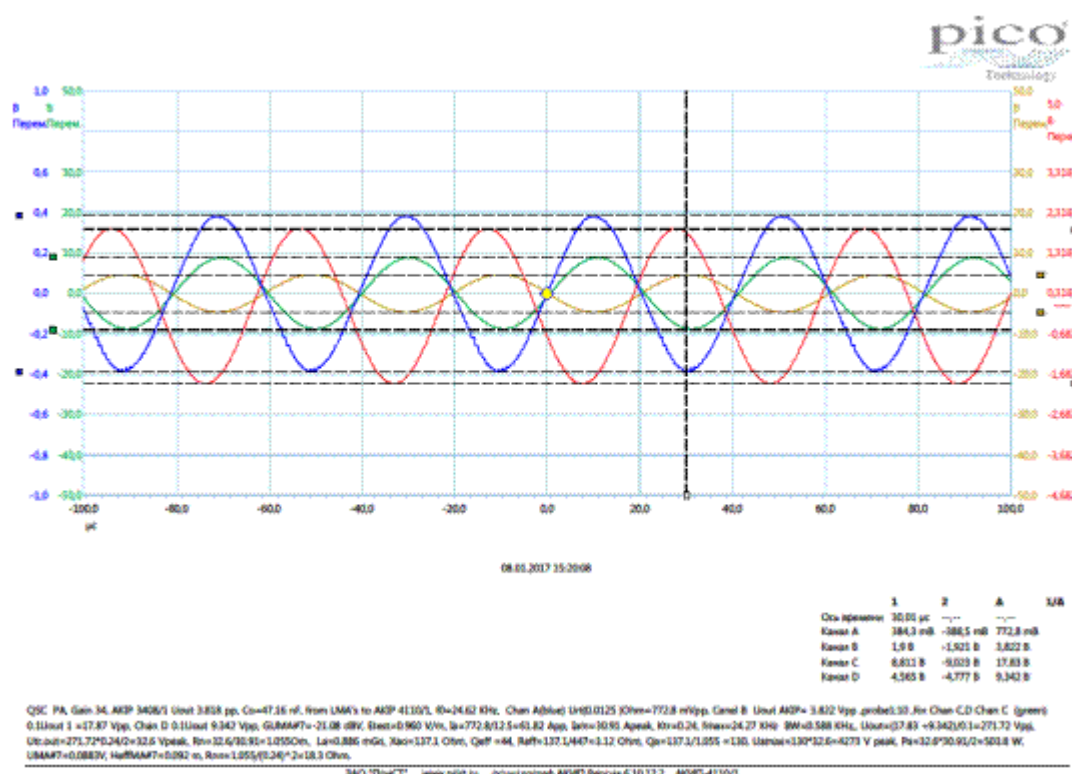
Фото. 6. Положение MAN^{№ 2} над кабиной в п. К-110.

На **Фото.7** — представлен вид передней панели **Нр 3581 «Wave Analyzer»** в момент осуществления отсчёта показаний уровня сигнала, принятого от **MAN^{№ 2} в п.К-110**. **Еленой** осуществляла данные измерения и фотографировала переднюю панель её мобильным телефоном в каждом из пунктов местности, указанных на карте **Изо.1** как документальное подтверждение произведённого измерения в конкретном пункте пересечённой местности. В то время **Алексей** регистрировал на ноутбуке с помощью специальной программы для **Виртуального с 16 бит АКП Двухканального Осциллоскопа — Анализатора спектра АКИП4110/4**, спектральную плотность сигнала с «реставрационного» выхода **Нр 3581 «Wave Analyzer** в момент осуществления **Еленой** отсчёта на его аналоговом и цифровом индикаторах, как это можно видеть на **Фото.7** для п. **К-110**. Связь по мобильному телефону с автором осуществлял **Павел** с целью синхронизации процесса измерений.

Нр 3581 «Wave Analyzer», завёрнутый в одеяло для предупреждения возможности его охлаждения (это очень дорогой лабораторный прибор, имеющий так же возможность питания от внутренних аккумуляторов, но допускающий работу от **10 до 50 гр.Цельсия**) **Елене** пришлось держать на руках в момент каждого измерения.



Фото.7. Показания в п. К-110.



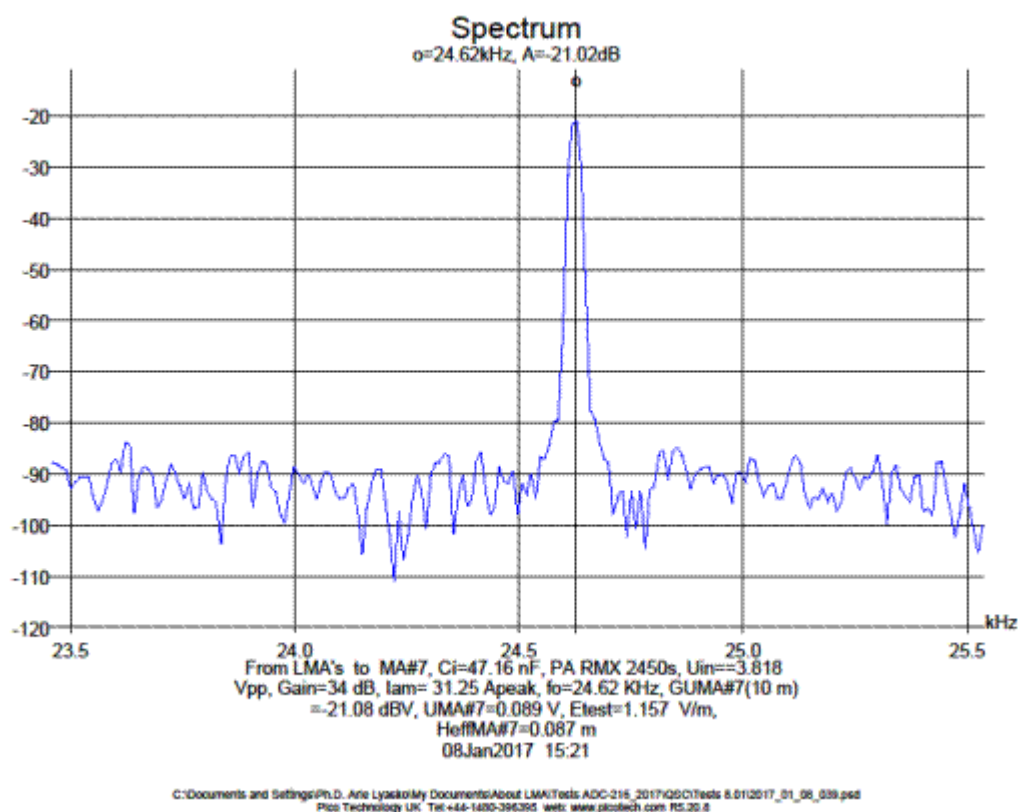
Изо.2.

3. Данный тест проводился с 13:00 до 16:00. В момент трансляции УПЛМА в эфир в течение всего этого времени в лаборатории с использованием **Виртуального 4-х канального 12 бит АКП Осциллоскопа- Анализатора спектра АКИП — 4110/1** автором осуществлялся непрерывный мониторинг формы гармонических сигналов на частоте несущей f совпадающей с собственной частотой f_0 резонанса антенного контура тока «возбуждения»:

а) выходного напряжения УМ **U вых.** обеих его каналов, соединённых по «Мостовой схеме»,

нагруженных с помощью фидера первичной обмоткой согласующего трансформатора **СТ**, находящегося в «прицепе» (см. **Фото.2**), **б**) напряжения на выходе **ФГ** (см. **Фото.3**) и **в**) напряжения, пропорционального величине тока **Ia** «возбуждения», снятого с описанного ранее калиброванного сопротивления **0.0125 Ом**, находящегося в **БК**. Эти данные периодически записывались в виде файлов на диск компьютера, имеющего через **USB** соединение с **АКИП — 4110/1**. В качестве примера в **Изо.2** приводится запись форма этих сигналов с помощью **АКИП — 4110/1** в момент измерения в п. **Р-1000**. В Примечании нижней части помещены основные рассчитанные параметры режима работы УМ, показание уровня принятого сигнала **MAN[№] 7** измерителем **Pico ADC- 216** и показание величины напряжённости электрического поля **E(15 м)**, зафиксированное в лаборатории измерителем **АКИП- 4210/3** на дистанции **15 м** от места расположения по прямой **УПЛМА**. А на **Изо. 3** представлен график спектральной плотности в данный момент времени сигнала, излученного **УПЛМА** в эфир, и принятого в лаборатории **MAN[№] 7**, находящейся рядом с прибором

АКИП- 4210/3 (см.Фото.2) .



Изо.3.

На **Фото. 8** представлено изображение передней панели **Hp3581 «Wave Analyzer»** в момент регистрации антенной **MAN[№] 2** сигнала, излученное **УПЛМА**, на расстоянии **1000 м** в п. **Р 1000** от места расположения «прицепа», указанного на карте **Изо.1** при следующих положениях органов настройки **Hp3581 «Wave Analyzer»**:

а) Разрешающая способность **RBW=3 Гц**, определяемая указателем первого многопозиционного переключателя, расположенного левее его электродинамического прибора ЭДП.

б) с помощью «ручки» «точной настройки» сдвоенного потенциометра, расположенного в правом верхнем углу **3581 «Wave Analyzer»** максимум сигнала был достигнут на частоте **24620 Гц** ; **в)** Строенный кнопочный переключатель, расположенный в левом нижнем углу находится

в положении «Линейная шкала» (нижняя шкала на ЭП используется для отсчёта в пределах «0 — 1 » или «0 — 3»);

г) Многопозиционный переключатель (первый в нижнем ряду) "Реф. Ур. Ампл" — в положении, обозначенный чёрным шрифтом «- 60 дБВ», или -синим цветом «x 0.001 », а справа от него — многопозиционный переключатель «Чувствительность» — в положении, обозначенным чёрным цветом «- 30 дБВ» или — обозначенный синим цветом «30 мВ».



Фото.8.

Это значит, что нужно воспользоваться **нижней линейной шкалой «0 — 3» с учётом множителя 30 мкВ.**

Так как стрелка ЭДП находится в положении 0.3, это означает, что был зарегистрирован

Вообще говоря, **Hp3581 «Wave Analyzer»** обладает чувствительностью (эффективного значения напряжения, зарегистрированного им сигнала) в диапазоне частот от КГц с разрешающей способностью

В процессе данных измерений многопозиционный переключатель « », находящийся слева первым в верхнем правом ряду передней панели всегда был в положении «3 Гц»,

Как можно видеть, на цифровом индикаторе высвечено значение несущей частоты принятого сигнала **24620 Гц**. Было в лаборатории установлено с помощью **АКИП- 4210/3**, что **НэффМАН^{№ 2} = 0.072 м**. Поэтому амплитудное значение электрической составляющей напряжённости электромагнитного поля (с учётом расположения п. Р-1000 под углом порядка 25 гр относительно ориентации оси «прицепа») равно $E(1000м) = 1.41 * 3мкВ * (Cos 25)^2 / 0.072м =$.., тогда как на расстоянии **15 м** от места расположения **УПЛМА** (по прямой) в лаборатории **E(15 м)=0.960 В/м**.

«Действующая высот» (см. текст в нижней части **Изо.2**). При этом выходное напряжение антенны **MAN^o 7 UMAN^o 7= 90 мВ**, амплитудном значении тока «возбуждения» **I_{ам} = 30.91 А**, и подведённая к **УПЛМА** (с учётом потерь в **25 метровом фидере**, в согласующем трансформаторе **СТ** и в калиброванном сопротивлении **0.0125 Ом**, размещённое в **БК**)

мощность **Pa=503.8 Ватт**.

4. Интерес составляет сопоставление полученного в результате этого теста полученного значения напряжённости поля в пункте Р-1000 с ожидаемыми значениями аналогичных параметров, полученных автором теоретическим путём с использованием формул расчёта , как типичного представителя (МДГ) в им опубликованных в «**Научном Евразийском журнале**» во второй половины 2016 года [2,3,4,5,6,7].

Ниже прилагается копия файла расчёта основных характеристик **УПЛМА**, полученных по упомянутым формулам с помощью компьютерной программы [7] : её стр1 изложена в **Изо.4**, стр.2 — в **Изо.5**, стр. 3 в — **Изо.6**.

```

mu0:=4*pi*10^-7*henry (1-1)   dc:=0.068 m   N:=184           fl:=24620 Hz
  Lot:=0.0233*10^-3*henry      (1-2)         Lot=2.33*10^-5  henry   mu0fl:=38
  Lal:=mu0fl*Lot      (1-4)   Lal=8.854*10^-4  henry   (1-5)
im:=sqrt(1-lm)   lm:=1 m      D:=1000 m          so=8.854187817*10^-12*fracrad
pi=3.142   e=2.718   e^i=-0.54+0.841i   e^-i=-0.54-0.841i
mu0:=4*pi*10^-7*fracrad
mu=-1.257*10^-6*fracrad   so=-8.854*10^-12*fracrad   muo=-1.257*10^-6*em^-1*henry
s:=sr-so   co:=frac(1,sqrt(muo*co))   co=2.998*10^8*em*s^-1   sr:=1
co=2.998*10^8*em*s^-1   cr:=co*sqrt(mu)   lambda1:=frac(co,fl)   cr=2.998*10^8*em*s^-1
lambda1=1.218*10^4*em   so:=2*frac(pi,lambda1)   so=5.16*10^-4*em^-1   psi1:=2*D*frac(pi,lambda1)
psi1=0.516   lambda1:=frac(cr,fl)   lambda1=1.218*10^4*em   cr1:=2*frac(pi,lambda1)
psi1:=2*D*frac(pi,lambda1)   psi1=0.516   Wo:=sqrt(muo)   Wo=376.73*ohm   Wl:=sqrt(mu)
Wl=376.73*ohm   N=184
mHq:=lm*lm*frac(lm,(D^2+i*lambda^-1*D^1))*e^-i*alpha*D*cos(theta)
mHq:=lm*lm*frac(lambda,(4*pi*Wo))*(i*D^3+lambda^-1*D^2+lambda^-2*D^1)*e^-i*alpha*D*cos(theta)
mHp:=lm*lm*frac(lambda,(4*pi*Wo))*(i*D^3+lambda^-2*D^1)*e^-i*alpha*D*sin(theta)   Im:=30.91 A   Qo1:=130
BW1:=frac(fl,Qo1)   BW1=189.385 Hz   col:=2*pi*fl   col=6.283*efl   fl=2.462*10^4 Hz
N=184           mu0fl=38   Qo1:=i*132.4
Lal(dc,lc,N):=Lot
Ll(dc,lc,N):=Lal(dc,lc,N)   Ls(dc,lc,N):=Lal(dc,lc,N)   lc:=1.5

```

Изо.4

$$\begin{aligned}
Xal(dc,lc,N,\omega) &:= i \cdot \omega \cdot Lal(dc,lc,N) & Xal(dc,lc,N,\omega) &= 136.964i \cdot \text{ohm} \\
Uaml(dc,lc,N) &:= Ism \cdot Xal(dc,lc,N,\omega) & Uaml(dc,lc,N) &= 4.234 \cdot 10^3 i \cdot \text{V} & Rn &:= \frac{Xal(dc,lc,N,\omega)}{Qal} \\
|Xal(dc,lc,N,\omega)| &= 136.964 \cdot \text{ohm} & Coa &:= \frac{-1}{Xal(dc,lc,N,\omega) \cdot \omega \cdot i} & Coa &= 4.72 \cdot 10^{-8} \cdot \text{farad} \\
mE_{\psi} &:= Im \cdot \frac{lm}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^{-2} + i \cdot \lambda^{-1} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \alpha \cdot D} \cdot \cos(\theta) & \lambda o1 &= 1.218 \cdot 10^4 \cdot \text{vm} & Rn &= 1.034 \cdot \text{ohm} \\
mH_{\theta} &:= Im \cdot lm \cdot \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-i \cdot D^{-3} + \lambda^{-1} \cdot D^{-2} + \lambda^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \alpha \cdot D} \cdot \cos(\theta) & Lo(dc,lc,N) &= 2.33 \cdot 10^{-5} \cdot \text{henry} \\
mH_{\rho} &:= Im \cdot lm \cdot \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-i \cdot D^{-3} + \lambda^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \alpha \cdot D} \cdot \sin(\theta) & \theta &:= 0 & J &:= 1 & D &= 1 \cdot 10^3 \cdot \text{vm} \\
Eal(dc,lc,N) &:= \frac{Uaml(dc,lc,N)}{\pi \cdot dc \cdot N} & Eal(dc,lc,N) &= 107.704i \cdot \frac{V}{m} \\
\left[\frac{lm}{4 \cdot \pi} \cdot (dc^{-2} + i \cdot \lambda o1^{-1} \cdot dc^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \alpha o dc} \cdot \cos(\theta) \right] &= 17.21 - 5.077 \cdot 10^{-4} i \cdot \text{vm}^{-1} \\
Jal &:= \frac{Eal(dc,lc,N)}{\left[J \cdot \frac{lm}{(4 \cdot \pi)} \cdot (dc^{-2} + i \cdot \lambda o1^{-1} \cdot dc^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \alpha o dc} \cdot \cos(\theta) \right]} & Jal &= -1.846 \cdot 10^{-4} + 6.258i \cdot \text{V} \\
|Jal| &= 6.258 \cdot \text{V} & \theta &= 0 & v1 &:= \frac{|Jal|}{Ism} & v1 &= 0.202 \cdot \text{ohm} \\
&&&&&&&&& \omega o &= 5.16 \cdot 10^{-4} \cdot \text{vm}^{-1} \\
e^{-i \cdot \alpha o D} &= 0.87 - 0.493i & \cos(\theta) &= 1 \\
mE\phi_1(D,lm,\lambda o1,\omega o,\theta) &:= Jal \cdot \frac{lm}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^{-2} + i \cdot \lambda o1^{-1} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \alpha o D} \cdot \cos(\theta) \\
mE\phi_1(D,lm,\lambda o1,\omega o,\theta) &= 2.101 \cdot 10^{-7} + 4.534 \cdot 10^{-7} i & |mE\phi_1(D,lm,\lambda o1,\omega o,\theta)| &= 4.997 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{V}{m} \\
\text{For MA\#2} & & Heff1 &:= 0.072 \cdot m \\
U11outMA2 &:= Heff1 \cdot |mE\phi_1(D,lm,\lambda o1,\omega o,\theta)| & D &= 1 \cdot 10^3 \cdot \text{vm} \\
U11outMA2 &= 3.598 \cdot 10^{-8} \cdot \text{V} & Im &:= Jal \\
mH\theta_1(D,\lambda o1,\omega o,Jal,lm,W_0,\theta) &:= \left\{ Jal \cdot lm \cdot \frac{\lambda o1}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \right\} \cdot [-i \cdot D^{-3} + \lambda o1^{-1} \cdot D^{-2} + (\lambda o1)^{-2} \cdot D^{-1}] \cdot e^{-i \cdot \alpha o D} \cdot \cos(\theta) \\
mH\theta_1(D,\lambda o1,\omega o,Jal,lm,W_0,\theta) &= 1.471 \cdot 10^{-8} - 6.698 \cdot 10^{-9} i \cdot \text{vm}^{-1} \cdot A
\end{aligned}$$

Изо.5.

$$\begin{aligned}
& |mH01(D, \lambda01, \omega0, J01, Im, W0, \theta)| = 1.616 \cdot 10^{-8} \cdot m^{-1} \cdot A \\
& U12outMA2 := W0 \cdot Heffl \cdot |mH01(D, \lambda01, \omega0, J01, Im, W0, \theta)| \quad U12outMA2 = 4.383 \cdot 10^{-7} \cdot V \\
& mH01(J01, Im, \lambda01, \omega0) := J01 \cdot Im \cdot \frac{\lambda01}{4 \cdot \pi \cdot W0} \cdot (-i \cdot D^{-3} + \lambda01^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \omega0 \cdot D} \cdot \sin(\theta) \quad Imm = 30.91 \cdot A \\
& |J01| = 6.258 \cdot V \\
& mH01(J01, Im, \lambda01, \omega0) = 0 \cdot m^{-1} \cdot A \quad U\sigma1outMA2 := \sqrt{(|U11outMA2|)^2 + (|U12outMA2|)^2} \\
& U\sigma1outMA2 = 4.398 \cdot 10^{-7} \cdot E := \frac{U\sigma1outMA2}{Heffl} \quad \frac{\lambda01}{2 \cdot \pi} = 1.938 \cdot 10^3 \cdot m \cdot E = 6.109 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V}{m} \\
& Ktr1 := 0.24 \quad Rn = 1.034 \cdot ohm \quad Ktr1 = 0.24 \\
& Psum := Iam^2 \cdot \frac{Rn}{2} \quad Esum := E \quad Esum = 6.109 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V}{m} \quad Rnn := \frac{Rn}{Ktr1^2} \\
& UoutMA2 := Esum \cdot Heffl \quad UoutMA2 = 4.398 \cdot 10^{-7} \cdot V \quad Psum = 494.183 \cdot watt \\
& Rnn = 17.96 \cdot ohm
\end{aligned}$$

Изо.6

Основные параметры для расчёта были взяты из данных текста в нижней части **Изо.2**.

На основании информации, изложенной в тексте **Изо.6** видим, что амплитудное значение напряжение на выходе MAN[№] 2 на дистанции 1000 м составило величину

[1,2]. Поскольку автор рассматривал вывод таких выражений для модели ЛМА в качестве первого приближения лишь как типичную представительницу Элементарного МДГ.

5. Из курса Радиотехники принято было ВУЗ СССР считать, что передатчик обладает мощностью излучения моно гармонического сигнала $P_{\text{рад}} = 1000$ Ватт, если на расстоянии в 1000 метров он создаёт напряжённость электрического поля $E = 300$ мВ/м. Поскольку при данных измерениях напряжённость электрического поля в п. Р-1000 имеет значение

УПЛМА

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.