

# Об особенности испытания одно и много модульных моделей ЛМА для СДВ диапазона электромагнитных волн

**Арий Борисович Ляско**

Радиоинженер, канд. физ. - мат. наук, Ph.D.

E-mail: [lyasko.ariy@mail.ru](mailto:lyasko.ariy@mail.ru)

1. Конструктивные особенности Передающих Линейных Магнитных Антенн (ЛМА) автором изложены подробно в работе [1]. Подробное изложение принципа их функционирования автором приведено в статьях [2, 3].

2. Практическое применение ЛМА может быть осуществлено либо в виде одно- или в много модульном варианте, как это описано в статьях [4, 5, 6, 7, 8] при описании «шести-модульной» модели, или одномодульной модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1.

На Фото.1 представлен в качестве примера, вид модели ЛМАН<sup>№</sup> 11 без внешнего герметичного кожуха, входящего в состав «шестимодульной» модели (см. Фото.2.), ранее упомянутой в статье [4].



Фото.1 Модель ЛМАН<sup>№</sup> 11.



Фото.2. «Шестимодульная» модель в составе моделей: ЛМАН<sup>№</sup> 11, 12, 13, 14, 15 и 16 в герметичных кожухах.

Как показано на Фото.1 на цилиндрическом диэлектрическом каркасе, плотно надетом на цилиндрическое тело магнитопровода по всей его длине, в его центральной части размещён соленоид обмотки тока  $I_a$  «возбуждения» продольного моно гармоничного магнитного потока

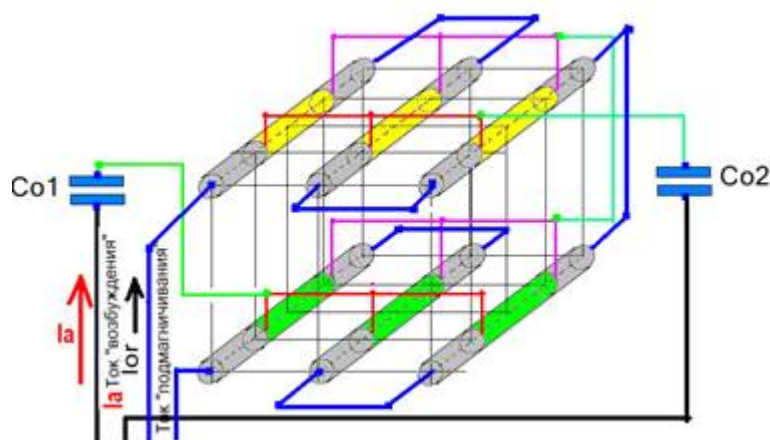
на несущей частоте  $f$ , состоящая из  $N$  витков плоского кабеля как правило, двух жильного, с заданной величиной сечения его проводников. Цилиндрической формы ферритовый магнитопровод обладает вдоль центральной продольной оси цилиндрической формы каналом, через который прокладывается кабель питания постоянного тока «подмагничивания»  $I_{ог}$ , создающего постоянный круговой магнитный поток в теле магнитопровода в перпендикулярной его продольной оси («поперечной») плоскости. Ферритовый материал магнитопровода обладает заданными характеристиками, такими как магнитная проницаемость  $\mu$ , Коэрцитивная сила  $H_c$ , Индуктивность насыщения  $B_s$ , и пр. По этому существование величины  $B_s$  накладывает ограничение в ряде случаев на возможность использования одно модульной модели ЛМА.

3. При рассмотрении возможных вариантов построения многомодульных моделей Передающих ЛМА в качестве примера, рассмотрим «шестимодульную» модель ЛМА, представленной на Фото.2.

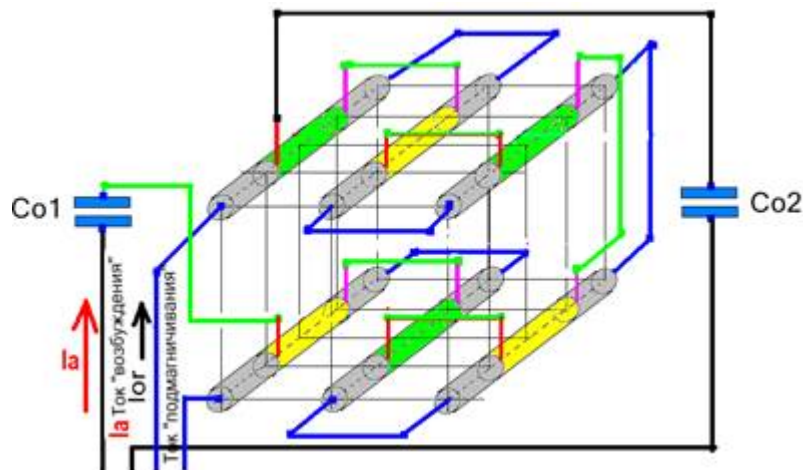
Итак она состоит из 6 моделей ЛМА, обмотка соленоида тока  $I_a$  «возбуждения» выполнена плоским двух жильным проводом. В силу векторного характера напряжённости  $H_a$

продольного магнитного поля тока  $I_a$  «возбуждения» от направления (левосторонней или правосторонней) намотки, при организации соединения обмоток тока «возбуждения» «ушестерённой» модели могут применяться различные варианты использования

моделей ЛМА с различным способом намотки: по часовой и против часовой направленности. Для простоты на Фиг.1 и Фиг.2 показана два различных способа соединения обмоток «возбуждения» используемого в мобильном исполнении «ушестерённой модели», представленной на Фото.2.



Фиг.1 Параллельно — последовательное соединение обмоток «возбуждения» и последовательное соединение обмоток «подмагничивания».



Фиг.2. Последовательное соединение обмоток «возбуждения» и обмоток «подмагничивания».

На Фиг. 1 и Фиг.2 разным цветом обозначены соленоиды «возбуждения» с различным направлением намотки при сохранении одинакового расположения начала (конца) намотки. Вариант Фиг. 1 использован в мобильной «ушестерённой модели» Фото.2 для излучения на частотах в диапазоне 24 КГц — 26 КГц при значении величины резонансно-го конденсатора  $C_0 = 47.16$  Нано Фарад.

Вариант Фиг.2 для использования тех же моделей соответственно с другими значениями величины конденсатора  $C_0$  для диапазона частот 12 КГц — 7 КГц.

Следует иметь в виду, что соленоиды «возбуждения» каждой из моделей, обмотки которых выполнены плоским двух проводным кабелем заданного сечения их проводов, образуют как бы два соосно расположенных соленоида, обмотки которых возможно согласованно последовательно или параллельно соединять. Именно параллельное соединение проводов обмоток «возбуждения» каждой из ЛМА использовано в варианте исполнения «ушестерённой модели», представленной на Фото.2».

4. На Фото. 5, 6, 7 представлены составные части «испытательного стенда» для теста «ушестерённой модели», размещённой в «прицепе» (см Фото.3) и одиночной модели ЛМАН<sup>®</sup> 20м1 (см. Фото.4), размещённых вне лабораторного помещения в реальных условиях.



Фото.3 Вид мобильной передающей «ушестерённой модели» ЛМА.



Фото.4. Вид передающей модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1.

Длина фидера питания «ушестерённой модели» Фото.3 порядка 25 м, тогда как длина фидера питания модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 составляет 14 м.



Фото.5.



Фото.6.

На Фото. 5 вверху расположен УМ№ 1 типа RMX 2450s для подачи тока «возбуждения»



Фото.7.

на «ушестерённую модель» ЛМА (см.Фото.3). Ниже на полке слева функциональный генератор (ФГ) типа АКІП 3408/1, обеспечивающий подачу на вход УМ синусоидального сигнала требуемой величины  $U_{in}$  с несущей частотой  $f$ . Справа от него размещён аналого-звуковой двухканальный осциллоскоп.

В самом низу слева размещён УМ № 2 типа RMX 2450s для подачи тока «возбуждения» на модель ЛМАН № 20м1 (см.Фото.4). С права от него размещён электродинамический Амперметр

(постоянного тока "подмагничивания" (ЭДА) для упомянутых выше моделей ЛМА. Левее ЭДА на УМ№ 2 расположен собственноручно разработанный и изготовленный Регулятор постоянного тока «подмагничивания» (РПТП) для моделей ЛМА. РПТП позволяет плавно вручную установить для модели ЛМА нужное значение тока «подмагничивания»  $I_{or}$  по показаниям ЭДА в пределах от 0 А до 10 А. Левее РПТП расположена Пластиковая Измерительная коробка (ПИК) для мониторинга спектральной плотности и величины напряжения  $U_{rt}(R_t=0.05 \text{ Ом})$ , пропорционального величине тока «возбуждения»  $I_a$  и напряжения  $U_{tr.out}$  на выходе согласующего трансформатора (СТ) модели ЛМАН° 20м1.

На Фото.6 в правом верхнем углу на ФГ расположен синего цвета корпус Виртуального четырёх канального 12 бит АКП Осциллоскопа — Спектра Анализатора АКИП 4110/1. При тесте «ушестерённой модели» ЛМА осуществляется с помощью ноутбука мониторинг величины входного напряжения  $U_{in}$ . УМ№ 1, величины напряжения  $U_{rt}(R_t=0.0125 \text{ Ом})$ , пропорционального величине тока «возбуждения»  $I_a$ , и напряжений  $U_{out1}$  и  $U_{out2}$  на выходе каждого из двух его каналов. При тесте модели ЛМАН° 20м1 виртуальный измеритель АКИП 4110/1 и этот ноутбук позволяют осуществлять мониторинг величины напряжения  $U_{rt}(R_t=0.05 \text{ Ом})$ , пропорционального величине тока «возбуждения»  $I_a$ , напряжения  $U_{tr.out}$  на выходе согласующего трансформатора (СТ) модели ЛМАН° 20м1 и напряжений  $U_{out1}$  и  $U_{out2}$  на выходе каждого из двух каналов УМ№ 2.

На Фото.7 на штативе размещён Портативный Анализатор Спектра типа АКИП-4210/3 для измерения электрической  $E$  или магнитной  $H$  составляющей электромагнитного поля (ЭМП). Он имеет встроенную, расположенную горизонтально параллельно нижней кромки его дисплея для измерения  $E$  электрического типа диполь, а так же для измерения  $H$  имеет микро трёхмерную приёмную магнитного типа систему рамочных антенн:  $H_x$  -составляющая направлена параллельно нижней кромке его дисплея,  $H_y$  -составляющая направлена параллельно боковой кромке его дисплея, а  $H_z$  -составляющая направлена перпендикулярно плоскости его дисплея.

Правее АКИП-4210/3 находится собственноручно разработанная и изготовленная автором модель приёмной пассивной ферритовой антенны типа МАН° 2 для регистрации электромагнитных сигналов (ЭМС) в пределах частот 20 КГц — 80 КГц. В самом верху Фото.6 можно видеть нижнюю кромку приёмной пассивной Рамочной квадратной антенны ЛАН° 2 для регистрации ЭМС того же диапазона частот (длина стороны которой равна 50 см и обмотка её содержит 25 витков). На измерителе Нр 3581А «Wave Analyzer» можно видеть синего цвета корпус Виртуального двухканального канального 16 бит АКП Осциллоскопа — Спектра Анализатора АКИП 4110/4, который используется для мониторинга спектральной плотности и величины уровня ЭМС, регистрируемых упомянутыми пассивными приёмными антеннами.

5. Порядок проведения первичного подготовительного этапа теста модели передающих ЛМА, подобных ЛМАН° 11, 12, 13, 14, 15, 16 и 20м1.

Рассмотрим предварительные этапы подобного теста на примере подготовки к тесту модели ЛМАН° 20м1. Так как магнитопровод цилиндрической формы каждой из моделей ЛМА состоит из деталей ферритового материала, как это можно видеть на Фото.8, то для силовых магнитных линий продольного магнитного потока он является «разомкнутым», по этому очень важно определить его относительную величину магнитной проницаемости  $\mu$  эфф. для такого «разомкнутого» магнитопровода.



Фото.8.

Для чего требуется сначала определить основные электрические параметры обмотки соленоида «возбуждения», размещённой в средней части диэлектрического каркаса данной модели ЛМА с помощью «L — C — R моста», например, такого типа, вид

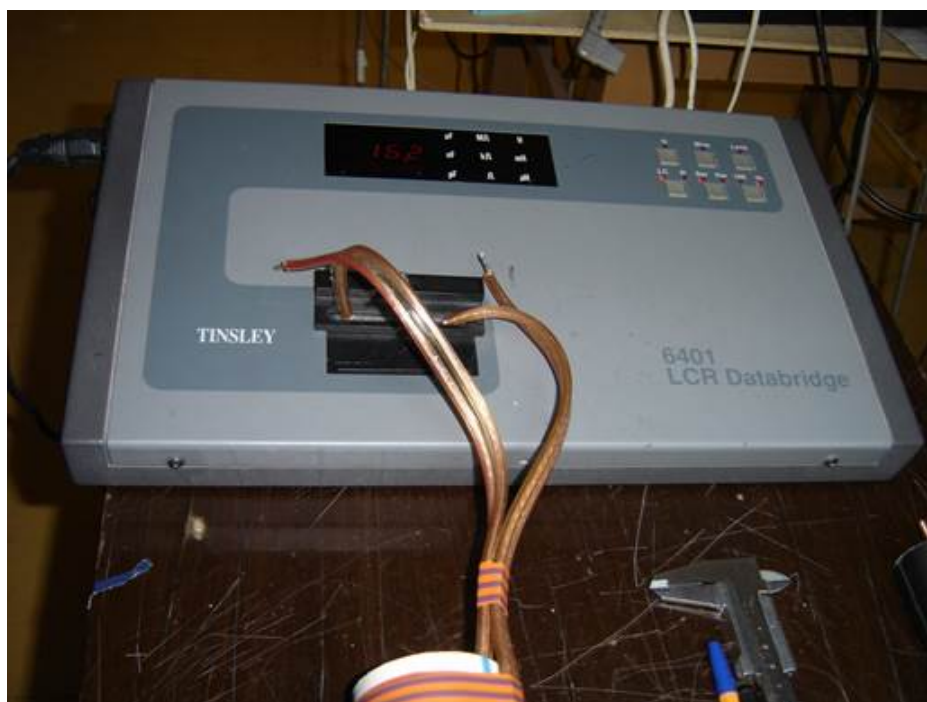


Фото.9.

которого представлен на Фото.9 в момент измерения основных электрических характеристик соленоида тока «возбуждения» продольного магнитного поля, находящегося на диэлектрическом каркасе модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1, внутри которого отсутствует магнитопровод.

В Таблицу № 1 сведены измеренные на частоте 1 КГц с помощью данного "L — C — R моста" основные параметры обмотки «возбуждения» в отсутствии и присутствии внутри него магнитопровода, а также электрические характеристики обмотки «подмагничивания». На Фото.10

момент измерения параметров обмотки «подмагничивания», когда модель ЛМАН<sup>№</sup> 20м находилась в собранном без внешней герметичной оболочке виде.



Фото.10. Измерение параметров обмотки «подмагничивания» модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1.  
Внешний вид в герметичной оболочке собственноручно разработанной и изготовленной автором модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 представлен на Фото.11.



Фото.11.  
Таблица 1.

|               |        |             |               |        |             |
|---------------|--------|-------------|---------------|--------|-------------|
| Индуктивность | Потери | Добротность | Индуктивность | Потери | Добротность |
|               |        |             |               |        |             |

|               |             |         |               |             |         |
|---------------|-------------|---------|---------------|-------------|---------|
| L1o=34.8 мкГн | r =0.102 Ом | Q=3.048 | Lo2=35.6 мкГн | r=0.102     | Q=2.197 |
| L1a=1.513 мГн | r =0.15 Ом  | Q=63.8  | L2a=1.513 мГн | r =0.15 Ом  | Q=63.8  |
| La=6.048 мГн  | r =0.431 Ом | Q=90.4  | Lp=0.479 мГн  | r =0.274 Ом | Q=10.75 |

Где L1o и L2o индуктивность, образованная каждой из жил обмотки соленоида «возбуждения» в отсутствии магнитопровода, а L1a и L2a — в присутствии магнитопровода. La — индуктивность соленоида «возбуждения» при согласованном последовательном соединении образованных обмоток каждой из двух его жил. Lp — индуктивность обмотки «подмагничивания».

5.1. Определяется предполагаемое значение резонансных конденсаторов Co1 и Co2 цепи последовательного резонанса тока «возбуждения» (см. Фиг.1) для значения вблизи требуемой частоты несущей f. При параллельном соединении обмоток жил соленоида «возбуждения»

$$Co1 = Co2 = 2(4\pi^2 f^2 \frac{L1aL2a}{L1a + L2a})^{-1}$$
, таким образом величина резонансной ёмкости C последовательного резонанса в два раза меньше значения Co1 или Co2. Для частоты fo = 49.5 КГц C=6.833 нФ.

5.2. а) Определяем предполагаемые параметры согласующего трансформатора (СТ).

Возможное сопротивление нагрузки Rnn УМ типа RMX 2450s при работе в режиме соединения выходов его двух каналов по «мостовой схеме» находится в пределах от 4 Ом до 8 Ом (допускается использование нагрузки 16 Ом).

Полагаем, что «балансный выход» УМ данного типа обладает Rnn=8 Ом.

б) Определяем ожидаемое значение активного сопротивления потерь собственно антенного Модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 (последовательного резонанса) контура тока «возбуждения» для частоты f = 49.5 КГц. Тангенс угла потерь используемых конденсаторов Co1 и Co2 не хуже 5\*10<sup>-4</sup>. Так как C = 6.833 нФ, то его реактивное сопротивление XC = 1/2π f C = 471 Ом, поэтому сопротивление потерь в резонансных конденсаторах составит величину rc=0.24 Ом. Поскольку измеренное значение добротности обмотки соленоида «возбуждения» на частоте 1 КГц равно 63.8 можем предположить, что на частоте 49.5 КГц её величина будет меньше. Можем предположить, что Q=40, поэтому rL=471/40=11.8 Ом. Потери в 14 м фидере с сечением его проводников 2.5 кв. мм могут составить величину порядка 2.5 Ом, поэтому общие активные потери rn порядка 14.54 Ом.

в) Определим коэффициент трансформации СТ. Kтр=( rn/ Rnn)0.5 =1.35

г) Определим величину индуктивности L1tr первичной обмотки требуемого повышающего согласующего трансформатора для резонансной цепи контура тока "возбуждения.

L1tr=10 Rnn/2π f =0.462 мГн, тогда как индуктивность L2tr вторичной обмотки СТ определяется по формуле L2tr =L1tr Kтр2=0.842 мГн.

Следует отметить, что собственноручно изготовлены автором резонансные конденсаторы Co1 и Co2 обладают электрическими характеристиками, приведённые в Таблице № 2 при этом C= 6.144 нФ. Там же приведены характеристики изготовленного автором согласующего трансформатора с применением Ферритового сердечника типа PM87\*70.

Таблица 2

|  |
|--|
|  |
|--|

|                                                                         |                                                          |                                                                    |                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><math>C_{01} = C_{02}</math><br/><math>= 12.29 \text{ нФ}</math></b> | <b>Амплитуда<br/>протекающего тока<br/>не более 16 А</b> | <b>Допустимое<br/>переменное<br/>напряжение не более<br/>8 КВ.</b> | <b><math>C_{01}</math> и <math>C_{02}</math> помещены в две<br/>герметичные оболочки диаметром<br/>5 см и длиной 20 см.</b> |
| <b><math>L_{1tr}</math></b>                                             | <b>0.719 мГн</b>                                         | <b><math>L_{2tr}</math></b>                                        | <b>0.922 мГн</b>                                                                                                            |

6. Целью настоящей работы и является определение истинные характеристик резонанс-ной цепи "тока возбуждения«и допустимой величины подводимой мощности по 14 м фи-деру к одиночной модели ЛМАН<sup>®</sup> 20м1 на частоте несущей порядка 49,5 КГц когда она вместе с резонансными конденсаторами находится вне лабораторного помещения (см. Фото.4.) на расстоянии порядка 10 м в реальных условиях Зимы в Московской области. Ниже приведены Фото и графики. относящиеся к процессу собственно проделанного те-ста модели ЛМАН<sup>®</sup> 20м1, обсуждаемого далее.



Фото.12.



Фото.13.



Фото.14.

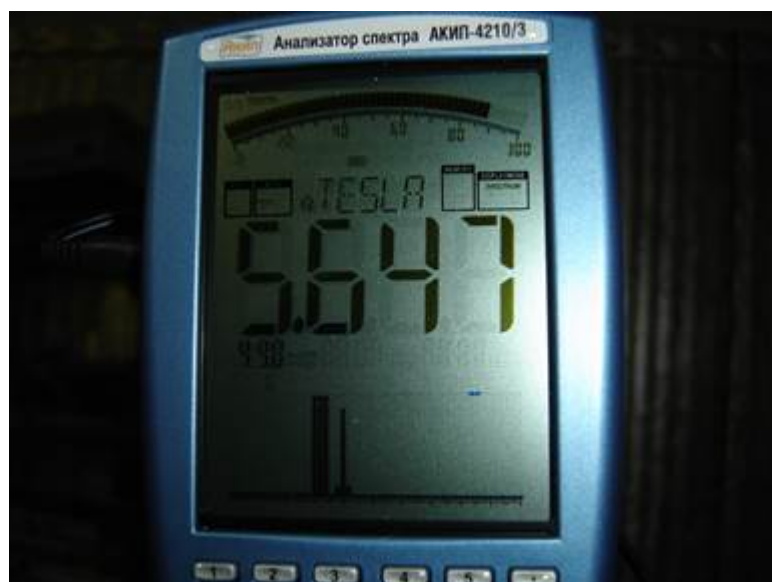
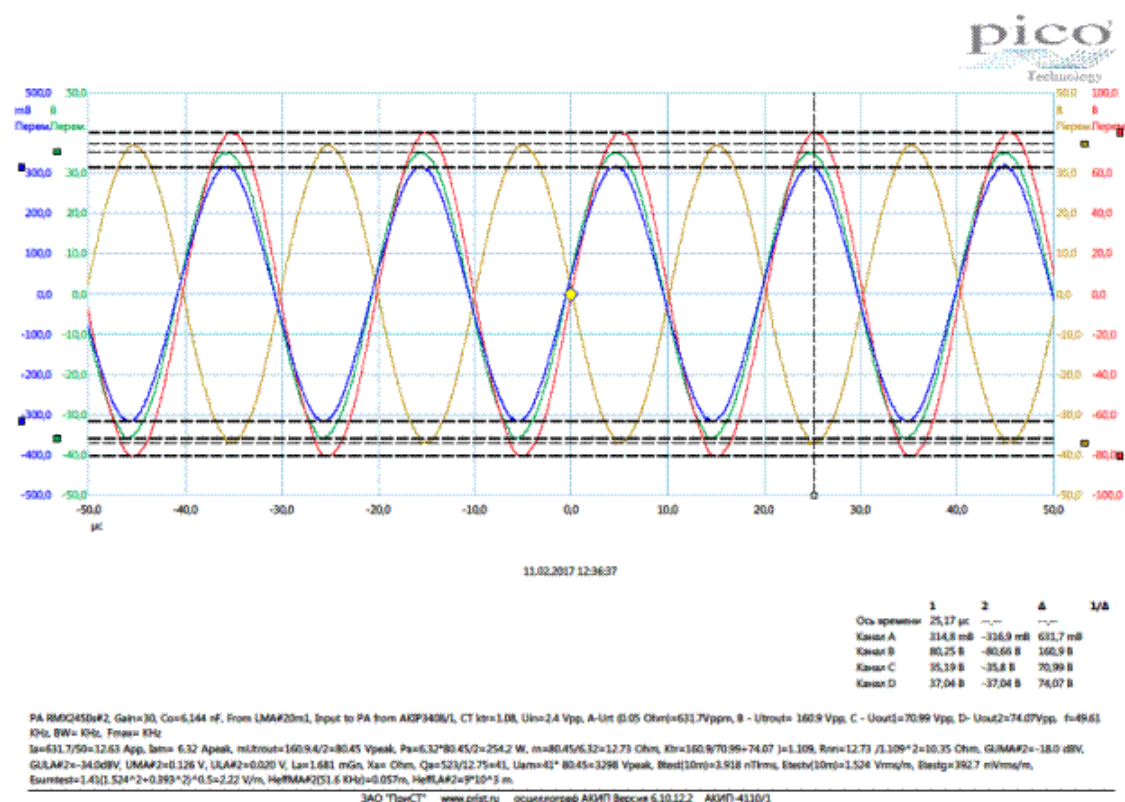
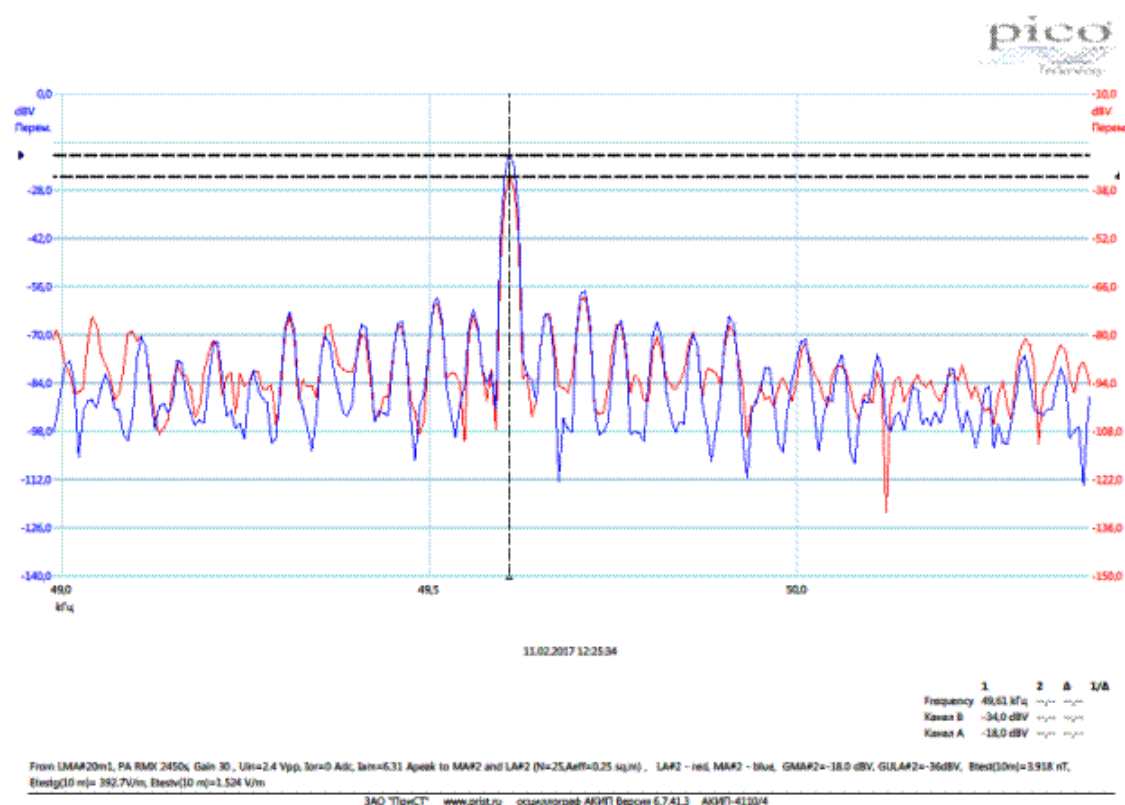


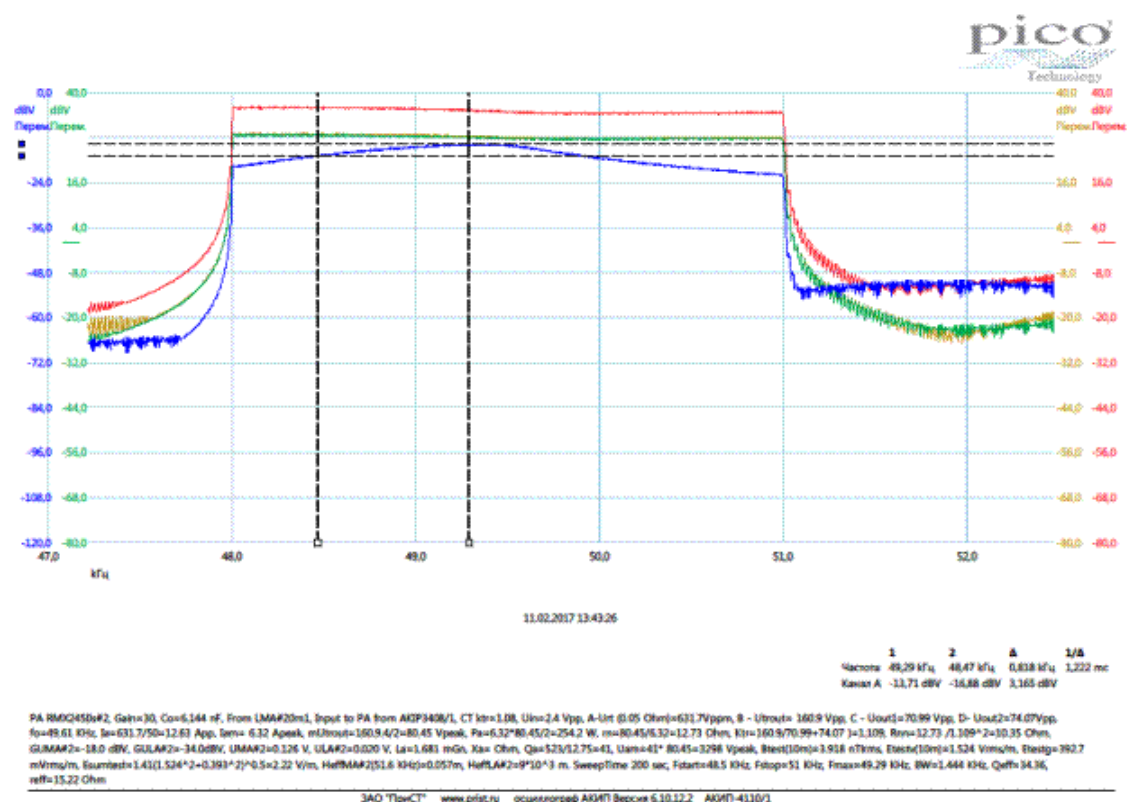
Фото.15



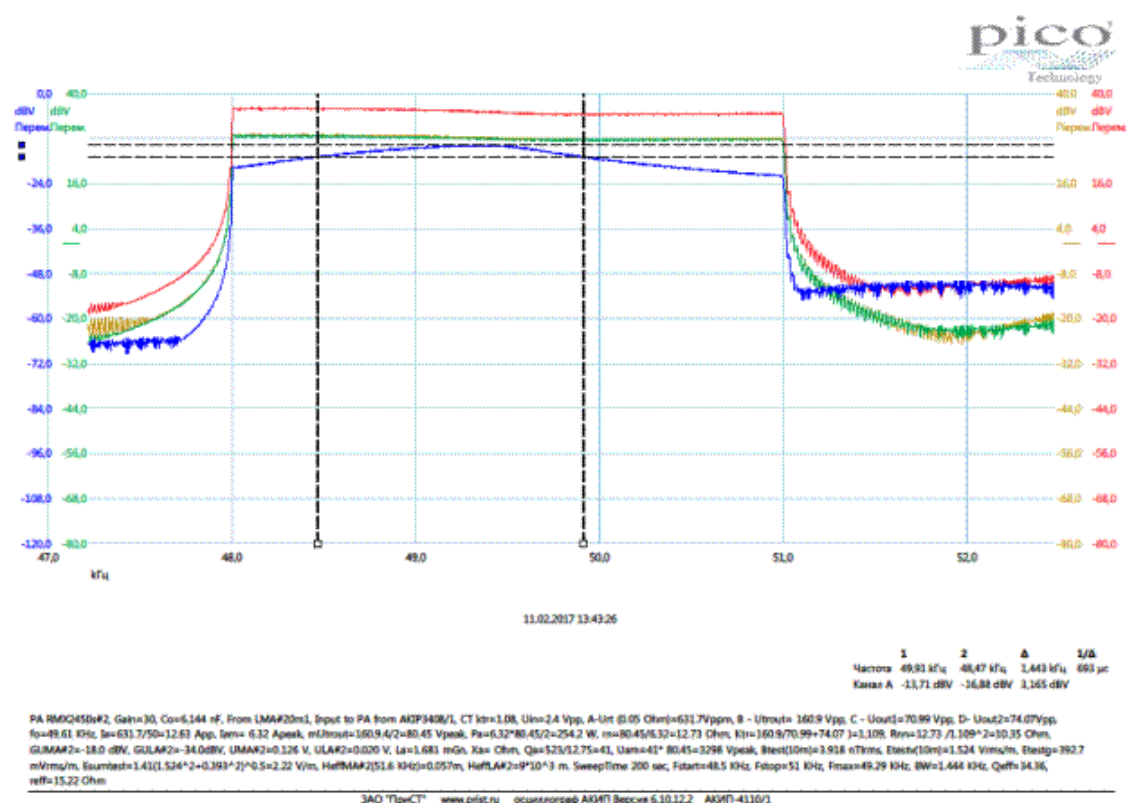
Фиг.3.



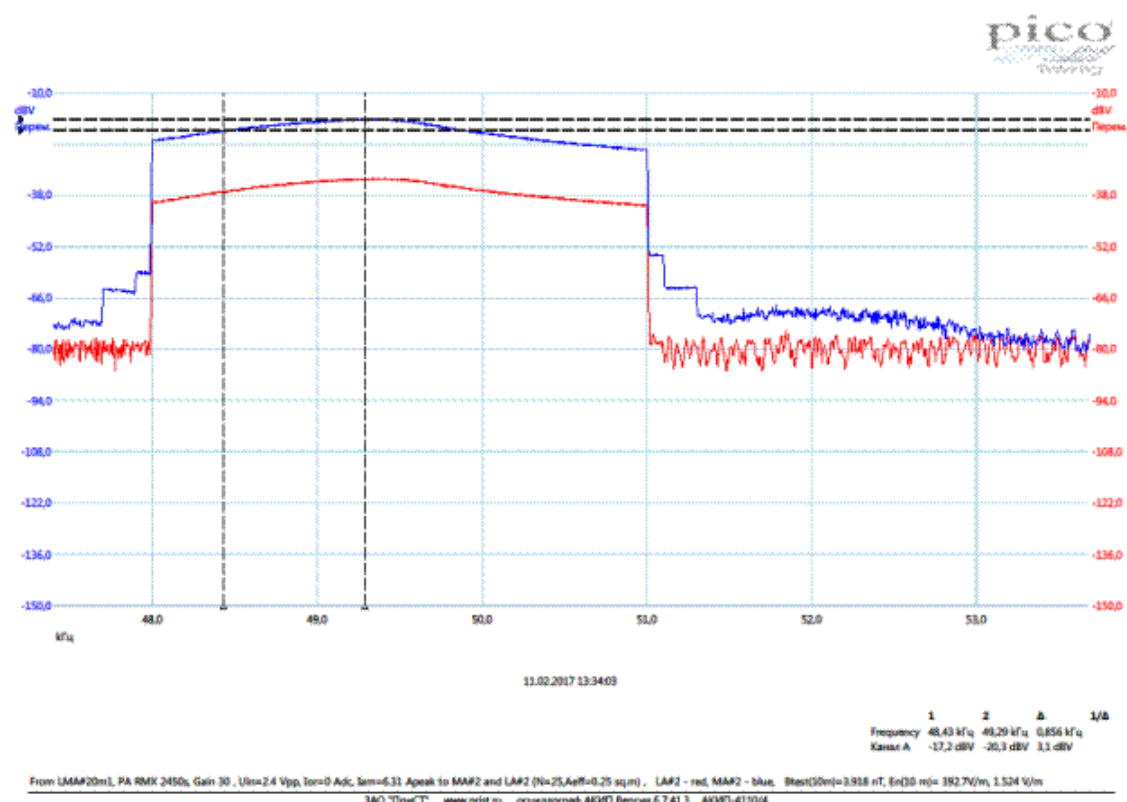
Фиг.4.



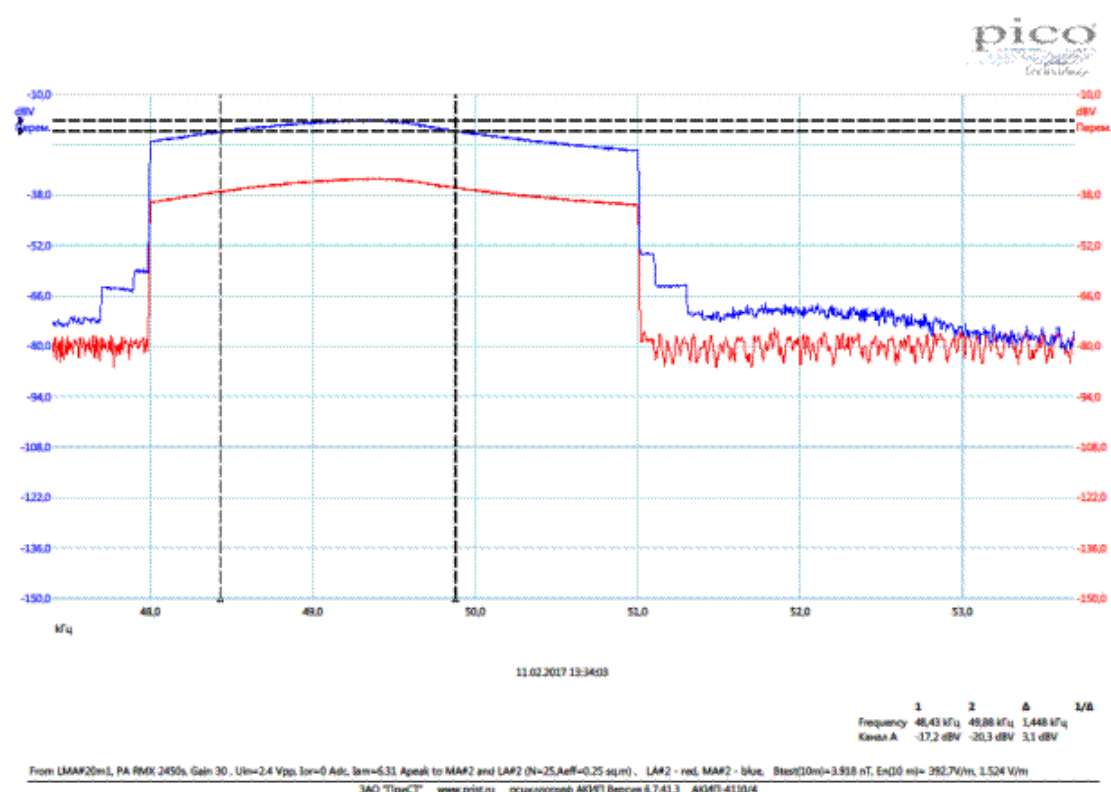
Фиг.5.



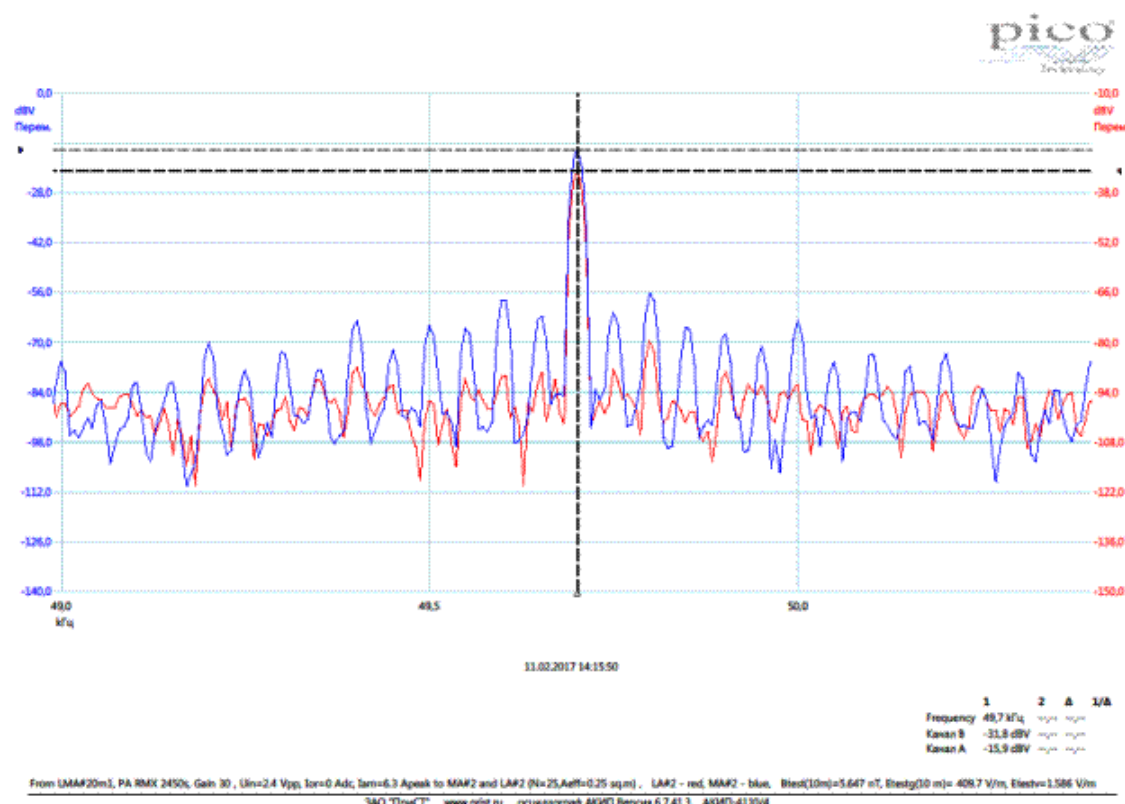
Фиг.6.



Фиг.7.



Фиг.8.



Фиг.9.

#### 6.1. Исходя из содержания Фиг.3, 4, 5, 6

а) На расстоянии примерно 10 м от модели ЛМАН<sup>№</sup> 2м1 Антенной МАН<sup>№</sup> 2 (см. Фото.12, Фиг.3, 4) был зарегистрирован уровень сигнала GUMA#2 = - 18 dBV. Это означает, что на частоте 49.61 КГц зарегистрирован ей сигнала с амплитудным значением выходного напряжения МАН<sup>№</sup> 2 UMAN<sup>№</sup> 2 = 0.126 В. При этом с ФГ на вход УМН<sup>№</sup> 2 был подан сигнал с амплитудным значением Uin = 1.2 В. При усилении УМН<sup>№</sup> 2 равном 30 dB (т.е. равным 31.62 ) на первичную обмотку согласующего трансформатора (ТС) поступило напряжение с амплитудным значением Uout =72.53 В. Со вторичной обмотки ТС на фидер, идущий в направлении к передающей антенне ЛМАН<sup>№</sup> 20м1, поступило напряжение с амплитудным значением Utr.out =80.45 В. Протекающее по жилам фидера амплитудное значение тока «возбуждения» Iam = 6.32 А. Потребляемая передающей антенной ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 мощность Pa = 254.2 Ватт. Она представляет из себя в момент резонанса для СТ нагрузку, равную активному сопротивлению rn = 12.73 Ом. В момент данного измерения факт (см. Фиг.3) совпадения фазы напряжения Urt(Rt=0.05 Ohm) (кривой синего цвета первого канала АКИП-4110/1) и кривой напряжения Utr.out (красного цвета второго канала АКИП-4110/1) и является свидетельством существования соотношения собственной частоты антенного контура fo с частотой несущей f = 49.61 КГц. Что делает возможным на частоте резонанса fo=49.61 КГц определить значение индуктивности La соленоида «возбуждения», зная величину конденсаторов Co1 и Co2 в резонансной цепи тока «возбуждения». La = 1.675 мГн.

б) Определение величины La на данной частоте несущей f = 49.61 КГц даёт возможность определить при заданном амплитудном значении тока Iam = 6.32 А, протекаемого по соленоиду «возбуждения» продольного магнитного потока, эффективное значение магнитной проницаемости  $\mu_{эфф}$  разомкнутого для силовых магнитных линий магнитопровода передающей антенны ЛМАН<sup>№</sup> 20м1.

$$\mu_{эфф} = \frac{La}{Lo} = 1.675 \text{ мГн} / 35.2 \text{ мкГн} = 47.58 (6.1 - 1)$$

в) С целью определения эффективного значения магнитной индукции  $B_{\text{тест}}(10 \text{ м})$  в месте расположения приёмной антенны MAN<sup>№</sup> 2 (см. Фото.14) с помощью Анализатора спектра АКIP — 4210/3 его потребовалось повернуть во круг виртуальной вертикальной оси таким образом, чтобы плоскость передней его панели была параллельна направлению продольной оси модели MAN<sup>№</sup> 2, ориентированной в направления максимального уровня принятого им сигнала. Исходя из данных Фиг. 3, 4:  $B_{\text{тест}}(10 \text{ м}) = 3.918 \text{ нТл}$ . (6.1 — 2)

г) С целью определения эффективного значения вертикальной составляющей напряжённости электрического поля ЭМП  $E_{\text{тест}}(10 \text{ м})$  потребовалось (см. Фото.12 и Фото.13) повернуть корпус АКIP — 4210/3 на 90 градусов в вертикальной плоскости. На основе данных Фиг.3 и Фиг.4  $E_{\text{тест}}(10 \text{ м}) = 1.524 \text{ В/м}$ . (6.1 — 3)

Тогда как для измерения истинного эффективного значения горизонтальной составляющей напряжённости электрического поля  $E_{\text{тест}}(10 \text{ м})$  такого поворота корпуса АКIP — 4210/3 не потребовалось.

На основе данных Фиг.3 и Фиг.4  $E_{\text{тест}}(10 \text{ м}) = 392.7 \text{ мВ/м}$ . (6.1 — 4)

Поэтому амплитудное значение  $E(10 \text{ м})_{\text{тест}}$  электрической составляющей напряжённости ЭМП может быть определено как

$$E(10 \text{ м})_{\text{тест}} = 1.41 (\sqrt{E_{\text{тест}}^2(10 \text{ м}) + E_{\text{тест}}^2(10 \text{ м})}) 0.5 = 2.22 \text{ В/м} \quad (6.1 — 5).$$

д. Зная величину  $E(10 \text{ м})_{\text{тест}}$  и  $U_{\text{MAN}^{\text{№}} 2} = 0.126 \text{ В}$ , можно определить значение «Действующей высоты» приёмной ферритовой Антенны ЛMAN<sup>№</sup> 20м1:

$$H_{\text{эфф}} \text{ MAN}^{\text{№}} 2 (49.5 \text{ КГц}) = 0.126 \text{ В} / 2.22 \text{ В/м} = 0.057 \text{ м} \quad (6.1 — 6)$$

е) Основные геометрические параметры передающей антенны ЛMAN<sup>№</sup> 20м1:

Длина  $l_m$  магнитопровода и каркаса — 1 м

Диаметр  $d_m$  магнитопровода — 0.05 м

Диаметр  $d_s$  обмотки соленоида «возбуждения» — 0.068 м

Число витков обмотки плоским двух жильным кабелем соленоида «возбуждения»  $N = 64$ ,

Длина  $l_s$  соленоида «возбуждения» — 0.5 м.

ж) Можно определить амплитудное значение величины напряжённости переменного продольного магнитного поля в теле ЛMAN<sup>№</sup> 20м1

$$H_m = \frac{I_{\text{зм}} N}{2l_s} = 404.5 \text{ А/м} \quad (6.1 — 7)$$

з) Можно определить амплитудное значение индукции продольного переменного магнитного поля в теле ЛMAN<sup>№</sup> 20м1

$$B_m = 4\pi H_m \mu_{\text{ж}} 10^{-7} \text{ Тл} = 0.0242 \text{ Тл} < B_s = 450 \text{ Тл} \quad (6.1 — 8).$$

и) Можно вычислить в свободном пространстве теоретическое амплитудное значение индукции магнитного поля  $B(10 \text{ м})$  на расстоянии 10 м от места установки модели лма<sup>№</sup> 20м1, учитывая, что действует закон изменения величины магнитного поля обратно пропорционально кубу дистанции  $D$ :

$$B(10 \text{ м}) = B_m \left( \frac{d_s}{D=10 \text{ м}} \right)^3 = 7.61 \text{ нТл} < 1.41 B_{\text{тест}}(10 \text{ м}) = 5.52 \text{ нТл} \quad (6.1 — 9)$$

к) Можно вычислить теоретическое амплитудное значение электрической составляющей

$E(10 \text{ м})$  напряжённости ЭМП на расстоянии 10 м в свободном пространстве от места установки передающей ЛМАН<sup>№</sup> 20м1, где  $W_0 = 377 \text{ Ом}$

$$E(10 \text{ м}) = \frac{B_m W_0}{4\pi 10^{-7}} = 6.06 \text{ В / м} > E(10 \text{ м})_{\text{тест}} = 2.22 \text{ В / м. (6.1 — 10)}$$

л) Дистанция границы «Ближней зоны» для частоты  $f = 49.61 \text{ КГц}$  :  $D_{гбз} = \lambda / 2\pi = 964.6 \text{ м}$ . Зная теоретическое значение  $E(10 \text{ м})$  при  $I_{ам} = 6.32 \text{ А}$ , можно вычислить теоретическое амплитудное значение напряженности электрического поля на дистанции в 1000 м в свободном пространстве:  $E(1000 \text{ м}) = 10 E(10 \text{ м})/1000 = 61 \text{ мВ / м (6.1 — 11)}$ ,

что более, чем в 4.4 раза превышает упомянутое в статье автора [7] значение  $E(1000 \text{ м}) = 13.8 \text{ мВ / м (6.1 — 12)}$ , при изучении распространения ЭМВ, излучаемых антенной ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 на пересечённой местности правда при амплитудном значении тока «возбуждения»  $I_{ам}$ , протекаемого по её соленоиду, равному 5.25 А.

м) Необходимо определить величину полосы пропускания  $BW$  антенной цепи

модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 при значении  $I_{ам} = 6.32 \text{ А}$ . Для этой цели были сняты амплитудно — частотные характеристики (АЧХ), кривые которых представлены на Фиг.5, Фиг.6, и Фиг.7, Фиг.8. На основании данных Фиг.5 и Фиг.6 установили, что для этого случая

$BW = 1.44 \text{ КГц. (6.1 — 13)}$ . При этом максимальный уровень был зафиксирован на частоте  $f_{\text{мак}} = 49.29 \text{ КГц}$ . Знание величины  $BW$  позволяет определить эффективное значение добротности  $Q_{эфф} = 49.61 / 1.44 = 34.45 \text{ (6.1 — 14)}$  с целью определения эффективного значения

$$\text{сопротивления потерь } R_{эфф} = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} : Q_{эфф} = 15.16 \text{ Ом} > r_n = 12.73 \text{ Ом (6. — 15)}$$

Эффективного значения сопротивления потерь  $R_{эфф}$  характеризует не только потери в фидере и собственно резонансной цепи тока «возбуждения» передающей антенны, но также потери в согласующем трансформаторе и в выходных элементах каналов УМ.

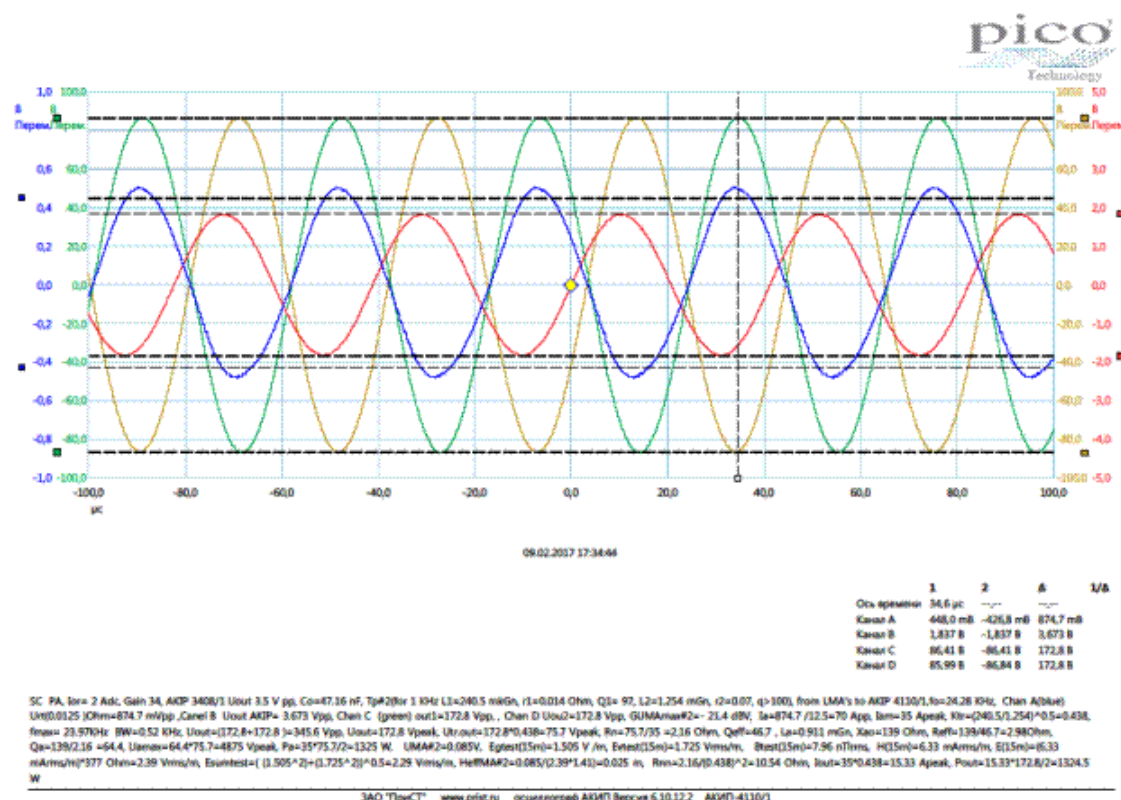
н) Следует иметь в виду при том же значении  $I_{ам}$  с увеличением длительности подачи мощности на передающую антенну МАН<sup>№</sup> 20м2 в силу изменения температурного режима в УМ и в теле передающей антенны происходит произвольное изменение уровня излучения ЭМВ. В этом можно убедиться на основе данных Фиг.9. Так например, в процессе снятия АЧХ выросло значение  $E_{\text{тест}}(10 \text{ м}) = 1.586 \text{ В / м}$ , значение  $gE_{\text{тест}}(10 \text{ м}) = 392.7 \text{ мВ / м}$ ,  $gE\text{-тест}(10 \text{ м}) = 409 \text{ мВ / м}$ , значение  $B_{\text{тест}}(10 \text{ м}) = 5.647 \text{ нТл}$  (см. Фото.14 и Фото.15), а так же вырос уровень зарегистрированного антенной МАН<sup>№</sup> 2 сигнала  $GUMA\#2 = -15.9 \text{ dBV}$  вместо  $GUMA\#2 = -18 \text{ dBV}$ .

о) Из выше изложенного убеждаемся, что модель ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 длиной в 1 м и диаметром не более 7 см может быть работоспособной на частоте порядка 49.5 КГц при подводимой к ней мощности не ниже 250 Ватт.

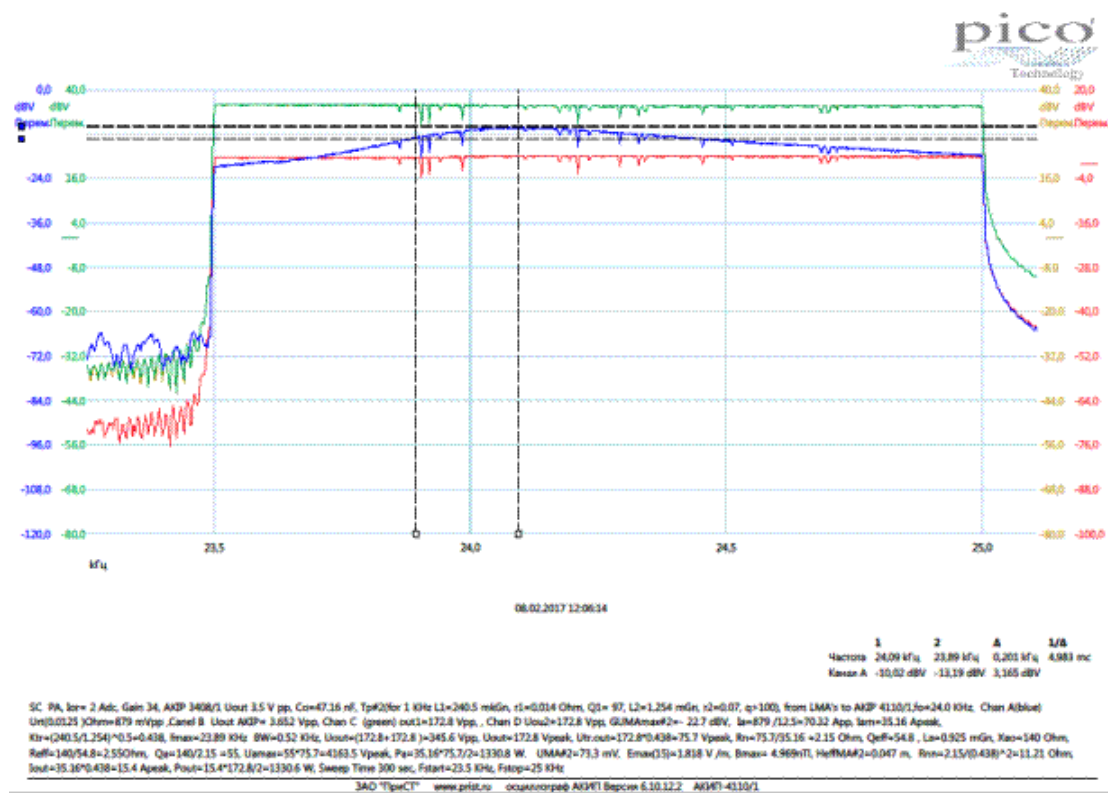
7. Модели ЛМАН<sup>№</sup> 11, ЛМАН<sup>№</sup> 12, ЛМАН<sup>№</sup> 13, ЛМАН<sup>№</sup> 14, ЛМАН<sup>№</sup> 15 и ЛМАН<sup>№</sup> 16 «Ушестерённая» модели ЛМА, представленные на Фото.1 и Фото.2, имеют подобный модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 магнитопровод и диэлектрический каркас лишь с той разницей, что их длина больше на 0.5 м и отличаются числом витков и длина их соленоида больше на 0.25 м. Поэтому подводимая на частоте несущей к их соленоидам тока «возбуждения» мощность  $P_a$  может превышать 1200 Ватт и как подтверждают их испытания в обмотке их соленоидов ток может достигать величины порядка 12 А. Ниже приводятся материалы, касающиеся теста «ушестерённой» модели ЛМА, схема соединения обмоток тока «возбуждения» и обмоток тока «подмагничивания» представлена на Фиг. 1, находящейся в «прицепе», представленном на Фото.3.

7.1 В Таблицу 3 сведены основные параметры моделей ЛМА, используемые в «ушестерённой

» модели ЛМА, измеренные на частоте 1 КГц с помощью «L-C-R» моста, представленного на Фото. 9 и Фото. 10. Как и ранее измерялись в отдельности, как можно видеть на Фото. 9, электрические характеристик обмотки соленоида тока «возбуждения» для каждой ЛМА в случае отсутствия в диэлектрическом каркасе тела магнитопровода. В присутствии тела магнитопровода в диэлектрическом каркасе каждой из ЛМА в отдельности осуществлялось в месте их размещения на стенде, изображённом на Фото. 2. Следует принять во внимание, что изготовленные собственноручно автором модели ЛМА№ 13, 14, 15, 16 в более позднее время абсолютно идентичны по своей конструкции (длине соленоида и числа витков его обмотки, а так же диаметра и толщины стенки и типа материала их диэлектрического каркаса) отличаются от ранее изготовленных моделей ЛМА№ 11 и ЛМА№ 12. При этом они расположены на данном стенде (см. Фиг.1) в следующем порядке: слева на права на верхнем уровне во ЛМА№ 11, 14, 16, а на нижнем уровне — ЛМА№ 12,13,15. Каждый из двух практически одного номинала резонансных конденсаторов Со1 и Со2, конструктивно размещён в двух герметичных оболочках при параллельном соединении размещённых в них собственноручно изготовленных автором из набора последовательно — параллельно соединённых типовых отельных 1800 Вольт для постоянного напряжения конденсаторов с тангенсом потерь не хуже  $5 \cdot 10^{-4}$ , как это можно

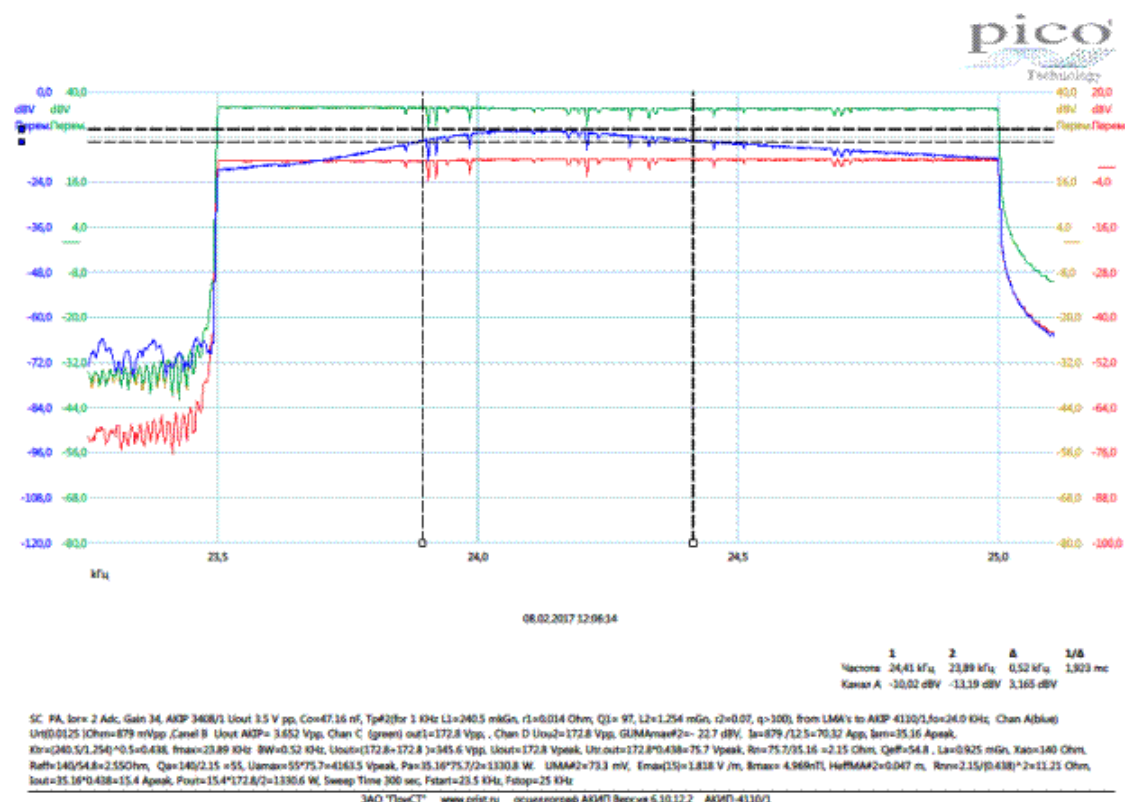


Фиг.10.

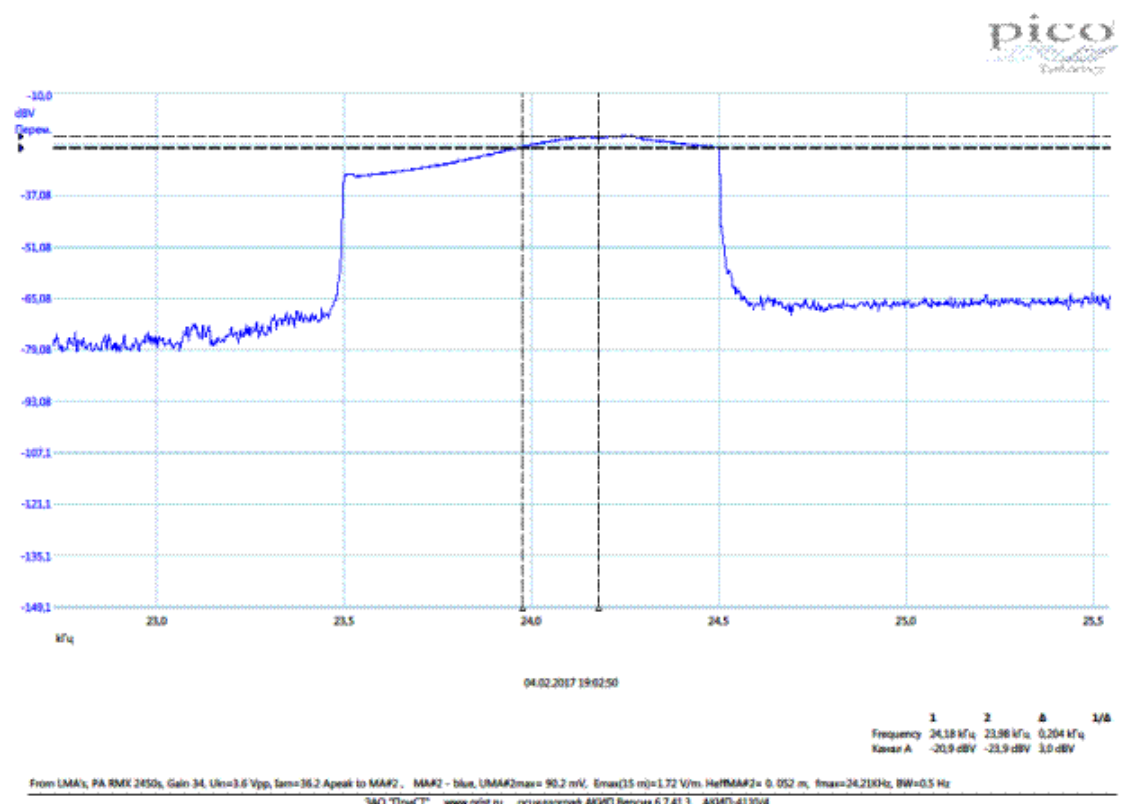


Фиг.11.

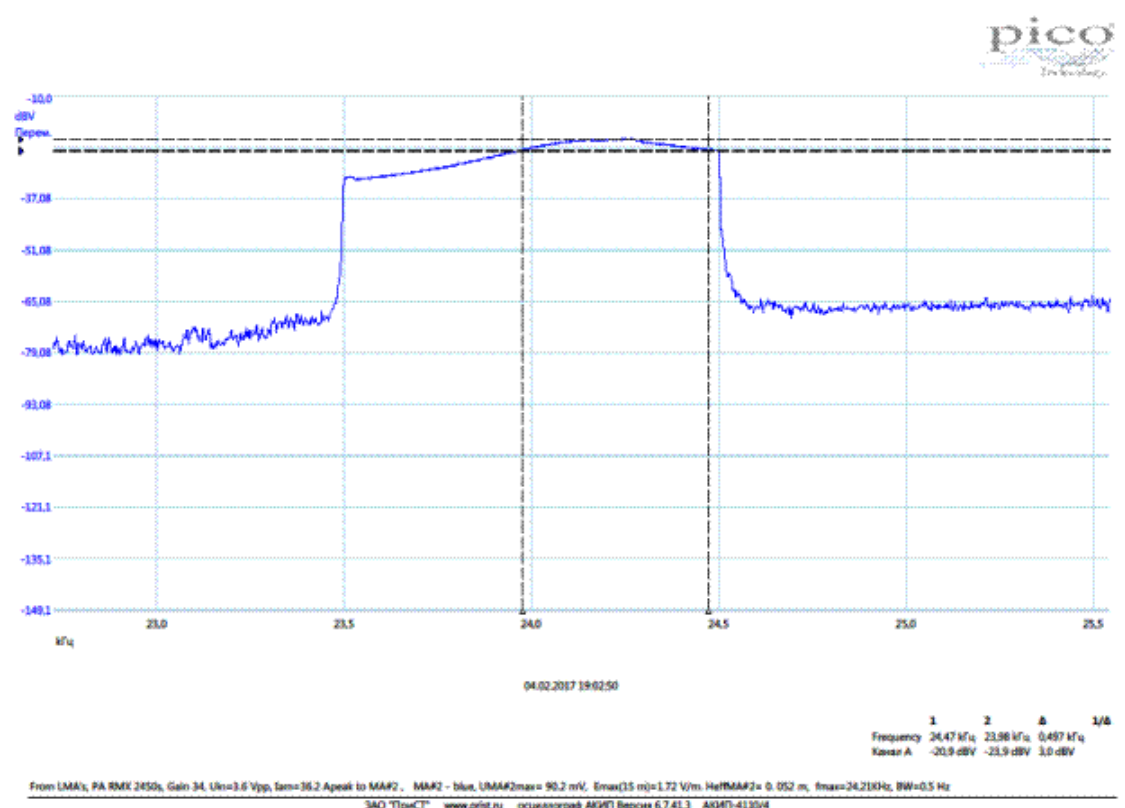
видеть на Фото.2 парами симметрично по бокам центрально расположенной модели ЛМАН<sup>№</sup> 14.



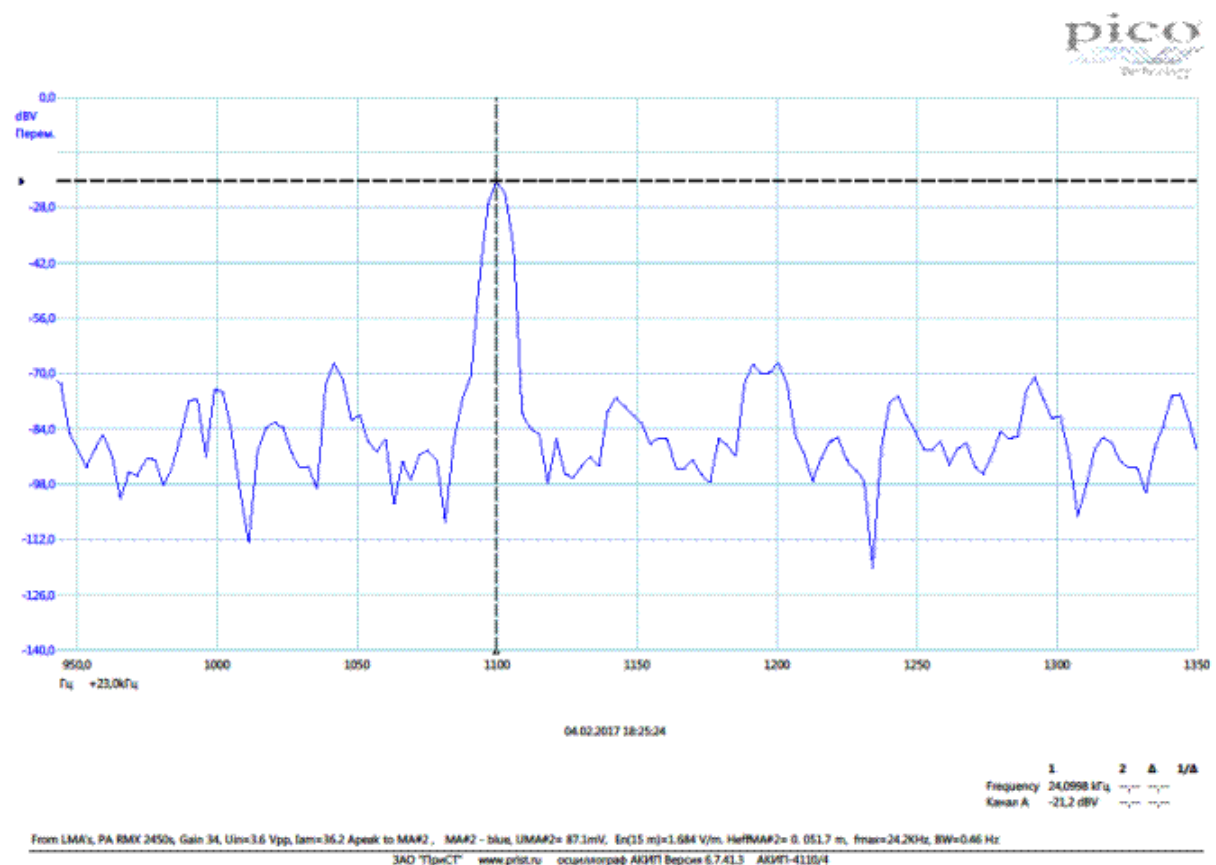
Фиг.12.



Фиг.13.



Фиг.14.



Фиг.15.



Фото.16.



Фото.17.



Фото.18

Таблица 3.

| Модель № | Lo [мкГн] | La [мГн] | N  | μ эфф | Вид намотки |
|----------|-----------|----------|----|-------|-------------|
| 11       | 42.88     | 2.028    | 80 | 47.29 | правая      |
| 12       | 66.7      | 1.277    | 88 | 19.15 | левая       |
| 13       | 41.61     | 1.588    | 96 | 38.5  | левая       |
| 14       | 48.92     | 1.950    | 96 | 39.86 | правая      |
| 15       | 46.11     | 1.895    | 96 | 41.1  | левая       |
| 16       | 43.15     | 1.780    | 96 | 38.57 | правая      |

Следует иметь ввиду, что измеренные параметры последовательно согласованного соединённых обмоток «возбуждения этих моделей, расположенных в соответствии с гео-метрией Фиг.2, дало следующий результат:

$$L_{\text{асум}} = 6.936 \text{ мГн } r_{\text{сум}} = 0.584 \text{ Ом } Q_{\text{сум}} = 77.33$$

Тогда как арифметическая сумма значений третьего столбца дает величину 10.518 мГн, это следствие магнитной взаимного влияния друг на друга.

7.2. Измерения проводились автором в условиях реального расположения «ушестерённой» модели в «прицепе» (см. Фото.3) аппаратурой (см. Фото.5, 6, 7) в лабораторном помещении. На основании данных Фиг.10:

а) На вход УМН<sup>№</sup> 1 типа RMX 2450s был подан с ФГ синусоидальный сигнал с амплитудным значением 1.75 В со значением несущей частоты  $f = 24.28$  КГц, добившись её плавным изменением обеспечение настройки в резонанс антенной цепи тока «возбуждения» по моменту совпадения фазы напряжения  $U_{rt}(R_t=0.012 \text{ Ом}) = 437.4 \text{ мВ}$  с напряжением  $U_{out} = 172.8 \text{ В}$  на входе первичной обмотки согласующего трансформатора СТ.

б) Измеренные параметры на частоте 1 КГц первичной и вторичной обмотки СТ, выполненного на ферритовом сердечнике РМ87\*70 имеют значения:

$$L_2=241.3 \text{ мГн}, r_{s2} = 0.014 \text{ Ом}, Q = 97, L_1=1.254 \text{ мГн}, r_s = 0.07 \text{ Ом}, Q > 100 \text{ (7.2 — 1)}$$

Таким образом СТ является понижающим трансформатором с коэффициентом

$$K_{тр} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = 0.44 \text{ (7.2 — 2)}.$$

в) амплитудное значение тока «возбуждения»  $I_{am} = 35 \text{ А}$ . Величина активного сопротивления потерь резонансной цепи тока «возбуждения» «ушестерённой» модели ЛМА

$$r_n = 2.16 \text{ Ом}, \text{ а мощность подводимая к ней } P_a = 1325 \text{ Ватт}.$$

г) Так как резонансное значение конденсатора в цепи тока «возбуждения»  $C_0 = 47.16 \text{ нФ}$ , то эквивалентное значение индуктивности цепи тока «возбуждения»  $L_a = 0.911 \text{ мГн}$  добротность её  $Q_a = 64.4$ . С учётом, что амплитудное значение напряжения на выходе вторичной обмотки равно  $U_{tr.out} = 75.7 \text{ В}$ , поэтому на соленоиде обмотки возбуждения амплитудное значение напряжения составит величину  $U_{am}=4878 \text{ В}$ .

д) исходя из данных АЧХ, представленной на Фиг.11 и 12, полоса пропускания антенного контура тока  $BW= 0.52 \text{ КГц}$ , эффективное значение добротности  $Q_{эфф}=54.8$ , а эффективное сопротивление потерь антенного контура питания

$$r_{эфф} = 2.55 \text{ Ом} > r_n = 2.16 \text{ Ом} \text{ (7.2 — 3)}$$

е) Измеренное АКИП-4210/3 эффективное значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля

$$B_{г.тест}(15 \text{ м})= 4.96 \text{ нТл см. Фото. 16) (7.2 — 4)}$$

Интересно отметить, так как горизонтальная составляющая напряжённости магнитного поля  $H_{г.тест} (15 \text{ м}) = 4.96 / 400 \pi = 0.004 \text{ А/м}$  (7.2 — 5), и, если умножить эту величину на Волновое сопротивление вакуума  $W_0 = 120 \pi \text{ Ом}$  (7.2 — 6),

то должны были бы получить эффективное значение горизонтальной составляющей напряжённости электрического поля  $E_{г} (15) = 1.51 \text{ В}$  (7.2 — 7)

ж) Измеренное АКИП-4210/3 эффективное значение горизонтальной составляющей напряжённости электрического поля  $E_{г.тест}(15 \text{ м}) = 1.551 \text{ В/м}$  ( см. Фото. 18) (7.2 — 8)

(Просто удивительно, что получен результат практически совпал со значением, вычисленным с помощью формулы (7.2 — 9) !!!) а эффективное значение вертикальной составляющей напряжённости электрического поля

Евтест(15 м) = 1.819 В / м (см. Фото. 17) (7.2 — 10), поэтому эффективное абсолютное значение вектора Е (15 м) напряжённости электрического поля

$$E(15 \text{ м}) = 2.3 \text{ В / м. (7.2 — 11).}$$

з) Измеренный уровень сигнала в соответствии с данными спектральной плотности напряжения на выходе пассивной антенны МАН<sup>№</sup> 2, представленной на Фиг.15 равен — 23.2 дБВ, поэтому амплитудное значение выходного сигнала

$$U_{\text{outMA\#2}}(15 \text{ м}) = 0.07 \text{ В (2.7 — 12)}$$

и) Поскольку  $E_{\text{г.тест}}(15 \text{ м}) = 1.551 \text{ В / м}$ , то можно вычислить «действующую высоту» НМАН<sup>№</sup> 2 приёмной пассивной антенны для данной частоты:

$$H_{\text{MAN\#2}} = 0.07 / (1.41 \cdot 1.551) = 0.032 \text{ м. (7.2 — 13).}$$

8. Можно произвести теоретическую оценку значения напряжённости электрического поля на расстоянии 1000 м, зная её величину на расстоянии 15 м (см. 7.2 — 11) принимая во внимание результаты экспериментального теста модели ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 на пересечённой местности [7, п.23]:

$$E(1000 \text{ м}) = 2.3 \cdot (15 / 1000)^{1.2} = 14.9 \text{ мВ / м (8 — 1).}$$

Поэтому можно предположить, что

$$U_{\text{outMA\#2}}(1000 \text{ м}) = 14.9 \text{ мВ/м} \cdot 0.032 \text{ м} = 0.48 \text{ мВ (8 — 2).}$$

Поэтому можно считать, что мощность радиации ЭМВ «ушестерённой» модели ЛМА может соответствовать величине порядка:

$$P_{\text{рад}} = \frac{4\pi E^2(1000)10^6}{W_0} = 7.4 \text{ Ватт (8 — 3)}$$

Таким образом можно считать, что эффективность радиации ЭМВ «ушестерённой модели ЛМА на частоте порядка 24.5 КГц порядка:

$$\zeta_{\text{рад}} = P_{\text{рад}} / P_{\text{а}} = 7.4 / 1325 = 5.6 \cdot 10^{-3} = 0.56\% (8 — 4)$$

#### Литература:

1. А.Б. Ляско, Патент РФ № 2428774 на изобретение «Передающие Линейные Магнитные Антенны (ЛМА)», 10 Сентября 2010 г., ФИПС, Москва.
2. А.Б. Ляско, "Сферические волны передающей линейной магнитной антенны (Часть 1),"Евразийский научный журнал" № 6, Июнь 2016 г.
3. А.Б. Ляско, «Сферические волны передающей магнитной антенны (Часть 2), «Евразийский научный журнал» № 7, Июль 2016 г.
4. А.Б. Ляско, «О реальной возможности использования линейных магнитных антенн (ЛМА) для электромагнитной двусторонней трансляции дискретной информации в морской среде между мобильными объектами в диапазоне КНЧ», «Евразийский научный журнал» № 8, Август 2016 г.
5. А.Б. Ляско, «Об испытании модели линейной магнитной антенны ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 (Часть 1)», «Евразийский научный журнал» № 11, Ноябрь 2016 г.
6. А.Б. Ляско, «Об испытании модели линейной магнитной антенны ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 (Часть 2)», «Евразийский научный журнал» № 12, Декабрь 2016 г.
7. А.Б. Ляско, «Об испытании модели линейной магнитной антенны ЛМАН<sup>№</sup> 20м1 (Часть 3)», «Евразийский научный журнал» № 1, Январь 2017 г.
8. А.Б. Ляско, «Испытание излучения мобильной ушестерённой модели линейной магнитной антенны на пересечённой местности в СВД диапазоне», «Евразийский научный журнал» № 1, Январь 2017 г.