

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ, ИНФОРМАТИЗАЦИИ И
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

Кафедра «Системы телерадиовещания»

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАТОРНЫХ
АНТЕНН**

УЧЕБНО–МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

по дисциплинам «Распространение радиоволн и антенно-фидерные
устройства» и «Распространение радиоволн и антенны мобильной связи»
для направления образования

5350100 – «Телекоммуникационные технологии»
(специализации «Телевидение, радиосвязь, радиовещание», «Мобильная
связь»)

Ташкент – 2014

Учебно-методическое пособие посвящено исследованию направленных и электрических свойств вибраторных антенн с помощью компьютерной программы моделирования MMANA. Оно включает в себя основные теоретические сведения и три практических задания, выполнение которых позволит студентам овладеть навыками компьютерного моделирования вибраторных антенн, а также проанализировать их параметры и характеристики, полученные в результате моделирования.

Данное пособие предназначено для использования в учебном процессе при изучении курсов «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства» и «Распространение радиоволн и антенны мобильной связи» бакалаврами направления образования «Телекоммуникационные технологии» (специализации «Телевидение, радиосвязь, радиовещание», «Мобильная связь»)

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Симметричный вибратор

Симметричный вибратор состоит из двух одинаковых по размерам и форме проводников (часто эти проводники называются плечами), между которыми включается генератор высокой частоты. На рис.1.1 изображен симметричный вибратор, представляющий собой два цилиндрических проводника, каждый длиной ℓ и радиусом a , между проводниками имеется расстояние Δ (рис.1.1).

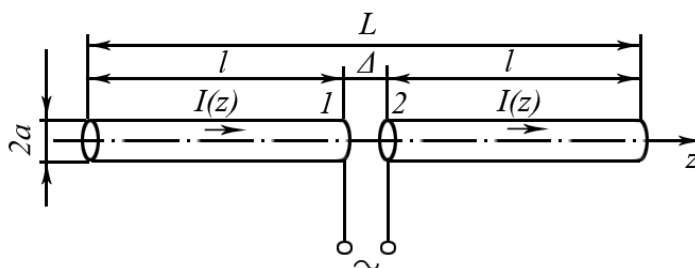


Рис.1.1. Симметричный вибратор

Проводя аналогию между симметричным вибратором и двухпроводной разомкнутой на конце линией без потерь, можно полагать, что закон распределения тока по плечам вибратора имеет вид

$$I_z = I_n \sin k(\ell - |z|),$$

где I_n – амплитуда тока в пучности, протекающего по вибратору; в общем случае, это величина комплексная – $\dot{I}_n = I_n \exp(i\psi)$;

l – длина одного плеча вибратора;

z – расстояние от начала вибратора (точки питания) до произвольной точки на нём (текущая координата);

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число;

λ – рабочая длина волны.

Следует иметь в виду, что такая аналогия является приближенной. Следовательно, ток в вибраторе не может быть распределен по закону стоячей волны. Однако расчет поля симметричного вибратора по формулам, основанным на синусоидальном распределении тока, дает хорошее совпадение с экспериментальными данными для тонких вибраторов в дальней зоне. Поэтому для инженерного расчета это приближение в ряде случаев вполне допустимо.

Симметричный вибратор обладает направленными свойствами только в меридиональной плоскости (плоскость электрического вектора \mathbf{E}). Его характеристика направленности имеет вид

$$f(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta},$$

а диаграмма направленности (ДН) показана на рис.1.2 (угол θ отсчитывается от оси вибратора).

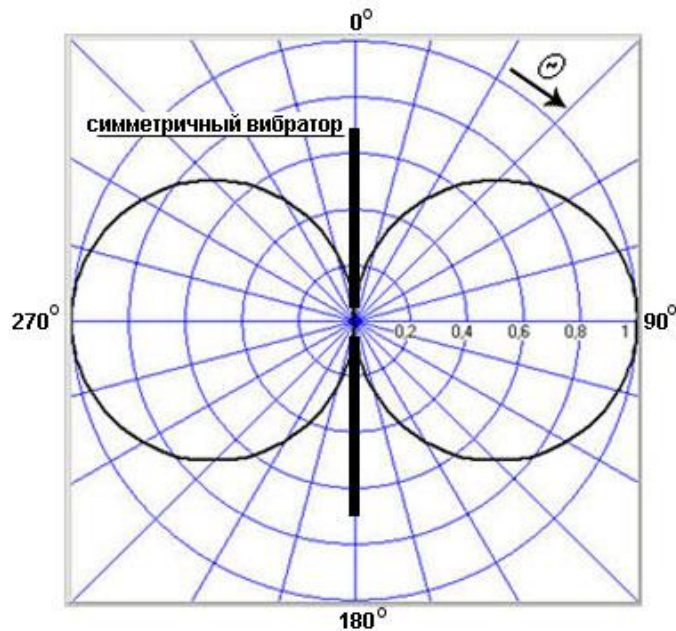


Рис.1.2. Диаграмма направленности симметричного вибратора в меридиональной плоскости

Характеристика направленности симметричного вибратора в экваториальной плоскости (плоскость магнитного вектора **H**) определяется выражением

$$f(\varphi) = 1 - \cos kl,$$

т.е. не зависит от азимутального угла φ . Поэтому его ДН в этой плоскости представляет в полярной системе координат окружность.

Направленные свойства симметричного вибратора определяются только отношением длины плеча вибратора к длине волны l/λ . В случае полуволнового вибратора ($l/\lambda = 0,25$) характеристика направленности имеет вид

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}.$$

Анализ формул и рассмотрение ДН показывают, что при любой величине отношения l/λ симметричный вибратор не излучает вдоль своей оси. Если длина плеча симметричного вибратора $l \leq 0,5\lambda$, то в направлении, перпендикулярном его оси ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 270^\circ$), т.е. в экваториальной плоскости, поля всех элементарных вибраторов (можно

представить, что симметричный вибратор состоит из них) максимальны, синфазны и складываются арифметически. Поэтому поле в данном направлении является максимальным. ДН при $l/\lambda \leq 0,5$ состоит из двух (главных) лепестков. Увеличение длины вибратора до $l = 0,5\lambda$ сопровождается ростом излучения в направлении, перпендикулярном оси вибратора (главное направление излучения), за счет уменьшения излучения в других направлениях. При этом ДН становится уже.

При увеличении l/λ до $0,625$ излучение в главном направлении продолжает возрастать, но характеристика направленности проходит через нуль не только при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$, но и при некоторых других значениях угла θ . Главные лепестки ДН становятся уже, но появляются боковые лепестки. При дальнейшем увеличении l/λ излучение в главном направлении уменьшается и возрастают боковые лепестки. Полуволновый симметричный вибратор имеет ширину ДН по половинной мощности $2\theta_{0,5} = 80^\circ$, волновой симметричный вибратор – $2\theta_{0,5} = 44^\circ$, симметричный вибратор, у которого $l/\lambda = 0,625$, имеет $2\theta_{0,5} = 31^\circ$.

Вибратор с $l/\lambda = 0,625$ имеет максимальное значение коэффициента направленного действия (КНД). При дальнейшем увеличении l/λ сильно возрастают боковые лепестки, хотя главный лепесток ДН становится уже, при этом КНД уменьшается. На практике применяются симметричные вибраторы, у которых $l/\lambda \leq 0,7$.

Фаза напряженности поля, создаваемого симметричным вибратором в пределах одного лепестка ДН, не зависит от координатного угла θ . Она изменяется скачком на обратную при переходе напряженности поля через нуль. Симметричный вибратор излучает сферические волны. Эти волны как бы исходят из одной точки, совпадающей с центром вибратора.

Часть мощности, подводимой от генератора к симметричному вибратору, излучается. Другая часть мощности теряется в самом вибраторе (нагревание проводов), в изоляторах и в окружающих вибратор предметах. Излученной мощности соответствует активное сопротивление излучения, определяемое отношением l/λ .

Кроме излученного, есть колеблющееся вблизи антенны связанное с ней электромагнитное поле, которому соответствует реактивная мощность. Эта мощность то отдается генератором, переходя в ближнее поле, то возвращается к нему обратно. Реактивной мощности в большинстве случаев соответствует реактивное сопротивление антенны.

Таким образом, подключенный к симметричному вибратору генератор нагружен на комплексное сопротивление, которое называется входным сопротивлением вибратора (как и любой антенны) и равно отношению напряжения на его зажимах (точки питания) к току в точках питания

$$Z_{BX} = \frac{U_0}{I_0} = R_{BX} + iX_{BX}.$$

Величина и характер входного сопротивления определяют режим работы включенного в антенну генератора. Обычно в симметричных

вибраторов потери малы, поэтому можно полагать, что $R_{BX} \approx R_{\Sigma o}$, где $R_{\Sigma o}$ – сопротивление излучения вибратора, отнесенное к току в точках питания.

Для точного определения входного сопротивления необходимо знать закон распределения тока вдоль вибратора. Часто, с достаточной для инженерных целей точностью, входное сопротивление рассчитывается, исходя из приближенных законов распределения тока по вибратору, либо по закону кругового синуса, либо гиперболического. Существенная разница в распределении тока по этим законам получается только на сравнительно близких расстояниях от узла тока. Поэтому при расчете входных сопротивлений "коротких" вибраторов $(l/\lambda) \leq 0,35 \dots 0,4$; $(0,6 \dots 0,65) \leq l/\lambda \leq (0,85 \dots 0,9)$, т.е. таких, у которых узел тока находится от точек питания вибратора не ближе, чем на расстоянии $(0,1 \dots 0,15)\lambda$, исходят из синусоидального распределения тока. При расчете входного сопротивления "длинных" вибраторов $(0,35 \leq l/\lambda \leq 0,65)$ следует исходить из распределения тока по закону гиперболического синуса.

Активная и реактивная составляющие входного сопротивления симметричного вибратора, в общем случае, зависят не только от длины вибратора, но и от его диаметра, величина которого влияет на величину волнового сопротивления W_A (чем толще вибратор, тем она меньше).

При увеличении l/λ активная составляющая входного сопротивления постепенно растет и достигает максимума при $l/\lambda \approx 0,5$, величина которого тем больше, чем больше W_A , т.е. чем тоньше вибратор. При дальнейшем увеличении l/λ R_{ex} постепенно уменьшается и достигает минимума при $l/\lambda \approx 0,75$. Затем R_{ex} снова начинает увеличиваться и достигает нового максимума приблизительно при $l \approx \lambda$. Активная составляющая входного сопротивления минимальна в тех случаях, когда относительная длина вибратора становится приблизительно равной нечетному числу $\lambda/4$. В случае полуволнового вибратора минимум R_{ex} отсутствует.

Реактивная составляющая входного сопротивления вибратора изменяется периодически, проходят через нуль при значениях l/λ несколько меньших $0,25$; $0,5$; $0,75$; 1 и т.д. При $l/\lambda < 0,25$ X_{ex} имеет емкостный характер, при $0,25 < l/\lambda < 0,5$ – индуктивный. Можно сказать, что вблизи значений $l/\lambda = (2n + 1)/4$, где $n = 0, 1, 2 \dots$, симметричный вибратор ведет себя подобно последовательному колебательному контуру (резонанс напряжения), а вблизи значений $l/\lambda = n/2$ подобно параллельному колебательному контуру (резонанс токов). В первом случае вибратор питается в пучности тока, а во втором – в узле тока.

Наибольшую длину волны, при которой вибратор оказывается настроенным в резонанс с питающим его генератором ($X_{ex} = 0$), называют собственной длиной волны антенны. Собственная длина волны симметричного вибратора $\lambda_o \approx 4l$. Чем толще вибратор, тем меньше фазовая скорость и тем короче его резонансная длина. В частности, при $l/\lambda = 0,25$ и $a \rightarrow 0$ $X_{ex} = i42,5 \text{ Ом}$. Обычно стремятся к нулевой реактивной составляющей входного сопротивления вибратора на рабочей частоте. Поэтому длину плеча

вибратора делают несколько короче, чем $\lambda/4$ или $\lambda/2$. Величина укорочения тем больше, чем толще вибратор. Активная составляющая входного сопротивления симметричного вибратора при питании вибратора в пучности тока (последовательный резонанс) равна $R_{\text{вх}} = R_{\Sigma 0} = R_{\Sigma n}$.

При уменьшении волнового сопротивления вибратора уменьшается зависимость его активного и реактивного входного сопротивления от частоты (улучшаются диапазонные свойства). По аналогии с обычным колебательным контуром можно сказать, что при уменьшении W_A уменьшается добротность вибратора, под которой понимается отношение связанной с вибратором реактивной энергии к активной (излученной и теряемой) энергии. W_A уменьшают, увеличивая размеры поперечного сечения вибратора; при этом увеличивается распределенная емкость вибратора.

Распределение тока в вибраторах средней и большой толщины значительно отличается от синусоидального. Ток на кромке торца имеет конечную величину. В центре торца ток равен нулю. С увеличением радиуса цилиндра существенно уменьшается коэффициент отражения от его концов и распределение тока по вибратору приобретает характер бегущей волны: амплитуда тока постепенно уменьшается по мере удаления от точек питания вибратора, фаза тока изменяется примерно по линейному закону.

Ширина зазора между плечами вибратора Δ значительно влияет на распределение тока вблизи точек питания вибратора. Зависимость распределения тока от толщины вибратора влияет на ДН последнего. С увеличением толщины вибратора направления нулевого излучения заменяются направлениями минимального излучения. При этом, чем толще вибратор, тем менее глубоки минимумы.

Часто в многовибраторных антеннах (таких, как директорная) в качестве активного элемента (к которому подводится питание) применяют петлевой вибратор. Петлевой вибратор (рис.1.3.а) можно рассматривать как два полуволновых синфазных вибратора, расположенных на малом расстоянии ($D \ll \lambda$) друг от друга, соединенных по концам. Относительно точек питания a и e вибратор является симметричной системой. В наиболее удаленной от точек питания точке 0 система оказывается короткозамкнутой, и здесь устанавливается пучность тока.

По мере продвижения от точки 0 к входу антенны амплитуды тока уменьшаются и в точках b и d , отстоящих от точки 0 на расстоянии, равном $0,25\lambda$, образуются узлы тока. Далее за точками b и d токи меняют свое направление на обратное, а их амплитуды по мере приближения к точкам a и e возрастают.

Отрезки вибратора ba и de соответственно в точках b и d относительно верхнего отрезка bod развернуты навстречу друг другу, следовательно, токи в обоих вибраторах 1 и 2 имеют одно направление. Расположение в точке 0 пучности тока и узла напряжения позволяет крепить вибратор в этой точке к металлической стреле или мачте непосредственно без изоляторов, обеспечивая надежную грозозащиту. При равенстве диаметров трубок вибратора в них будут равны и токи.

Поле излучения петлевого вибратора создается суммарным током $2I$, его мощность излучения определяется как $P_{\Sigma} = (2I_{эф})^2 R_{\Sigma\Pi}$, а подводимая мощность – $P = I_{эф}^2 R_a$. Решая совместно эти уравнения относительно R_a и полагая $P_{\Sigma} = P$, входное сопротивление петлевого вибратора определяется как $R_a = 4R_{\Sigma\Pi} \approx 4 \cdot 73,1 \approx 290 \text{ Ом}$.

Входное сопротивление петлевого вибратора можно менять, изменяя соотношение диаметров трубок вибратора. При изменении отношения диаметра верхнего вибратора (1) к нижнему (2) от 0,5 до 2 входное сопротивление петлевого вибратора изменяется от 220 до 380 Ом.

Петлевой и симметричный полуволновый вибраторы имеют примерно одинаковые ДН, коэффициент КНД и коэффициент усиления (КУ). Плоскость расположения трубок в вибраторе существенного влияния на его параметры не оказывает. Для получения большего входного сопротивления антенны применяют двухпетлевые вибраторы (рис.1.3.б), состоящие из трех полуволновых синфазных вибраторов. Входное сопротивление такого вибратора примерно равно $9R_{\Sigma\Pi}$.

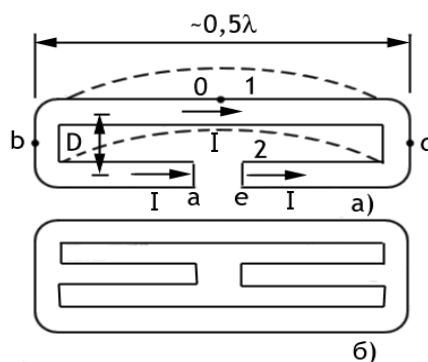


Рис.1.3. Петлевой (а) и двухпетлевой (б) вибраторы

1.2. Система из двух связанных вибраторов

Одиночные вибраторы применяют только тогда, когда требуется ненаправленное или почти ненаправленное излучение. В тех же случаях, когда необходимо получить однонаправленное излучение или узкие ДН, применяют антенны, состоящие из двух или нескольких вибраторов, расположенных на небольшом расстоянии (меньше длины волны) друг от друга. Такие вибраторы заметно влияют друг на друга, поэтому их называют связанными.

Взаимодействие связанных вибраторов аналогично взаимодействию связанных колебательных контуров с сосредоточенными постоянными. Поле одного вибратора наводит в другом вибраторе некоторую ЭДС, что эквивалентно изменению сопротивления излучения или входного сопротивления вибратора. Поле, создаваемое системой вибраторов, является

результатом сложения полей, создаваемых отдельными вибраторами, с учетом фаз этих полей, определяемых как разностью хода лучей, так и разностью фаз токов в излучателях.

На рис.1.4.а показаны два связанных симметричных вибратора, расположенных на расстоянии $d = 0,25\lambda$ друг от друга. Оба вибратора активные, т.е. к ним подводится питание от отдельных источников. Если ток во втором вибраторе I_2 опережает по фазе ток в первом I_1 на 90° (рис.1.4.б), а их амплитуды равны, то в направлении вибратора 1 и далее будет распространяться волна с удвоенной напряженностью поля. При распространении волны в направлении вибратора 2 поле E_1 вибратора 1, пройдя путь $d = 0,25\lambda$ до вибратора 2, отстанет по фазе на угол $kd = 90^\circ$ и окажется в противофазе с полем E_2 вибратора 2. Здесь поля взаимно компенсируются и излучения в этом направлении не будет.

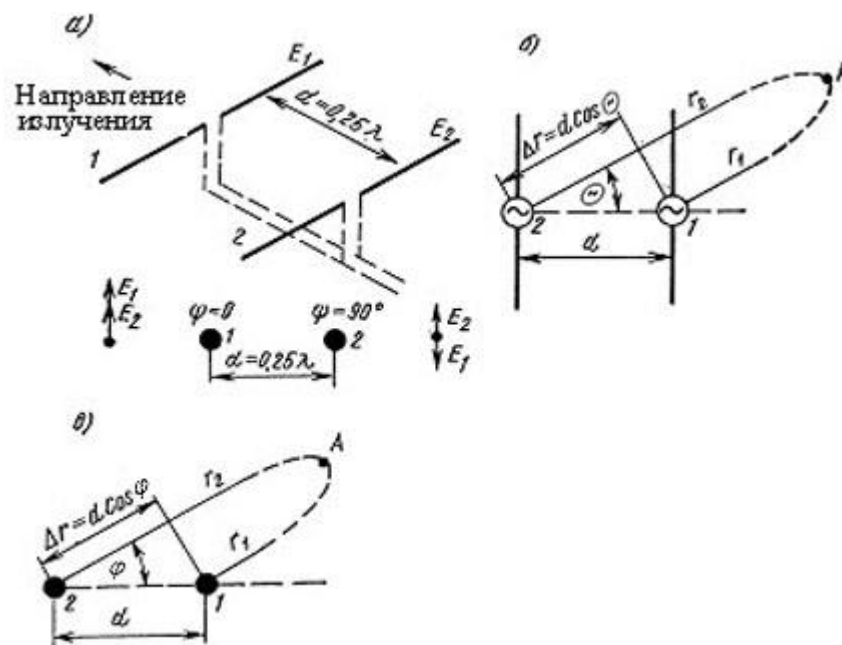


Рис.1.4. Система из двух вибраторов (а – в пространстве; б – в плоскости **E**; в – в плоскости **H**)

Рассматривая поле в меридиональной плоскости вибраторов (рис.1.4.в) и обозначая

$$\frac{I_2}{I_1} = q \cdot \exp(i\psi),$$

где q – отношение модулей токов I_2/I_1 ; ψ – сдвиг фазы тока I_2 по отношению к току I_1 , получим выражение для характеристики направленности двух связанных вибратора

$$f(\theta) = f_1(\theta) \cdot f_c(\theta) = \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta} \cdot \sqrt{1 + 2q \cos(\psi - kd \cos \theta) + q^2}.$$

Как видно из формулы, амплитудная характеристика направленности системы из двух связанных вибраторов определяется двумя множителями. Первый множитель $f_l(\Theta)$ представляет собой характеристику направленности симметричного вибратора, находящегося в свободном пространстве.

Второй множитель $f_c(\Theta)$ учитывает наличие второго вибратора; он зависит от расстояния d между вибраторами, от отношения амплитуд токов в вибраторах q и от сдвига фаз токов в вибраторах ψ . Этот множитель называют множителем системы.

В экваториальной плоскости направленные свойства данной системы определяются только множителем системы, так как одиночный симметричный вибратор в этой плоскости не обладает направленными свойствами. Характеристика направленности в экваториальной плоскости (плоскости H) определяется выражением

$$f(\varphi) = (1 - \cos kl) \cdot \sqrt{1 + 2q \cos(\psi - kd \cos \varphi) + q^2}.$$

В зависимости от величин d/λ , q и ψ ДН могут иметь различную форму, однако особенно важен случай однонаправленного излучения. Если токи в вибраторах одинаковы по величине ($q=1$), то получим следующую формулу для характеристики направленности

$$f(\varphi) = 2(1 - \cos kl) \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2} - \frac{kd}{2} \cos \varphi\right).$$

Предполагая, что $\psi = \pm 90^\circ$ и расстояние между вибраторами $d = \lambda/4$, получаем

$$f(\varphi) = 2(1 - \cos kl) \cos(\pm 45^\circ - 45^\circ \cos \varphi).$$

Множитель $f(\varphi) = \cos(\pm 45^\circ - 45^\circ \cos \varphi)$ описывает ДН в виде кардиоиды. При $\psi = +90^\circ$ и $\varphi = 0^\circ$ этот множитель обращается в единицу; при $\varphi = 180^\circ$ он обращается в нуль.

Таким образом, в направлении $\varphi=0^\circ$ напряженность поля удваивается по сравнению с полем одиночного вибратора, возбуждаемого током, одинаковым с текущим по одному из связанных вибраторов. ДН в этом случае имеет вид, представленный на рис.1.5. Такое увеличение в одном направлении происходит за счет уменьшения поля в других направлениях.

При $\psi = -90^\circ$ напряженность поля удваивается в обратном направлении ($\varphi = 180^\circ$); поле равно нулю в направлении $\varphi = 0^\circ$.

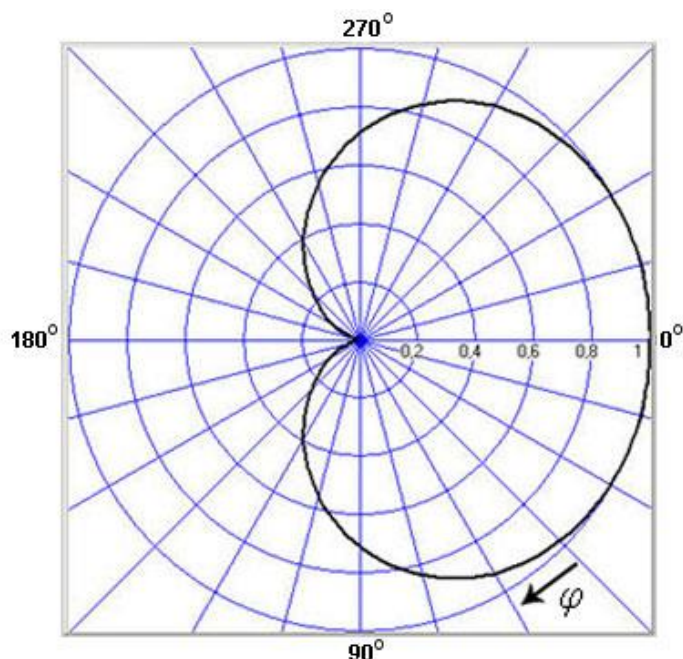


Рис.1.5. Диаграмма направленности двух связанных вибраторов в меридиональной плоскости

Вибратор, усиливающий излучение в направлении на другой вибратор и ослабляющий излучение в обратном направлении, называется рефлектором (рис.1.6.а). Чтобы рефлектирующее действие вибратора было полным (в одном направлении поле увеличивается, а в противоположном – равно нулю), в рассматриваемом случае ($d = \lambda/4$) токи в обоих вибраторах должны быть равны по величине ($q = 1$), а ток в рефлекторе должен опережать ток во втором связанном вибраторе на 90° .

Вибратор, ослабляющий излучение в направлении на другой вибратор и усиливающий излучение в противоположном направлении, называется директором (рис.1.6.б). В идеальном случае директор должен работать в режиме: $q = 1$; $\psi = -\pi/2$ (при $d = \lambda/4$).

В обоих случаях напряженность поля увеличивается в направлении отставания фазы возбуждающего тока. Получить однонаправленное излучение можно и при расстояниях между вибраторами, отличных от $\lambda/4$. Условием отсутствия излучения в направлении $\varphi = 180^\circ$ является $\psi + kd = 180^\circ$. Для выполнения этого условия при $d < \lambda/4$ угол сдвига фаз ψ должен быть больше 90° . Хотя ДН при этом оказывается однонаправленной и максимум излучения лежит в направлении $\varphi = 0^\circ$, однако напряженность поля в этом направлении не удваивается. Чем ближе друг к другу расположены вибраторы, тем меньшая напряженность поля получается в направлении максимального излучения (считая, что при изменении d величина тока в вибраторах постоянна).

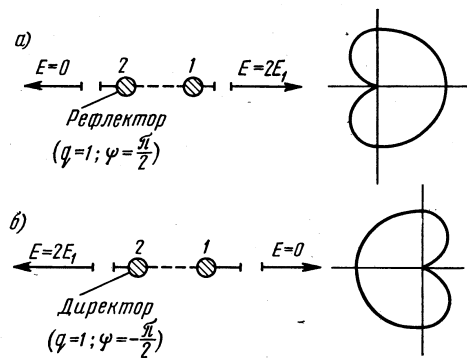


Рис.1.6. ДН системы с рефлектором (а) и директором (б)

Возбуждение каждого из двух связанных вибраторов токами, сдвинутыми по фазе, усложняет систему питания. Поэтому в большинстве случаев вибраторы, выполняющие роль рефлекторов или директоров, не содержат источников питания (генераторов), т.е. являются пассивными. Они возбуждаются электромагнитным полем активного (питаемого) вибратора. В случае пассивных вибраторов не удастся осуществить режим, обеспечивающий полное рефлекторное или директорное действие, так как не удастся получить совместно $q = 1$ и $\varphi = 90^\circ$. Поэтому не получается полного удвоения поля в главном направлении и нулевого излучения – в обратном.

1.3. Директорная антенна

Директорная антенна (она же антенна «волновой канал»), несмотря на большое развитие современной антенной техники, по-прежнему остается одним из основных типов антенн, используемых в различных беспроводных системах телекоммуникации. Это связано с простотой ее конструкции и относительно высокими направленными свойствами.

К недостаткам директорной антенны относится трудность подбора размеров вибраторов и расстояния между ними, кроме того, эта антенна является узкополосной, вследствие того, что ее направленность в большей степени определяется фазовыми соотношениями, зависящими от частоты.

В качестве примера рассмотрим шестиэлементную директорную антенну, изображенную на рис.1.7. Антенна состоит из одного активного петлевого вибратора, к которому подводится питание от источника высокочастотного тока с помощью коаксиального фидера, одного пассивного рефлектора и четырех пассивных директоров. Пассивные вибраторы возбуждаются полем активного вибратора. Все вибраторы расположены в одной плоскости (в данном случае в вертикальной) и параллельны друг другу.



Рис.1.7. Директорная антенна

Функция рефлектора – отражать электромагнитное поле, излучаемое активным вибратором в его направлении. Функция директоров – усиливать поле в своем направлении.

Таким образом, система вибраторов в директорной антенне обеспечивает направленное излучение от рефлектора к директорам. Количество директоров определяет КУ антенны и может достигать десяти штук и более, но чаще всего используют не более пяти. Рефлектор обычно ставится один, либо применяются плоские или многоэтажные его разновидности.

Пассивные вибраторы крепятся к направляющей без изоляторов, даже если она металлическая, на процесс излучения это никак не влияет. Чаще всего активный вибратор в директорной антенне делается петлевым. В этом случае и он крепится к металлической направляющей без изолятора – верхняя вторая часть вибратора приваривается к ней.

Принцип работы директорной антенны основывается на том, что поля от каждого вибратора в направлении главного излучения (в сторону директоров) складываются синфазно. Это происходит при условии отставания фазы тока в каждом директоре относительно тока в активном вибраторе. Чтобы рефлектор ограничивал излучение в своем направлении, необходимо создать условие опережения фазы тока в нем относительно тока в активном вибраторе.

Последовательное расположение вибраторов, поля от которых в одном (главном) направлении складываются синфазно, а в обратном противофазно (что приводит к отсутствию излучения в этом направлении) позволяет сказать, что директорная антенна представляет собой антенную решетку осевого излучения (или бегущей волны). Поскольку вибраторы располагаются близко друг от друга, они наводят друг в друге дополнительные токи, которые необходимо учитывать при построении и настройке антенны. Соответственно, поле, в котором находятся пассивные вибраторы, сложное, состоящее из поля излучения и поля индукции. Эти поля, к тому же, усложняются взаимодействием активного и пассивных вибраторов.

Существенно и то, что ток в пассивных вибраторах всегда меньше тока в активном. Исходя из этого, описание процессов, происходящих в директорной антенне, громоздкое, требует использования сложного математического аппарата и определенных эмпирических подходов.

ДН антенны, состоящей из активного и пассивного вибраторов, зависит от угла сдвига фазы ψ тока в пассивном вибраторе относительно тока в активном. Этот угол равен сумме углов сдвига фазы напряжения, наводимого в пассивном вибраторе, относительно тока в активном вибраторе (ψ_1) и сдвига фазы тока в пассивном вибраторе относительно напряжения, наводимого в этом вибраторе (ψ_2), т.е. $\psi = \psi_1 + \psi_2$. Угол ψ_1 зависит от расстояния между вибраторами d , а угол ψ_2 определяется длиной пассивного вибратора, т.е. степенью отклонения его от резонанса.

С увеличением расстояния d между вибраторами напряжение U_n , наводимое в пассивном вибраторе при неизменном токе активного вибратора, уменьшается по величине и в большей степени отстает по фазе (ψ_1) от тока в активном вибраторе.

Существуют вполне определенные значения d , ψ_1 , и ψ_2 , при которых пассивный вибратор наиболее эффективно работает как рефлектор или директор. Например, для получения эффекта рефлектора целесообразно установить:

$$d = 0,15\lambda \ (\psi_1 = -180^\circ; \psi_2 = 40^\circ);$$

$$d = 0,2\lambda \ (\psi_1 = -195^\circ; \psi_2 = 40^\circ).$$

Пассивный вибратор наиболее успешно работает как директор:

$$d = 0,1\lambda \ (\psi_1 = -165^\circ; \psi_2 = 20^\circ);$$

$$d = 0,15\lambda \ (\psi_1 = -180^\circ; \psi_2 = 40^\circ).$$

Ток в рефлекторе отстает по фазе от наводимого в нем напряжения, а ток в директоре опережает по фазе напряжение на нем. Следовательно, рефлектор должен иметь характер индуктивного сопротивления, а директор – емкостного. Для этого при настроенном в резонанс полуволновом активном вибраторе рефлектор должен быть несколько длиннее, а директор несколько короче половины длины волны.

Входное сопротивление активного вибратора под влиянием пассивного вибратора оказывается, как правило, меньше сопротивления излучения одиночного полуволнового вибратора. Это затрудняет согласование антенны с фидером, в связи с чем в качестве активного вибратора директорной антенны часто используют петлевой вибратор с повышенным значением R_Σ .

Форма ДН директорной антенны зависит от числа вибраторов, в частности, от числа директоров. Как было сказано выше, увеличение числа директоров способствует усилению направленного действия антенны. На

рис.1.8 показана ДН в меридиональной плоскости директорной антенны с девятью директорами.

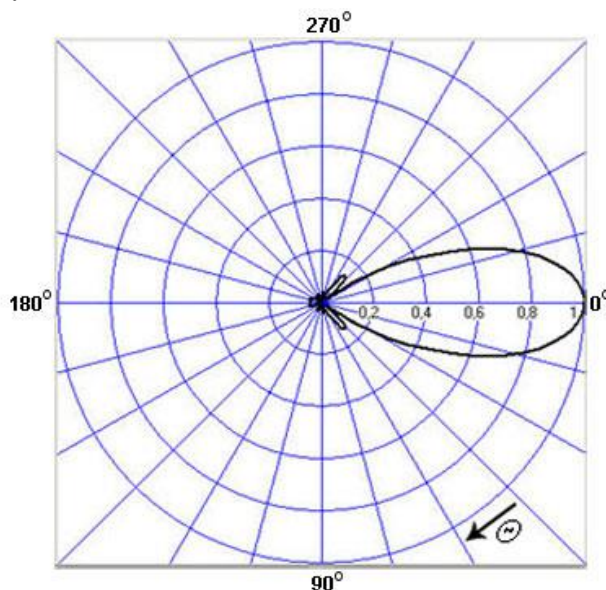


Рис.1.8. Диаграмма направленности директорной антенны в меридиональной плоскости

Формула для определения КНД директорной антенны оптимальных размеров имеет вид

$$D = k_l * (l_a / \lambda),$$

где l_a – общая длина антенны (от рефлектора до крайнего директора);

$k_l = 5 \dots 10$ – коэффициент, зависящий от числа директоров.

При проектировании директорной антенны с повышенным КНД следует иметь в виду, что чем больше директоров в антенне, тем труднее обеспечить наиболее выгодные фазовые сдвиги между токами в вибраторах и тем меньше k_l . Обычно число директоров в антенне не превышает 10. При этом ширина главного лепестка ДН может составлять $2\varphi_0 = 20 \dots 40^\circ$, причем в вертикальной плоскости он несколько уже, чем в горизонтальной.

Однако, надо иметь в виду, что директорная антенна имеет оптимальную длину, и последующее увеличение количества директоров приведет к ухудшению ее направленных свойств. Кроме того, с увеличением количества директоров уменьшается рабочий диапазон антенны.

Так как каждый дополнительный вибратор в антенне изменяет характер ее поля, то оптимальные размеры антенны с несколькими директорами отличаются от оптимальных размеров антенны с двумя вибраторами.

Обычно расстояние между активным вибратором и рефлектором выбирают в пределах $d_p = (0,15 \dots 0,25)\lambda_p$, а между активным вибратором и директором – $d_d = (0,1 \dots 0,15)\lambda_p$. Однако при окончательной сборке антенны требуется ее точная настройка путем нахождения таких расположений вибраторов, которые позволили бы получить наилучший результат – наибольшие значения КНД и коэффициента защитного действия (КЗД).

2. ЗАДАНИЯ ПО КОМПЬЮТЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №1 «КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИММЕТРИЧНЫХ ВИБРАТОРОВ»

1. Цель задания

В результате выполнения практического задания студент должен:

- *знать* конструктивные особенности симметричного вибратора, его направленные и электрические свойства, зависимость этих свойств от вида распределения тока по плечам вибратора и диаметра его проводников;
- *уметь* моделировать направленные и электрические характеристики симметричного вибратора с помощью программы MMANA;
- *приобрести навыки* в проведении исследований характеристик симметричного вибратора с помощью компьютерных программ.

2. Задание к работе

2.1. Для заданной частоты f определить размер полуволнового симметричного вибратора, выполненного из цилиндрических проводников (частота f , диаметр d_1 и тип материала проводников заданы в таблице П.1.1 Приложения 1).

2.2. Задать источник и параметры возбуждения симметричного вибратора (амплитуду и фазу тока).

2.3. Провести моделирование направленных и электрических характеристик симметричного вибратора на заданной частоте f .

2.4. Получить графики зависимостей входного сопротивления, коэффициента стоячей волны (КСВ), КУ и КЗД от частоты в полосе частот $\Delta f = 0,5f \dots 1,5f$.

2.5. Для заданной частоты f определить размер симметричного вибратора с относительной длиной $l/\lambda = 0,625$, выполненного из цилиндрических проводников (частота f , диаметр d_1 и тип материала проводников заданы в Приложении 1, в таблице П.1.1).

2.6. Повторить пункты 2.2 и 2.3.

2.7. Повторить пункты 2.1 и 2.3. с учетом изменения диаметра проводников симметричного вибратора (d_2 – в соответствии с вариантом задания).

2.8. Провести моделирование направленных и электрических характеристик свойств полуволнового петлевого симметричного вибратора (частота f , диаметр d_1 , расстояние между проводниками D и тип материала проводников заданы в Приложении 1, в таблице П.1.1).

2.9. Получить графики зависимостей входного сопротивления, КСВ, КУ и КЗД от частоты в полосе $\Delta f = 0,5f \dots 1,5f$.

2.10. Провести сравнительный анализ полученных результатов.

3. Порядок выполнения задания

3.1. Активировать программу ММАНА на компьютере.

3.2. Во вкладке «Геометрия» задать рабочую частоту, на которой будут проводиться исследования симметричного вибратора.

3.3. Во вкладке «Вычисления» задать тип окружающей среды (свободное пространство) и материал, из которого изготовлены проводники симметричного вибратора.

3.4. С помощью кнопки «Правка провода» перейти в соответствующую вкладку для построения модели вибратора.

3.5. Изобразить симметричный вибратор в определенной плоскости, задав в программе его геометрические размеры: длину плеч, диаметр проводников и расстояние между ними (определяются, исходя из варианта задания).

3.6. Вернувшись во вкладку «Геометрия», задать источник возбуждения вибратора (амплитуду и фазу).

3.7. Зайдя на вкладку «Вычисления» нажать кнопку «Пуск», получить результаты моделирования. Нажав кнопку «Диаграмма направленности», проанализировать полученные ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях и в трехмерном пространстве.

3.8. Определить ширину главного лепестка ДН по нулевой и половинной мощностям.

3.9. Зайдя на вкладку «Вид», проанализировать характер распределения токов по плечам вибратора.

3.10. Во вкладке «Вычисления» нажать кнопку «Графики», в открывшемся окне провести исследования в требуемой полосе частот для значений входного сопротивления, КСВ, КУ и КЗД.

3.11. По результатам моделирования сделать выводы о направленных и электрических свойствах симметричных цилиндрического и петлевого вибраторов.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

4.1. Название задания, его цель и исходные данные для моделирования.

4.2. Результаты моделирования:

– ДН исследуемых симметричных вибраторов в горизонтальной и вертикальной плоскостях на заданной частоте;

– графики зависимости входного сопротивления, КСВ, КУ и КЗД от частоты в заданной полосе частот для исследуемых вибраторов;

4.3. Сравнительный анализ полученных результатов и основные выводы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2

«КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ СВЯЗАННЫХ ВИБРАТОРОВ»

1. Цель задания

В результате выполнения практического задания студент должен:

- *знать* особенности формирования однонаправленного излучения с помощью системы двух связанных симметричных вибраторов, зависимость ее направленных и электрических свойств от геометрических параметров и параметров возбуждения вибраторов;
- *уметь* моделировать направленные и электрические характеристики системы двух связанных вибраторов с помощью программы MMANA;
- *приобрести навыки* в проведении исследований характеристик системы из двух связанных вибраторов с помощью компьютерных программ.

2. Задание к работе

2.1. Для заданной частоты f определить размеры двух полуволновых симметричных вибраторов, выполненных из цилиндрических проводников (частота f , диаметр d_l и тип материала проводников заданы в таблице П.1.1 Приложения 1).

2.2. Задать расстояние между симметричными вибраторами r_0 и параметры их возбуждения (амплитуды и фазы токов), соответствующие режиму однонаправленного излучения.

2.3. Провести моделирование направленных и электрических характеристик системы двух связанных вибраторов на заданной частоте f .

2.4. Проанализировать полученную ДН и вид распределения токов по симметричным вибраторам.

2.5. Если ДН не удовлетворяет условиям однонаправленного излучения, провести коррекцию параметров возбуждения, межэлементного расстояния r_0 и длины вибраторов до получения наилучшего результата (наименьшее значение КЗД и наибольший КУ), повторив пункт 2.3.

2.6. Провести анализ полученных результатов и сделать вывод о влиянии размеров вибраторов и параметров их возбуждения на ДН системы двух связанных вибраторов.

3. Порядок выполнения задания

3.1. Активировать программу MMANA на компьютере.

3.2. Во вкладке «Геометрия» задать рабочую частоту, на которой будут проводиться исследования двух связанных вибраторов.

3.3. Во вкладке «Вычисления» задать тип окружающей среды (свободное пространство) и материал проводников симметричных вибраторов.

3.4. С помощью кнопки «Правка провода» перейти в соответствующую вкладку для построения модели системы двух связанных вибраторов.

3.5. Изобразить два симметричных вибратора в определенной плоскости, задав в программе их геометрические размеры: длины плеч, диаметры

проводников (определяются, исходя из варианта задания) и расстояние между вибраторами (определяется, исходя из требований однонаправленного излучения).

3.6. Вернувшись во вкладку «Геометрия», задать источники возбуждения вибраторов (амплитуды и фазы токов), соответствующие режиму однонаправленного излучения.

3.7. Зайдя на вкладку «Вычисления» нажать кнопку «Пуск», получить результаты моделирования. Нажав кнопку «Диаграмма направленности», проанализировать полученные ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях и в трехмерном пространстве.

3.8. Зайдя на вкладку «Вид», проанализировать характер распределения токов по плечам вибратора.

3.9. Если полученные результаты не удовлетворяют условиям однонаправленного излучения, изменить длину либо одного, либо обоих вибраторов, расстояние между ними и параметры возбуждения (амплитуды токов).

3.10. Повторить пункт 3.7.

3.11. По результатам моделирования сделать выводы о направленных свойствах системы двух связанных симметричных вибраторов.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

4.1. Название задания, его цель и исходные данные для моделирования.

4.2. ДН исследуемой системы двух связанных вибраторов в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

4.3. Эскиз системы связанных вибраторов с указанием размеров и параметров возбуждения.

4.4. Анализ полученных результатов и основные выводы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №3

«КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ»

1. Цель задания

В результате выполнения практического задания студент должен:

- *знать* особенности формирования однонаправленного излучения с помощью директорной антенны;
- *уметь* моделировать направленные и электрические характеристики директорной антенны с помощью программы MMANA;
- *приобрести навыки* в проведении исследований характеристик директорной антенны с помощью компьютерных программ.

2. Задание к работе

2.1. Для заданной частоты f определить размеры активного вибратора, пассивных рефлектора и директора (частота f , диаметр d_l и тип материала проводников заданы в таблице П.1.1 Приложения 1).

2.2. Задать расстояния между активным вибратором и пассивным рефлектором r_p и активным вибратором и пассивным директором r_d .

2.3. Провести моделирование направленных и электрических характеристик директорной антенны на заданной частоте f .

2.4. Проанализировать полученную ДН и вид распределения токов по элементам директорной антенны.

2.5. Если ДН не удовлетворяет условиям однонаправленного излучения, провести коррекцию размеров пассивных вибраторов, межэлементных расстояний r_p и r_d до получения наилучшего результата (наименьшее значение КЗД и наибольший КУ), повторив пункт 2.3.

2.6. Получить графики зависимостей входного сопротивления, КСВ, КУ и КЗД от частоты в полосе $\Delta f = 0,5f \dots 1,5f$.

2.7. Провести анализ полученных результатов и сделать вывод о параметрах и характеристиках директорной антенны и их зависимости от частоты.

3. Порядок выполнения задания

3.1. Активировать программу MMANA на компьютере.

3.2. Во вкладке «Геометрия» задать рабочую частоту, на которой будут проводиться исследования директорной антенны.

3.3. Во вкладке «Вычисления» задать тип окружающей среды (свободное пространство) и материал проводников элементов директорной антенны.

3.4. С помощью кнопки «Правка провода» перейти в соответствующую вкладку для построения модели директорной антенны.

3.5. Изобразить три вибратора в определенной плоскости, задав в программе их геометрические размеры: длины плеч, диаметры проводников (определяются, исходя из варианта задания) и расстояния между ними (определяется, исходя из требований однонаправленного излучения).

3.6. Вернувшись во вкладку «Геометрия», задать источник возбуждения активного вибратора (амплитуда тока).

3.7. Зайдя во вкладку «Вычисления» нажать кнопку «Пуск», получить результаты моделирования. Нажав кнопку «Диаграмма направленности», проанализировать полученные ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях и в трехмерном пространстве.

3.8. Зайдя во вкладку «Вид», проанализировать характер распределения токов по плечам вибратора.

3.9. Если полученные результаты не удовлетворяют условиям однонаправленного излучения, изменить длину либо пассивных, либо активного вибраторов, и расстояние между ними.

3.10. Повторить пункт 3.7.

3.11. Определить ширину главного лепестка ДН по нулевой и половинной мощностям.

3.12. Во вкладке «Вычисления» нажать кнопку «Графики», в открывшемся окне провести исследования директорной антенны в требуемой полосе частот для входного сопротивления, КСВ, КУ и КЗД.

3.11. По результатам моделирования сделать выводы о полученных направленных и электрических характеристиках директорной антенны.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

4.1. Название задания, его цель и исходные данные для моделирования.

4.2. ДН исследуемой директорной антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях, графики зависимости входного сопротивления, КСВ, КУ и КЗД от частоты в заданной полосе.

4.3. Эскиз директорной антенны с указанием ее геометрических размеров.

4.4. Анализ полученных результатов и основные выводы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Таблица П. 1.1

<i>Вариант</i>	<i>f (МГц)</i>	<i>d₁ (мм)</i>	<i>d₂ (мм)</i>	<i>D (мм)</i>	<i>материал</i>
1	500	10	20	60	Медь
2	525	12	18	60	Медь
3	550	11	17	55	Медь
4	575	15	21	55	Медь
5	600	13	22	55	Медь
6	625	12	23	50	Алюминий
7	650	10	22	50	Алюминий
8	675	9	16	50	Алюминий
9	700	8	14	45	Алюминий
10	725	12	24	45	Алюминий
11	750	10	16	45	Медь
12	775	7	18	45	Медь
13	800	6	24	40	Медь
14	825	9	21	40	Медь
15	850	10	16	40	Медь
16	900	7	22	35	Медь
17	925	9	17	35	Медь
18	950	13	24	35	Медь
19	975	12	25	35	Медь
20	1000	13	20	30	Медь
21	300	10	25	80	Алюминий
22	325	15	27	80	Алюминий
23	350	18	22	75	Алюминий
24	375	16	23	75	Алюминий
25	400	14	25	70	Алюминий
26	425	12	19	70	Алюминий
27	450	21	32	70	Алюминий
28	475	23	28	65	Медь
29	645	17	24	60	Медь
30	765	14	21	50	Медь

ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ «ММАНА»

Для расчета основных электрических и направленных характеристик антенн используется компьютерная программа **ММАНА**. Она позволяет проводить расчет электрических и направленных свойств антенн и их оптимизацию. Расчет производится методом моментов. Задавая определенный набор тонких проводов (т.е. саму антенну) программа строит ДН и рассчитывает основные параметры, такие как КУ, КСВ, КЗД и другие. Программа имеет возможность рассчитывать параметры антенны в реальных условиях: в ней можно выбрать материал проводников, высоту установки антенны, задавать параметры реальной среды и т.д.

Русифицированная версия программы **ММАНА** позволяет:

- создавать и редактировать описание антенны, как заданием координат, так и “мышкой”;
- рассматривать множество разных видов вибраторных антенн;
- рассчитывать характеристику направленности и строить ДН в вертикальной и горизонтальной плоскостях под любыми вертикальными углами;
- одновременно сравнивать результаты моделирования нескольких антенн;
- редактировать описание каждого элемента антенны, включая возможность менять форму элемента без сдвига его резонансной частоты;
- использовать удобное меню создания многоэтажных антенн – стеков;
- гибко настраивать процесс оптимизации антенны по входному сопротивлению $Z_{вх}$, КСВ, КУ.

На рис.П.2.1...2.4 приведены основные окна программы с примером моделирования симметричного вибратора.

На рис.П.2.1 показано первое окно программы, в котором задаются основные параметры моделируемой антенны: рабочая частота (или длина волны), геометрические размеры, параметры возбуждения (источники), нагрузки и их параметры. Кроме этого, по умолчанию задаются параметры программы расчета (окна «Автосегментация»), которые следует изменять очень осторожно.

На рис.П.2.2 показано второе окно программы, в котором демонстрируется модель антенны.

На рис.П.2.3 показано третье окно программы, где задаются параметры окружающего пространства (вкладка «Земля»), высота подвеса антенны, материал, из которого она изготовлена, а также выводятся результаты расчета.

На рис.П.2.4 показано четвертое окно программы, где приводятся построенные ДН в полярной системе координат (в горизонтальной и вертикальной плоскостях) и основные характеристики антенны.

Геометрия Вид Вычисления Диаграмма направленности

Имя Частота МГц ☐ в лямбдах

Проводов 1 Автосегментация: DM1 DM2 SC EC ☐ Не разрывать

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	-0.235	0.0	0.0	0.235	0.0	0.0	5.0	-1
след.								

Источников 1 ☐ Одинаковые источники

No.	PULSE	Phase dg	Volt. V
1	w1c	0.0	1.0
след.			

Нагрузок 0 ☐ Включить нагрузки

No.	PULSE	Type	L(uH)	C(pF)	Q	F(MHz)
след.						

Рис.П.2.1. Первое основное окно программы MMANA «Геометрия»

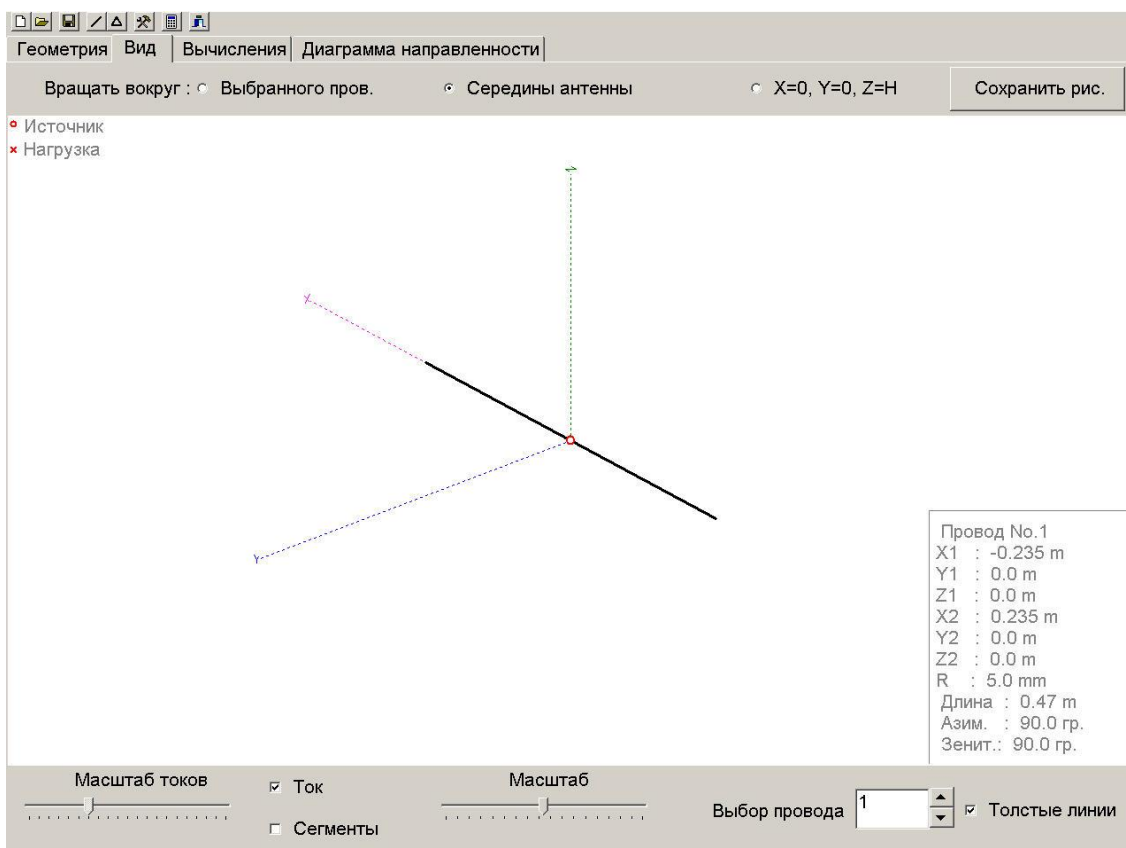


Рис.П.2.2. Второе основное окно программы MMANA «Вид»

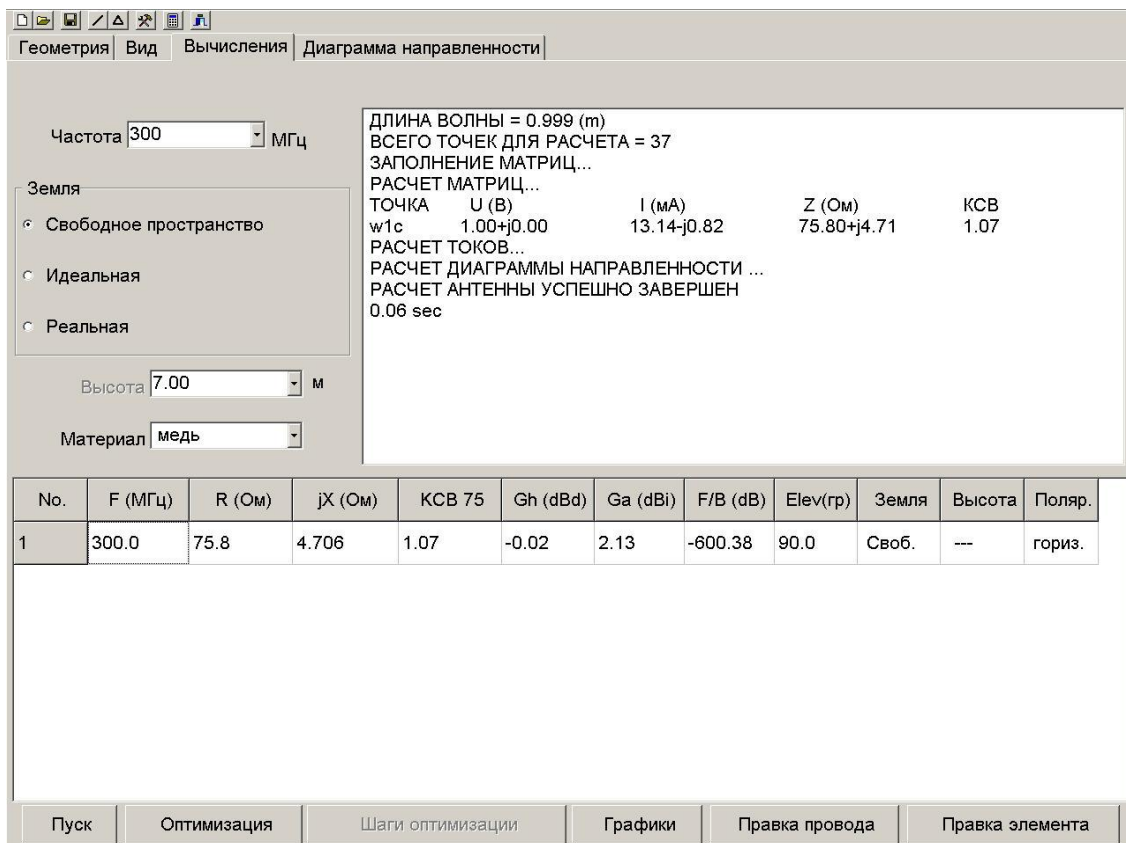


Рис.П.2.3. Третье основное окно программы MMANA «Вычисления»

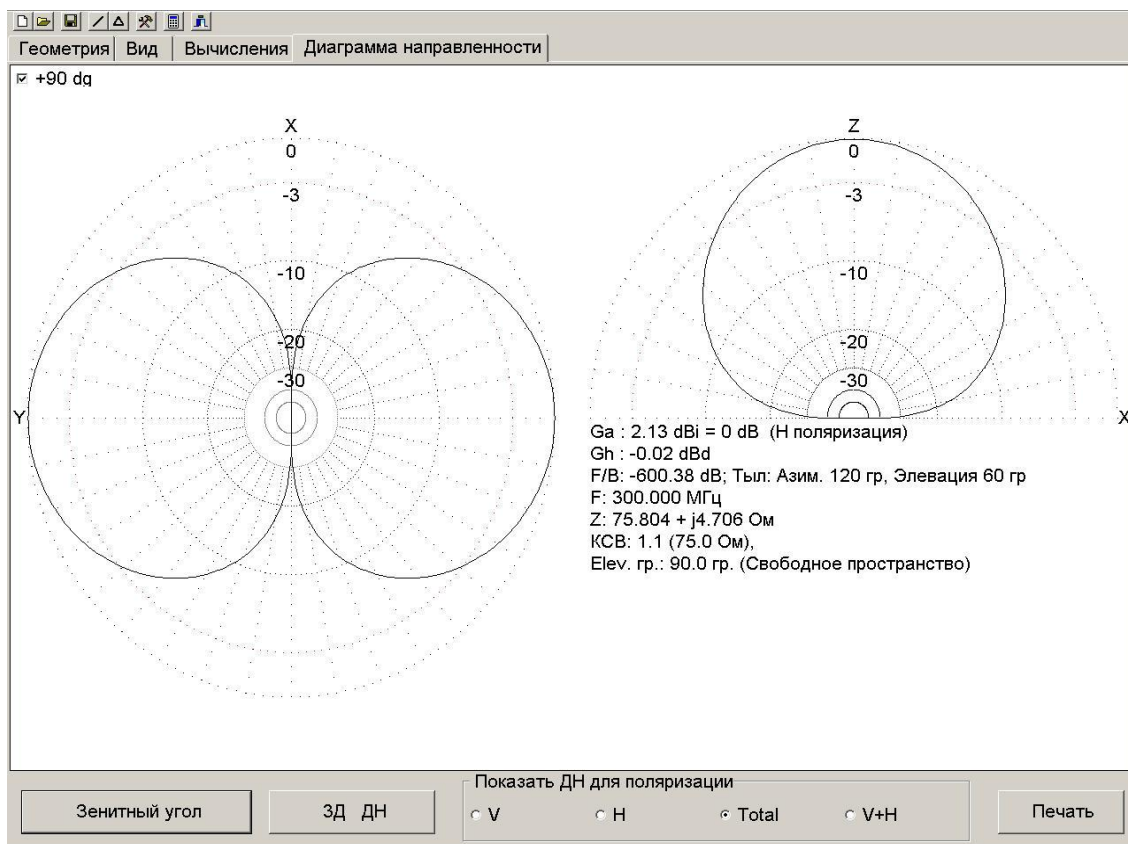


Рис.П.2.4. Четвертое основное окно программы MMANA «Диаграмма направленности»

Задавать параметры модели и создавать ее вид, можно несколькими путями: либо заполняя таблицу координат проводников, из которых состоит антенна, либо рисуя с помощью мышки проводники непосредственно в окне «Правка провода», либо задавая координаты проводников в специальном окне, которое находится в том же окне «Правка провода».

Окно «Правка провода» состоит из четырех окон (вкладок), каждое из которых соответствует определенной плоскости прямоугольной системы координат. Таким образом, моделировать антенну, добавляя, удаляя или изменяя их длину можно в любой из этих плоскостей.

На рис.П.2.5 показано окно «Правка провода» для представления модели в трехмерном пространстве.

На рис.П.2.6 показано окно «Правка провода» для представления модели в плоскости XOY.

На рис.П.2.7 показано окно «Правка провода» для представления модели в плоскости XOZ.

На рис.П.2.8 показано окно «Правка провода» для представления модели в плоскости YOZ. В этих же окнах можно рисовать модель антенны с помощью мыши, активировав при этом кнопку «Создать провод», либо «Создать рамку».

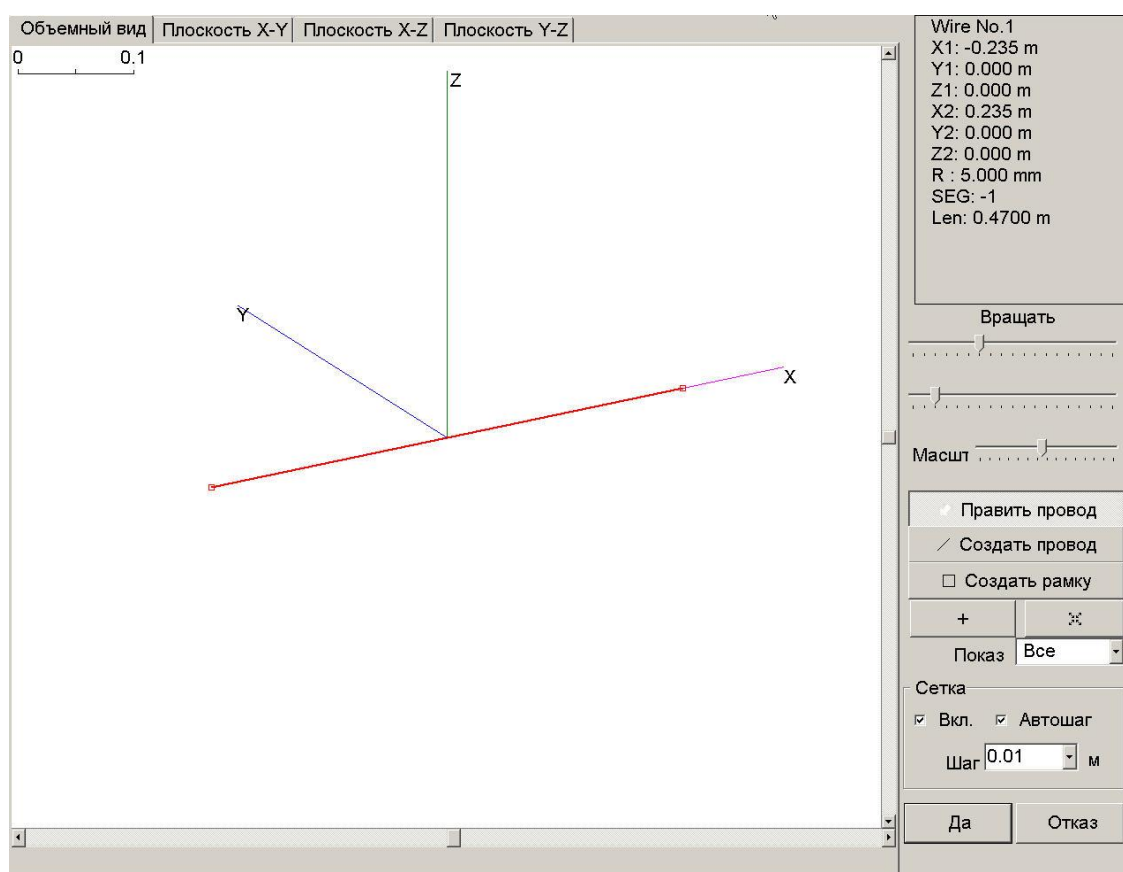


Рис.П.2.5. Окно «Правка провода», вкладка «Объемный вид»

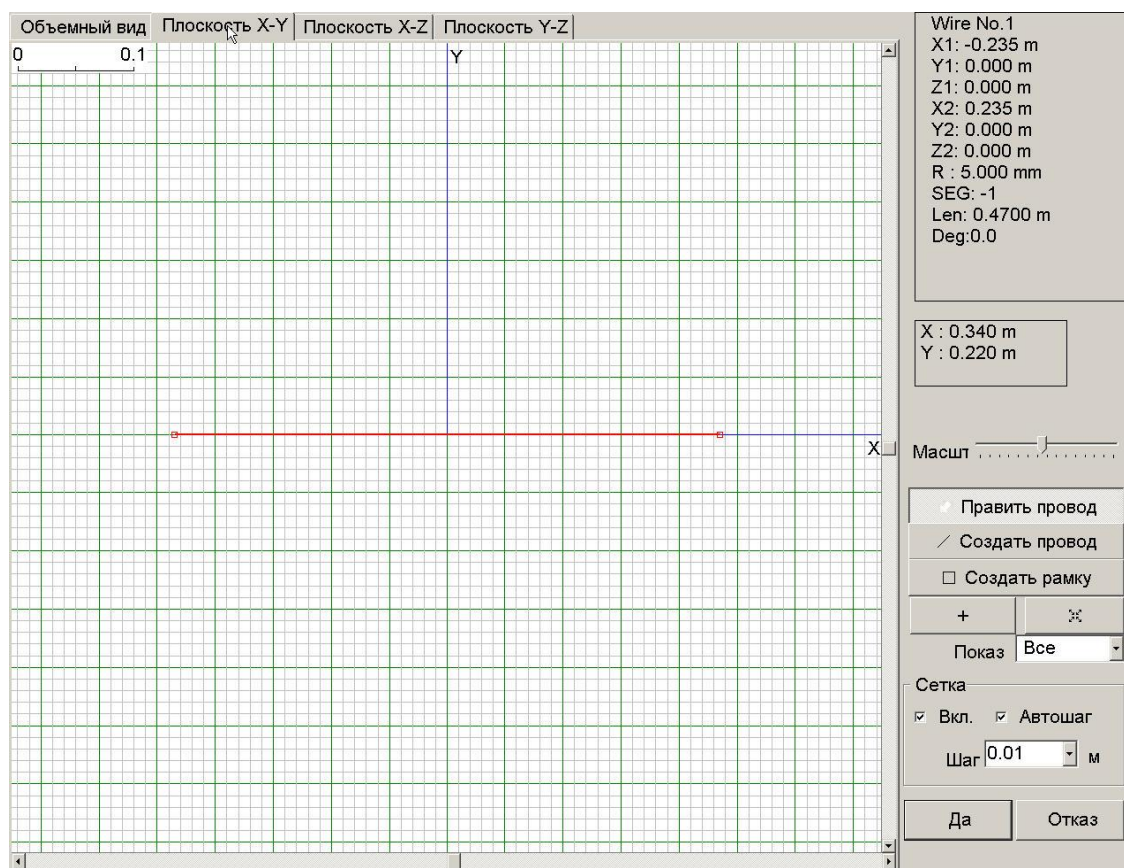


Рис.П.2.6. Окно «Правка провода», вкладка «Плоскость XOY»

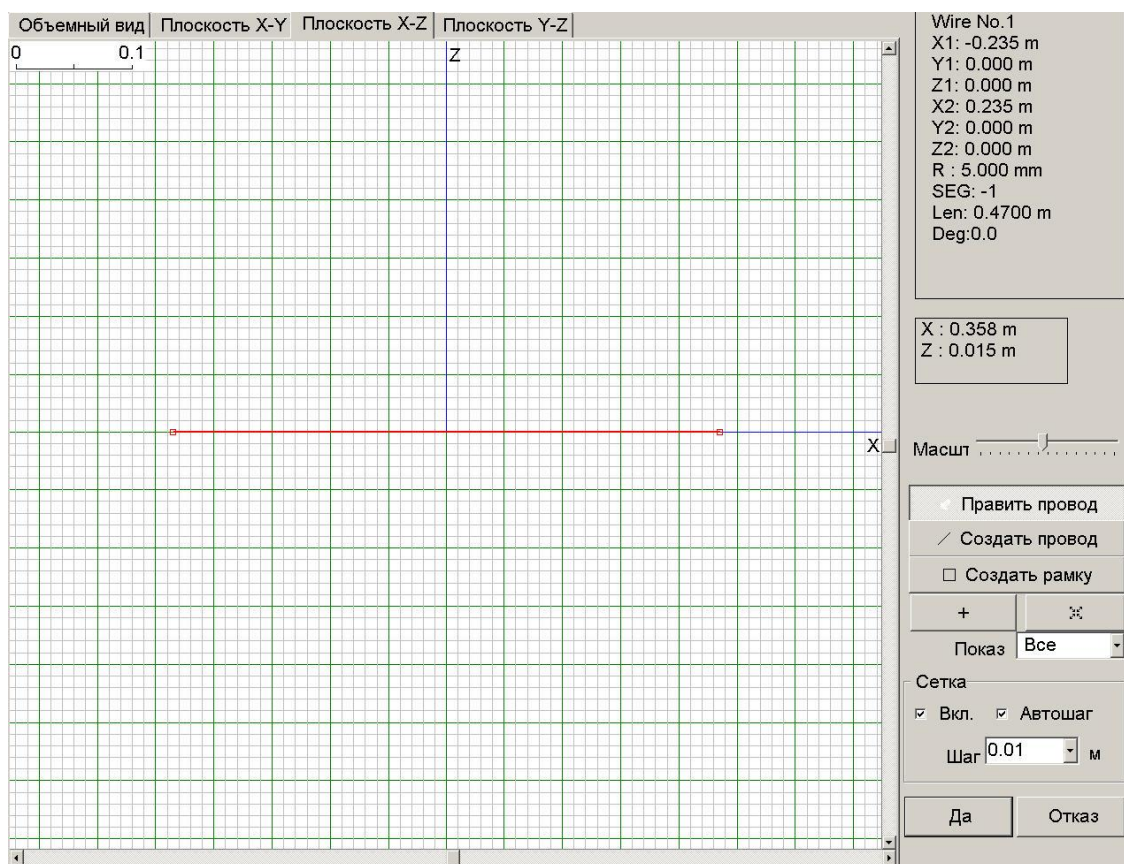


Рис.П.2.7. Окно «Правка провода», вкладка «Плоскость XOZ»

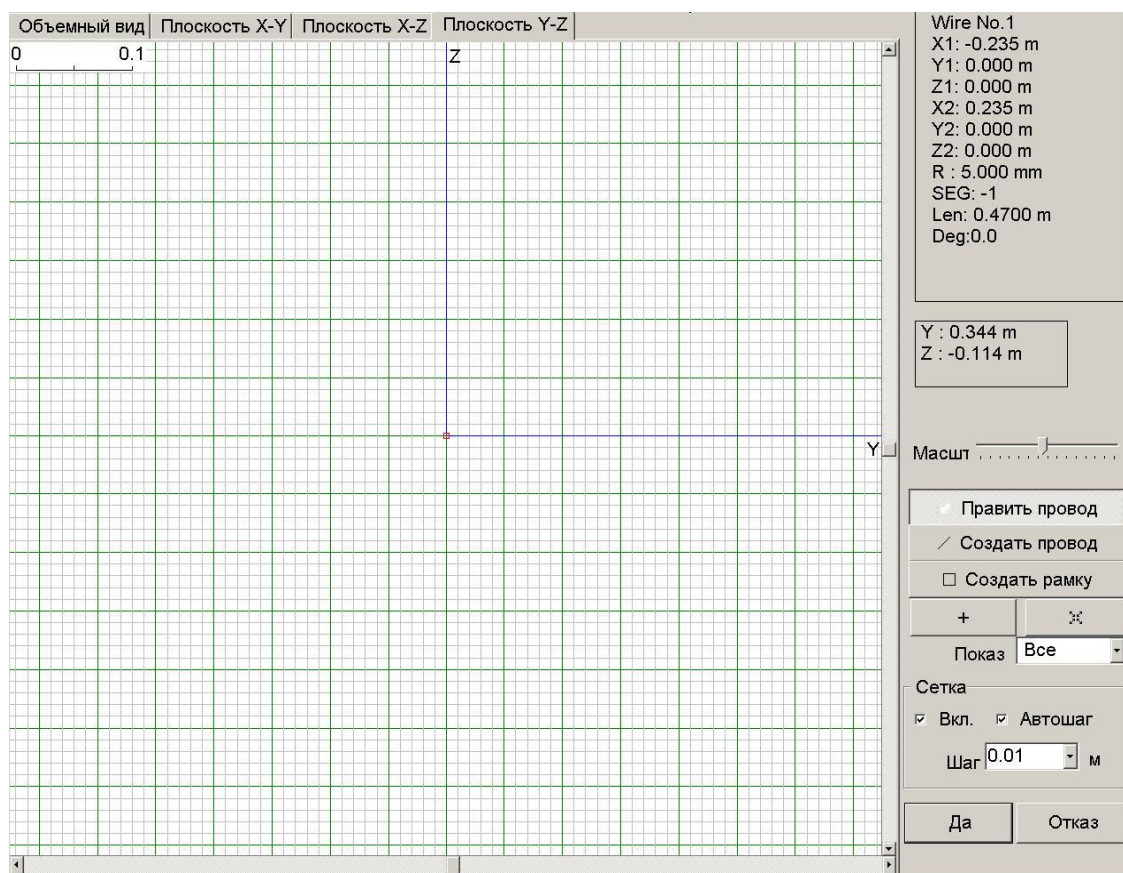


Рис.П.2.8. Окно «Правка провода», вкладка «Плоскость YOZ»

Кроме основных программа MMANA имеет дополнительные окна, в которых отображается информация, связанная как с задаваемыми параметрами, так и с результатами моделирования направленных и электрических свойств исследуемых антенн. Так, например, программа выдает такие параметры, как КСВ, КЗД, значения входного сопротивления моделируемой антенны.

На рис.П.2.9 показано окно зависимостей активного и реактивного сопротивлений от частоты. Частотный диапазон задается в форме «Полоса» в том же окне. Там же можно задать дополнительные параметры расчета. На рис.П.2.10 показано окно зависимости КСВ от частоты. На рис.П.2.11 показано окно зависимостей КУ (в дБ) и КЗД (в дБ) антенны от частоты. На рис.П.2.12 показано окно, в котором отображаются построенные ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В последнем дополнительном окне «Установки» задаются значения средней частоты расчета («Центральная частота»), предел изменения КСВ («Предел КСВ»), дополнительные точки расчета («Дополнительные точки»), установки согласования («Установки согласования»), частота согласования («Частота согласования»).

В заключение следует отметить, что периодически выходят обновления программы MMANA, улучшающие ее интерфейс и обладающие дополнительными возможностями. Однако основные принципы работы программы остаются неизменными.



Рис.П.2.9. Окно зависимостей значений активного и реактивного сопротивлений от частоты



Рис.П.2.10. Окно зависимости значений KCB от частоты



Рис.П.2.11. Окно зависимостей значений коэффициента усиления и коэффициента защитного действия от частоты

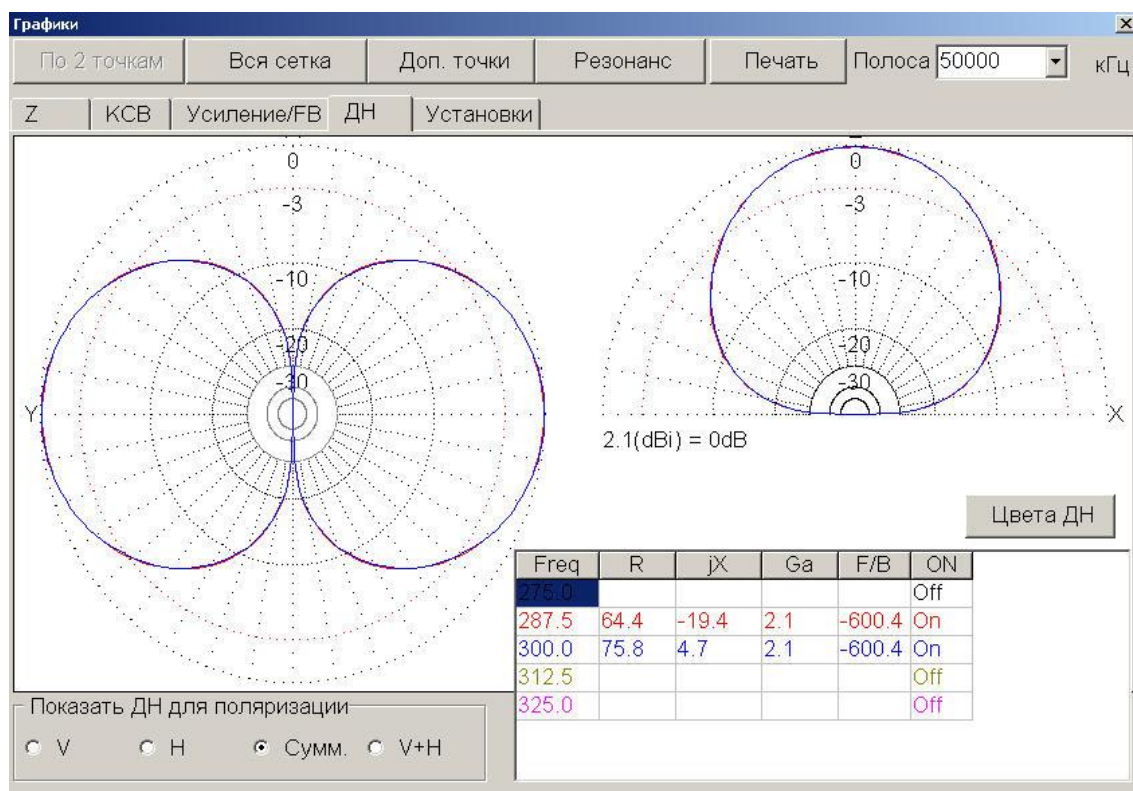


Рис.П.2.12. Окно полученных диаграмм направленности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерохин Г.А., Чернышев О.В. и др. Антенно–фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004.
2. Constantine A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley-Interscience, 3 edition, 2005.
3. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Компьютерное моделирование. ММАН. М.: ИП РадиоСофт, Радио, 2004.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

по дисциплинам
«Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства»
и «Распространение радиоволн и антенны мобильной связи»

Рассмотрено на заседании кафедры СТРВ
(протокол № от апреля 2014г.)
и рекомендовано к печати.

Рассмотрено на Научно–методическом совете ФТТ
(протокол № от мая 2014г.)
и рекомендовано к печати.

Составитель доц. Губенко В.А.
Отв. редактор доц. Ликонцев Д.Н.
Корректор Абдуллаева С.Х.