

Министерство образования и науки РФ

Федеральное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Южный федеральный университет

Физический факультет

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

по курсу «Антенно-фидерные устройства»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

г. Ростов-на-Дону

2017 г

Методическое пособие разработано кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры радиофизики ЮФУ С.А. Федоровым.

Методические указания разработаны кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры радиофизики ЮФУ С.А. Федоровым. Ответственный редактор доктор физико-математических наук, профессор Заргано Г.Ф.

Печатается в соответствии с решением кафедры радиофизики физического факультета ЮФУ, протокол № 13 от 30.01.2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ
Ч. 1 Вибраторные антенны

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ДН ПРОИЗВОЛЬНОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ.....	6
2. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И ДН ВИБРАТОРНЫХ АНТЕН.....	7
3. СТРОГОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕН.....	10
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	17
5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	18

ВВЕДЕНИЕ

Вибраторные антенны относятся к классу антенн с линейными токами. Они применяются уже более ста лет как самостоятельные излучатели и элементы антенных решеток. Преимущества вибраторных антенн: простота конструкции, возможность непосредственного согласования (без дополнительных согласующих устройств) со стандартным кабелем с волновым сопротивлением 75 Ом.

Симметричный вибратор показан на рис. 1а.

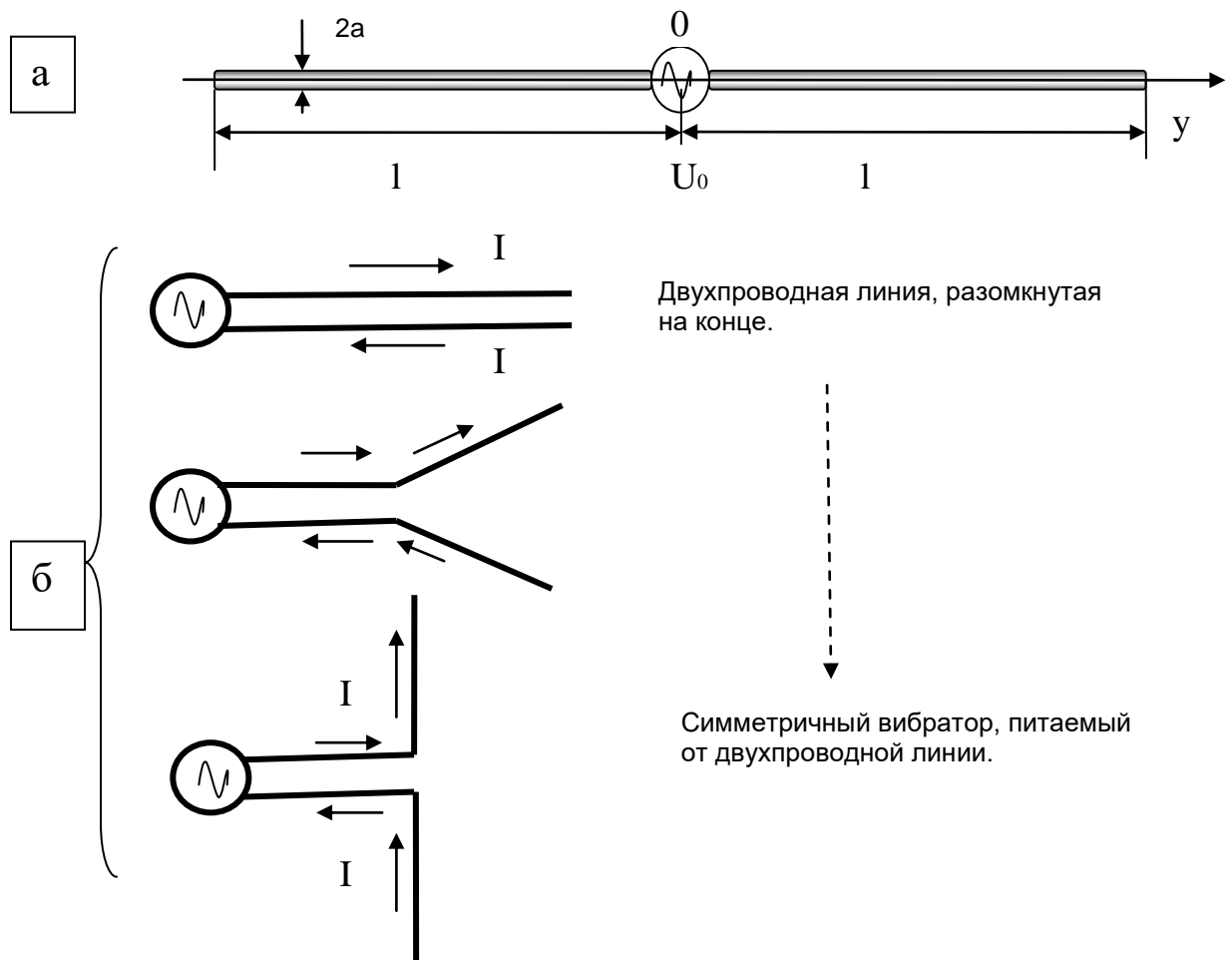


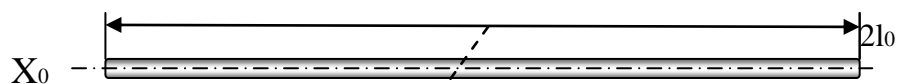
Рис. 1 Вибраторные антенны.

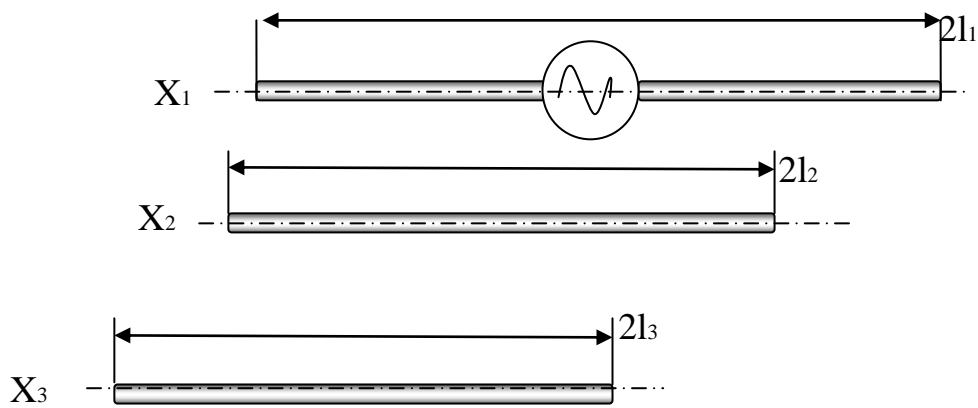
а. Симметричный вибратор.

б. Трансформация двухпроводной линии, разомкнутой на конце, в симметричный вибратор, питаемый от двухпроводной линии.

Симметричные вибраторы можно рассматривать, как результат последовательной трансформации двухпроводной линии, разомкнутой на конце (рис. 1б). В отличие от двухпроводной линии направление токов на плечах вибратора одинаково, что и объясняет его эффективность, как антенны.

Директорные антенны (рис. 2) содержат один активный вибратор и несколько пассивных. Пассивный элемент, имеющий длину больше, чем





x

Рис. 2. 4-х элементная директорная антенна.

активный, называется рефлектором (отражающим элементом). Пассивные вибраторы, имеющие длину меньше, чем активный, называются директорами (направляющими элементами). Рефлектор обычно используют один. Количество директоров колеблется от единицы до 10 – 15.

В директорной антенне излучение всех вибраторов усиливается в направлении оси x и компенсируется в противоположном направлении, то есть формируется направленная волна. Поэтому такую антенну еще называют «волновой канал». Иногда используется название: антенна Уда-Яги по фамилиям японских инженеров впервые предложивших такую антенну.

1. ДН ПРОИЗВОЛЬНОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ

На больших расстояниях r_0 от антенны (рис. 3):

$$r_0 \geq \frac{2L^2}{\lambda} \tag{1}$$

электромагнитное поле антенны является полем излучения (не связанным с антенной). В (1) L – максимальный размер антенны, λ – длина волны. Условие (1) определяет дальнюю зону. В дальней зоне излучение от отдельных участков антенны приходит в виде параллельного пучка плоских волн.

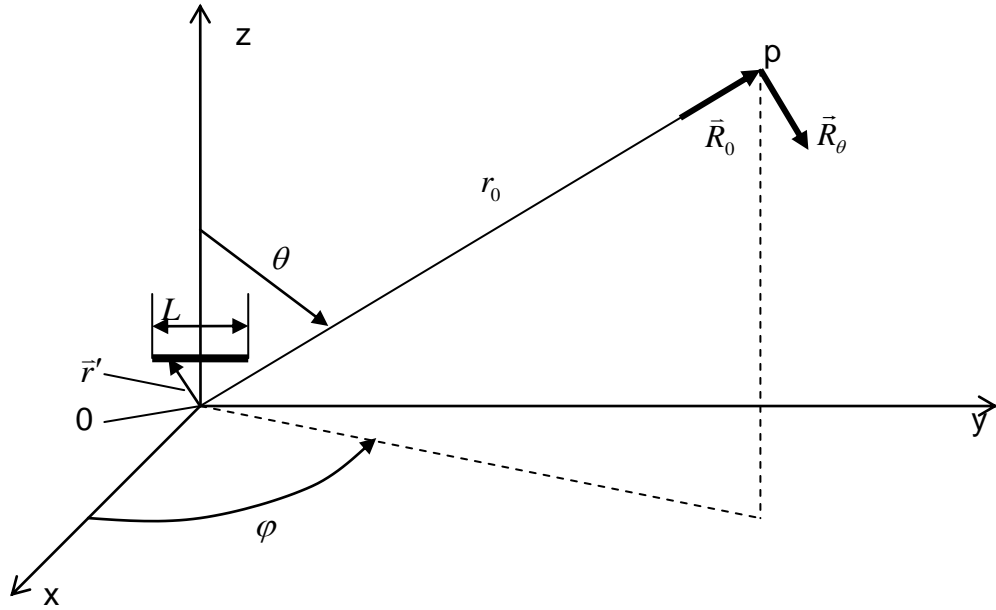


Рис. 3.

В дальней зоне вектор напряженности электрического поля $\vec{E}(p)$ в точке наблюдения p определяется по формуле [1 – 4]:

$$\vec{E}(p) = -j\omega\mu_0\mu \frac{\exp(-jkr_0)}{4\pi r_0} \vec{F}(\varphi, \theta) \quad (2)$$

В (2) $j = \sqrt{-1}$, ω – круговая частота, $\mu_0 = \frac{1}{4\pi} 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ – магнитная проницаемость свободного пространства, μ – относительная магнитная проницаемость, φ, θ – углы сферической системы координат (рис. 3), $k = 2\pi / \lambda$, λ – длина волны в свободном пространстве, $\vec{F}(\varphi, \theta)$ – функция диаграммы направленности (ДН):

$$\vec{F}(\varphi, \theta) = \oint_S \left\{ \vec{j}_s^e - \vec{R}_0 (\vec{j}_s^e, \vec{R}_0) - \frac{1}{\rho_0} [\vec{R}_0, \vec{j}_s^m] \right\} \exp(jk(\vec{r}', \vec{R}_0)) dS \quad (4)$$

Здесь \vec{r}' – радиус-вектор точки интегрирования. В (4) \vec{j}_s^e, \vec{j}_s^m – плотности поверхностных электрических и магнитных токов на металлических поверхностях антенны.

Как следует из (3), ДН определяет поведение вектора напряженности электрического поля \vec{E} на поверхности сферы в дальней зоне. В соответствии с

(4), ДН не имеет проекции на направление распространения \vec{R}_0 , не зависит от расстояния до точки наблюдения r_0 и определяется геометрией антенны и распределениями электрических и магнитных токов на проводниках антенны.

Для проволочных антенн с линейными токами формула для ДН (3) записывается следующим образом:

$$\vec{F}(\varphi, \theta) = \int_{-L}^L \left\{ \vec{I}_0^e - \vec{R}_0 (\vec{I}_0^e \cdot \vec{R}_0) \right\} I(l) \exp[jk(\vec{r}', \vec{R}_0)] dl \quad (4)$$

Здесь \vec{I}_0^e – единичный вектор, направленный вдоль направления тока в проводнике, $I(l) = 2\pi a j_s^e$ – сила осевого тока, a – радиус проводника. Магнитные токи на идеально проводящей поверхности линейного проводника отсутствуют. Поэтому в (4) нет слагаемого, содержащего магнитные токи.

2. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И ДН ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН.

Волны тока, возбужденные на проводниках вибратора в точках питания, распространяются в направлении концов вибратора, где эти волны отражаются в обратном направлении. Таким образом, на проводниках вибратора возникает стоячая волна тока подобно стоячей волне тока в длинной линии, разомкнутой на конце:

$$I(l) = I_n \sin[k(l - |y|)]. \quad (5)$$

В (5) I_n – сила тока в пучности (в максимуме). Формула (5) не учитывает уменьшения амплитуд волн тока при распространении вследствие излучения энергии, что справедливо только для тонких вибраторов $a \ll L$ [1,2]. Типичные распределения тока для коротких и полуволновых $2\frac{l}{\lambda} \leq \frac{1}{2}$, волновых $2\frac{l}{\lambda} = 1$ симметричных вибраторов, а также вибраторов с длиной плеча $2\frac{l}{\lambda} = 1,25$

$\left(\frac{l}{\lambda} = \frac{5}{8}\right)$, показаны на рис. 4. Красным цветом на рис. 4 отмечена область возбуждения.

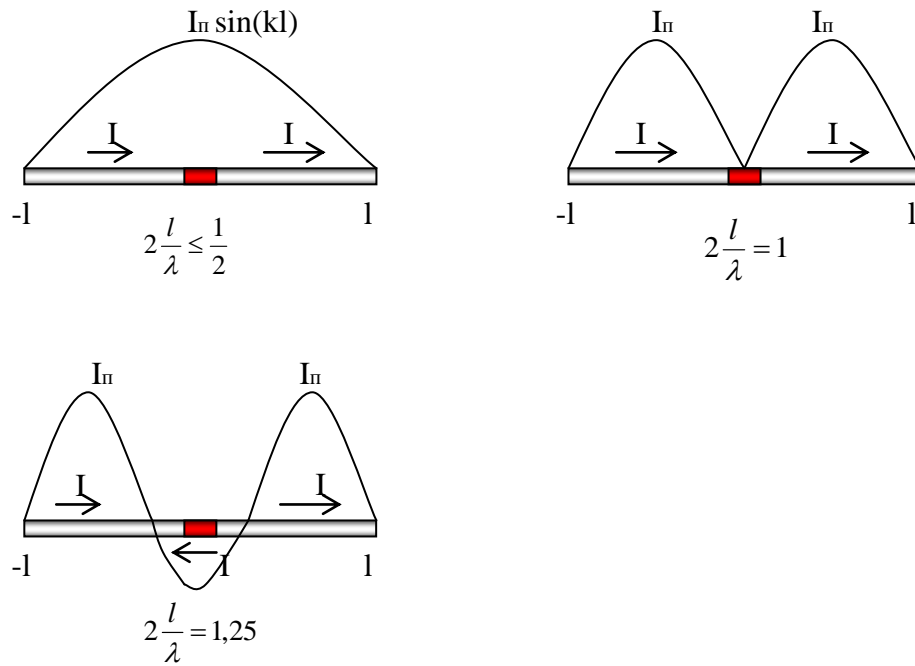


Рис. 4. Распределения тока на симметричных вибраторах.

Подставляя (5) в (4), находим ДН линейного вибратора, ориентированного вдоль оси z , в следующем виде:

$$\vec{F}(\theta) = -\vec{R}_\theta \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)}{\sin \theta}. \quad (6)$$

Типичные амплитудные ДН симметричных вибраторов, полученные с применением (6), показаны на рис. 5. Здесь для синей кривой $\frac{l}{\lambda} = 0,1$, зеленая кривая получена для полуволнового вибратора $2\frac{l}{\lambda} = \frac{1}{2}$, коричневая соответствует волновому вибратору $2\frac{l}{\lambda} = 1$, красная кривая получена при $2\frac{l}{\lambda} = 1,25$. Как следует из рассмотрения кривых рис. 5, амплитуда ДН быстро убывает при уменьшении длины плеча вибратора. Наибольшее значение максимума ДН достигается для волнового вибратора. Для вибратора с длиной плеча $5/8$ длины волны наблюдаются боковые лепестки ДН, связанные с противофазными токами (см. распределения тока на рис. 4).

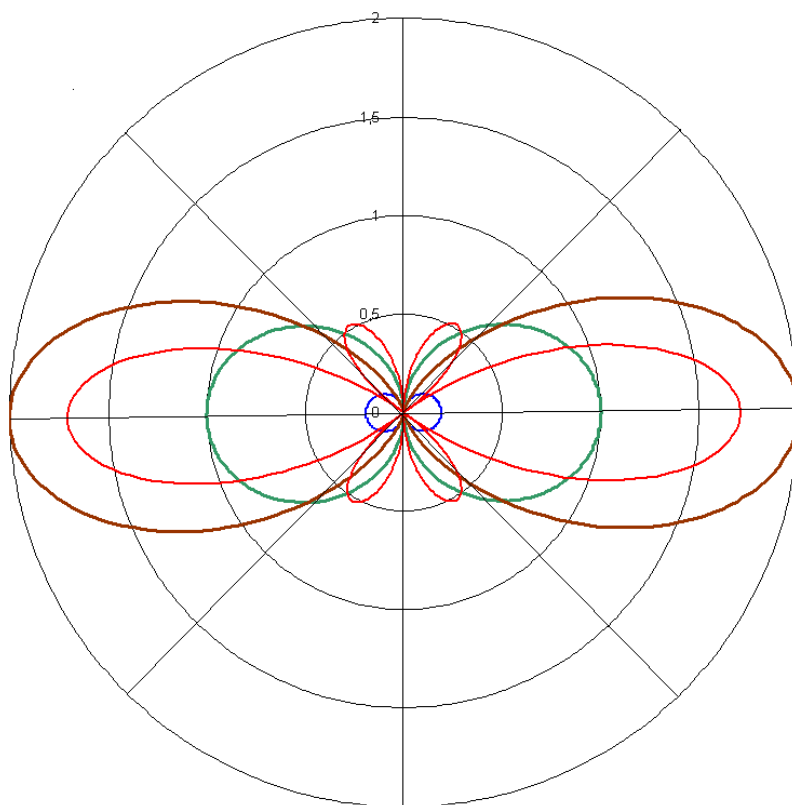


Рис. 5. ДН симметричных вибраторов.

Формулы (5) для распределения тока и (6) для ДН симметричных вибраторов широко применяются в инженерной практике. Погрешность этих формул тем меньше, чем тоньше вибратор.

Входное сопротивление симметричного вибратора в рамках рассмотренного приближенного подхода не определяется. Приближенные оценки входного сопротивления можно выполнить, вводя коэффициент затухания волн тока при их распространении вдоль вибратора [1 – 4], однако этот подход дает большую погрешность входного сопротивления. Поэтому ниже рассмотрен строгий подход к определению параметров вибраторных антенн.

3. СТРОГОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

Геометрия антенны в случае параллельных вибраторов показана на рис. 6. Длина плеч вибраторов равна l_n , $n=1,2,3,\dots,N$. N – число вибраторов. Ниже параметры антенны определяются в случае режима передачи (параметры антенны не зависят от вида режима: приема или передачи). Радиусы всех вибраторов одинаковы и равны $2a$. φ, θ – углы, определяющие направление излучения. $\vec{E}_\theta, \vec{E}_\varphi$ – векторные составляющие поля излучаемого поля. U_0 – напряжение на выходе передатчика, подключенного к антенне.

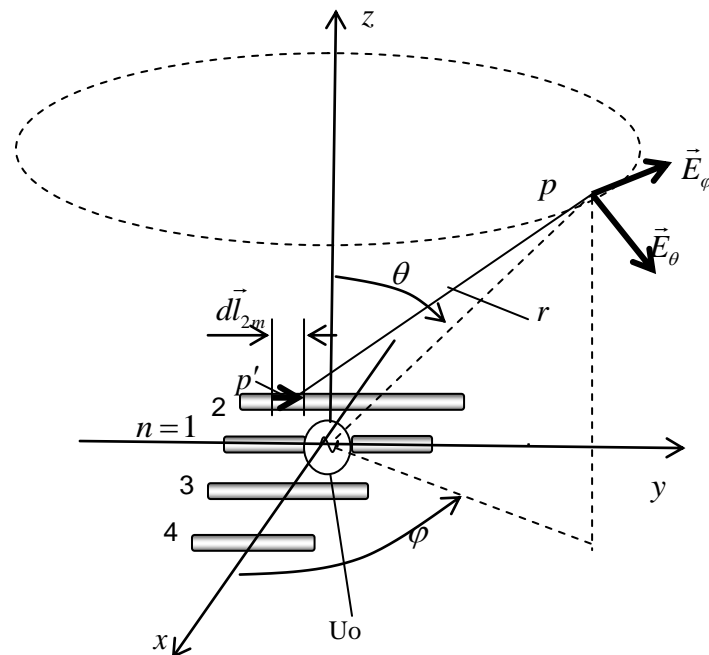


Рис. 6. Антенная решетка симметричных вибраторов в свободном пространстве.

Для определения параметров рассматриваемой антенны могут быть применены интегральные уравнения Галлена или Поклингтона [1 - 4]. Рассмотрим формулировку и решение задачи на примере уравнений Поклингтона.

Проводники каждого вибратора разобьем на отрезки одинаковой длины $d\vec{l}_{nm}$ (рис. 6). Направление этого вектора указывает направление тока. Элементы тока для вибратора решетки с номером $1 \leq n \leq N$ имеют номер m . При этом $1 \leq m \leq M_n$, где M_n - порядок аппроксимации тока на одном вибраторе АР. Комплексная амплитуда тока на каждом элементе в дальнейшем обозначена как J_{nm} ($n=1,2,3,\dots,N; m=1,2,3,\dots,M_n$) и считается постоянной. Вектор напряженности электрического поля «единичного» элемента тока с номерами m, n $\vec{E}_{nm}(p)$, созданный в произвольной точке p , определяется по формуле [2, 4]:

$$\vec{E}_{nm}(p) = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} (k^2 \vec{A}_{nm} + \text{grad div } \vec{A}_{nm}), \quad (n=1,2,3,\dots,N; m=1,2,3,\dots,M_n). \quad (1)$$

Здесь $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{M}$, $\vec{A}_{nm}(p)$ – потенциал элемента в точке наблюдения p :

$$\vec{A}_{nm}(p) = A_{nm}(p) \vec{y}_0. \quad (2)$$

В (1), (2)

$$A_{nm}(p) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\frac{dz}{2}}^{\frac{dz}{2}} \frac{\exp(-jkr)}{r} dz', \quad (3)$$

В (3) $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ – расстояние между точками источника p' и наблюдения p (рис. 6), $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число. Располагая точку наблюдения на оси вибраторов, из условия обращения в ноль касательной компоненты вектора напряженности электрического поля получаем из (1) интегральное уравнение. При этом точка наблюдения в (3) располагается на оси вибратора, точка источника – на его поверхности [1 - 4]. При таком рассмотрении подынтегральное выражение в (3) не имеет особенности. Переход к точному интегрированию (при этом точка наблюдения находится на поверхности вибратора) в (3) возникает только для вибраторов значительной толщины.

Итак, суммарное напряжение для каждого элемента тока $d\vec{l}_{n'm'}$ при расположении точки наблюдения $p_{n'm'}$ на вибраторе с текущим номером n' в

центре элемента тока с номером $1 \leq m' \leq M_{n'}$, от всех элементов тока удовлетворяет следующим условиям:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M J_{nm}(\vec{d}_{nm}, \vec{E}_{nm}(p_{n'm'})) = \begin{cases} 0 & \text{на проводниках.} \\ U_0 & \text{на входе антенны.} \end{cases} \quad (4)$$

$1 \leq m' \leq M_{n'}, n' = 1, 2, 3, \dots, N.$

Рассматриваются вибраторы, для которых в область входа попадает один элемент разбиения вибратора \vec{d}_{nm} .

В системах линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (4) количество уравнений равно числу неизвестных комплексных амплитуд силы тока на элементах антенны J_{nm} . Поскольку взаимные сопротивления элементов тока, образующих матрицы СЛАУ (4), быстро уменьшаются по модулю при удалении точки наблюдения от точки источника, эти матрицы квазидиагональны и, поэтому, хорошо обусловлены. Численное решение СЛАУ (4) с хорошо обусловленной матрицей устойчиво при уменьшении размеров элементов тока до нескольких сотых длины волны.

Таким образом, в данном случае амплитудно-фазовое распределение тока на проводниках антенны определяется при решении системы линейных алгебраических уравнений (4) для режима передачи. Длина элементов тока \vec{d}_{nm} при этом не должна превышать 0.1 длины волны на всех частотах рабочего диапазона.

ДН АР $\vec{F}(\varphi, \theta)$ находится после вычисления амплитудно-фазового распределения на проводниках антенны из (4) следующим образом:

$$\vec{F}(\varphi, \theta) = (\vec{R}_\theta \sin \theta \sin \varphi + \vec{R}_\varphi \cos \varphi) \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi} \sum_{n=1}^N F_n(\varphi, \theta) \exp(jk \sin \theta (x_n \cos \varphi + y_n \sin \varphi)). \quad (5)$$

В (5) $\vec{R}_\theta, \vec{R}_\varphi$ – единичные векторы сферической системы координат (рис. 6), x_n, y_n – координаты элементов антенны (рис. 6), $F_n(\varphi, \theta)$ – ДН вибратора с номером $1 \leq n \leq N$:

$$F_n(\varphi, \theta) = \sum_{m=1}^M J_{nm} \exp(jky_m \sin \theta \cos \varphi) dl. \quad (6)$$

Коэффициент направленного действия антенны $D(\varphi, \theta)$ (КНД), определяемый как отношение мощности, излучаемой ненаправленным источником к мощности, излучаемой направленным источником при условии, что оба источника создают одинаковую напряженность поля, вычисляется по формуле:

$$D(\varphi, \theta) = 30k^2 |\bar{F}(\varphi, \theta)|^2 / R_{\text{ex}} \quad (7)$$

Здесь $Z_{\text{ex}} = R_{\text{ex}} + jX_{\text{ex}}$ – входное сопротивление, Входное напряжение U_0 здесь и далее равно 1 В. Для нахождения коэффициента усиления антенны $G(\varphi, \theta)$ КНД (7) необходимо умножить на КПД [2]:

$$G(\varphi, \theta) = D(\varphi, \theta) \eta. \quad (8)$$

В (8) $\eta = 1 - |\Gamma|^2$ – КПД активного вибратора с учетом потерь на отражение,

$\Gamma = \frac{Z_{\text{ex}} - Z_0}{Z_{\text{ex}} + Z_0}$ – коэффициент отражения в фидере, Z_{ex} – входное сопротивление

антенны, Z_0 – волновое сопротивление фидера.

Ниже на рисунках 17 -22 показаны примеры результатов вычислений.

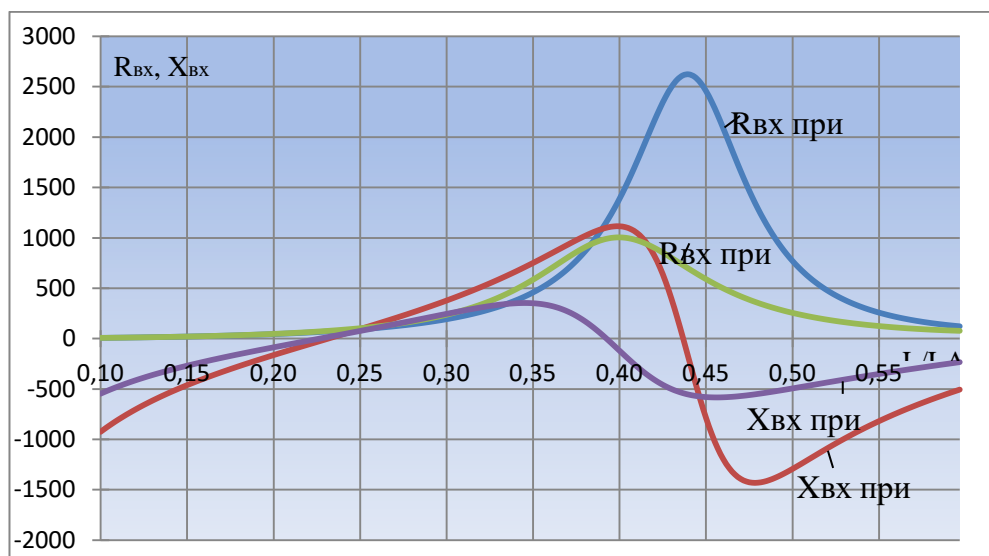


Рис. 17. Зависимости входного сопротивления симметричного

вибратора от отношения длины плеча к длине волны.

Зависимость входного сопротивления (Ом) одиночного симметричного вибратора от отношения длины плеча к длине волны показана на рис. 17. Расчеты были выполнены для отношений радиусов вибраторов к длине плеча 0,001 и 0,01. Как следует из рассмотрения кривых рис. 17, увеличение радиуса вибратора в десять раз существенно уменьшает изменения действительной и мнимой частей входного сопротивления в диапазоне частот. Изменение мнимой части входного сопротивления $X_{вх}$ в окрестности первого резонанса, где $X_{вх}=0$, показано на рис. 18.

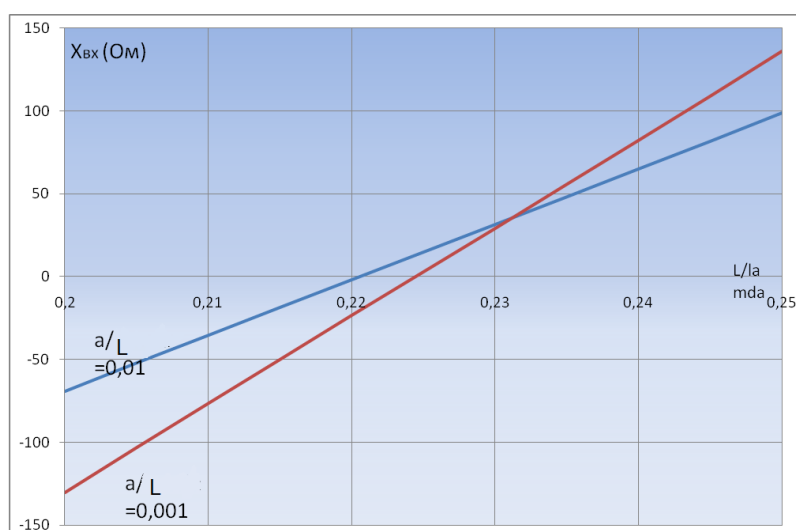


Рис.18. Зависимость входного сопротивления вибратора от отношения длины плеча к длине волны.

Как следует из рассмотрения рис. 18, увеличение радиуса вибратора приводит к смещению точки резонанса $X_{вх}=0$ в сторону меньших значений l/λ .

Зависимости действительной и мнимой частей входного сопротивления трехэлементной директорной антенны показаны на рис 19 в окрестности точки первого резонанса $X_{вх}=0$. Отношение радиуса вибратора к длине плеча 0.01. Взаимное влияние элементов антенны изменяет частотную зависимость действительной и мнимой частей входного сопротивления антенны.

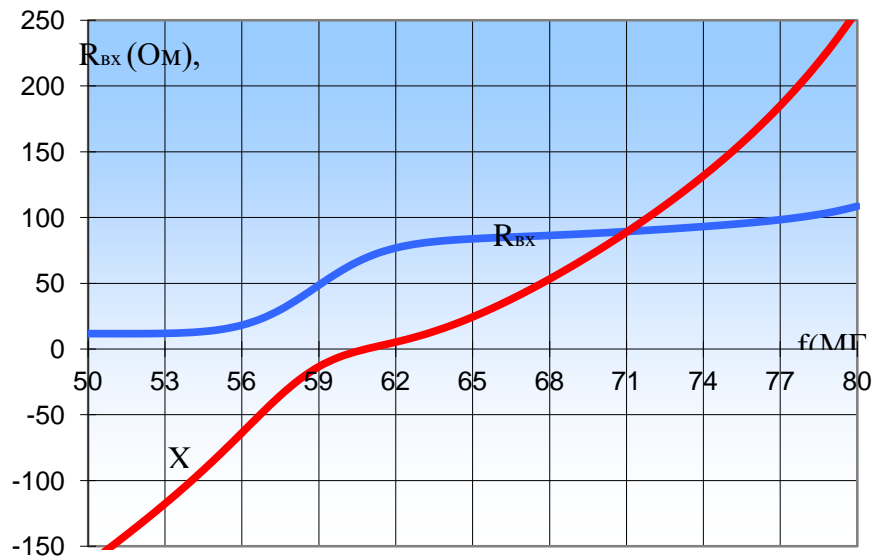


Рис. 19. Частотные зависимости входного сопротивления трехэлементной директорной антенны.

Частотные зависимости коэффициента направленного действия антенны (КНД) и коэффициента усиления (K_y) показаны на рис. 20.

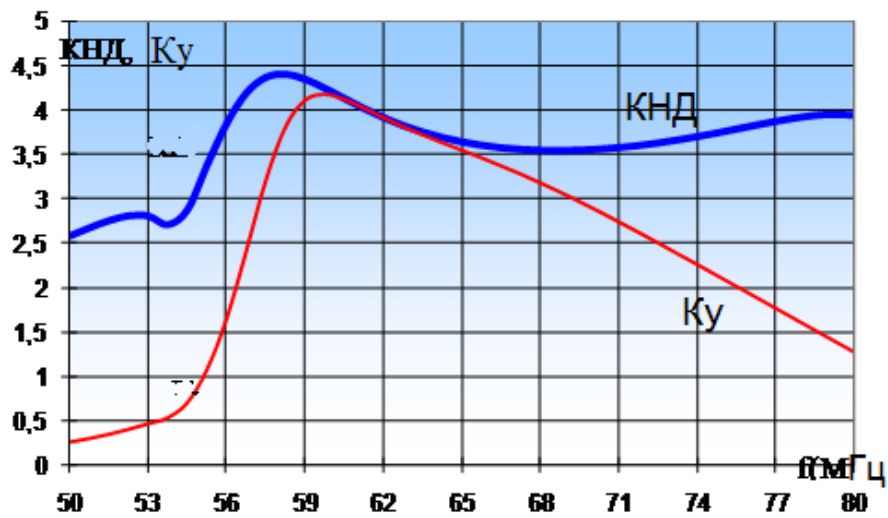


Рис. 20. Частотные зависимости КНД и K_y трехэлементной директорной антенны.

Частотная зависимость коэффициента бегущей волны (КБВ) в фидере трехэлементной директорной антенны показана на рис 21.

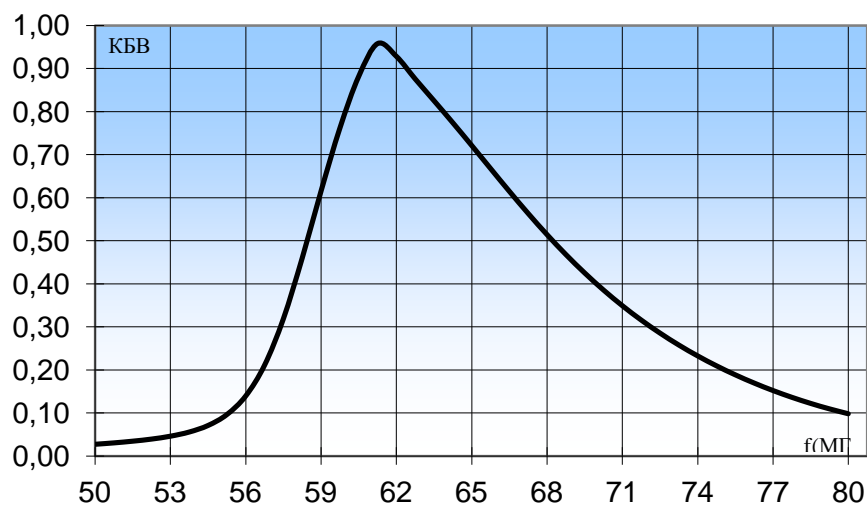


Рис. 21. Частотная зависимость КБВ для трехэлементной директорной антенны.

ДН по мощности трехэлементной директорной антенны в вертикальной (красная кривая) и горизонтальной (синяя кривая) плоскостях показаны на рис. 22 для частоты максимума коэффициента усиления.

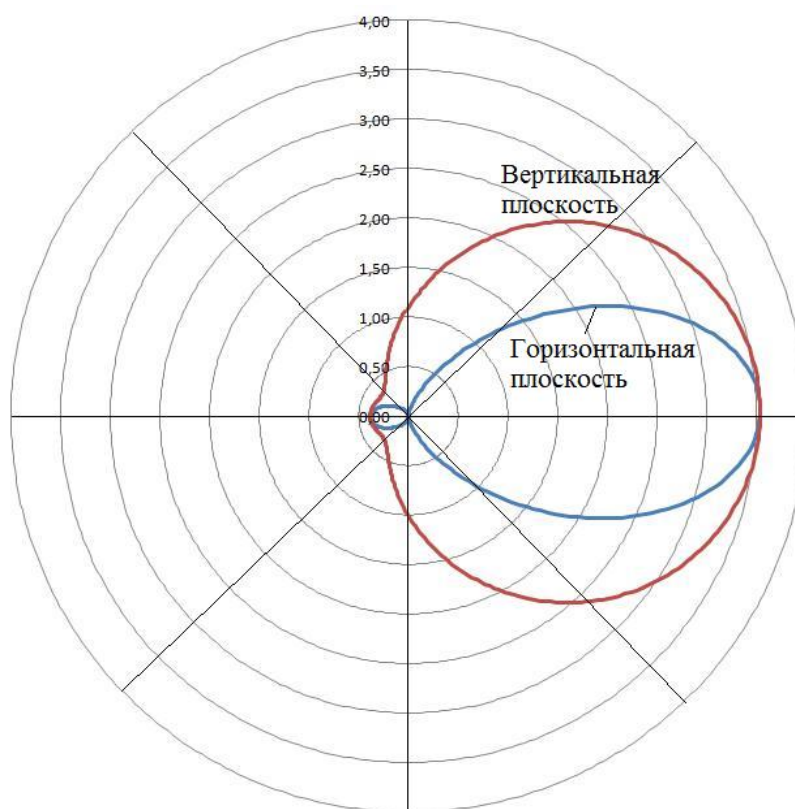


Рис. 22. ДН по мощности настроенной трехэлементной директорной антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Поскольку кривые ДН, выводимые программой моделирования в одном из возможных режимов, нормированы на значение КНД антенны в максимуме, результаты, показанные на рис. 22, можно рассматривать, как зависимости КНД антенны от направления.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое ДН и КНД антенн? Как определяются ДН и КНД антенн с линейными токами?
2. Каково амплитудно – фазовое распределение тока на симметричном вибраторе (приближенное и строгое)?
3. Как изменяется входное сопротивление симметричного вибратора в зависимости от отношения длины плеча к длине волны и от радиуса?
4. Как зависят КНД и K_u , КБВ симметричного вибратора от частоты? Как зависит полоса рабочих частот вибратора по $K_{СВ} < 2$ от радиуса вибратора?
5. ДН симметричного вибратора и ее зависимость от отношения длины плеча к длине волны и радиуса вибратора.
6. Аппроксимация токов на проводниках вибраторных антенн.
7. Выбор размеров элементов тока для вибраторных антенн
8. Устройство, преимущества директорной антенны.
9. Как зависит ДН двухэлементной директорной антенны от расстояния между вибраторами и от длины пассивного вибратора?
10. Расскажите о процедуре настройки директорной антенны.
11. Экспериментальная установка и метод определения ДН директорных антенн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин. Антенны УКВ. Ч. 1., М, изд-во Связь, 1977, 384 с.
2. Дрбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М., Советское радио, 1974 г., 536 с.
3. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1975, - 528 с.
4. Фрадин А.З. Антенно – фидерные устройства. М.: РС, 1977. – 440 с..