

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Промышленная электроника»

Н. И. Вяхирев, О. А. Елисеева

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-36 04 02 «Промышленная
электроника» специализации 1-36 04 02 02
«Техника и средства электронной связи»**

дневной формы обучения

В двух частях

Часть 1

Гомель 2011

УДК 621.396.679.4(075.8)
ББК 32.845я73
В99

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 31.01.2011 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Физика» ГГТУ им. П. О. Сухого д-р физ.-мат. наук,
проф. *П. А. Хило*

Вяхирев, Н. И.

В99 Антенно-фидерные устройства : лаборатор. практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» специализации 1-36 04 02 02 «Техника и средства электронной связи» днев. формы обучения : в 2 ч. Ч. 1 / Н. И. Вяхирев, О. А. Елисеева. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 59 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит необходимые сведения для освоения теоретического материала и практического закрепления знаний по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» специализации 1-36 04 02 02 «Техника и средства электронной связи» дневной формы обучения.

УДК 621.396.679.4(075.8)
ББК 32.845я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2011

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

Цель работы: знакомство с методами измерения амплитудной диаграммы направленности, способами ее графического изображения и радиоизмерительной аппаратурой.

1. Краткие теоретические сведения

Диаграмма направленности (ДН) относится к основным характеристикам антенных устройств. Поэтому важно уметь определять диаграмму направленности экспериментально. Различают амплитудную, фазовую и поляризационную диаграммы.

Пусть антенна, рассматриваемая в качестве передающей, расположена в центре сферической системы координат (рис.1.1).

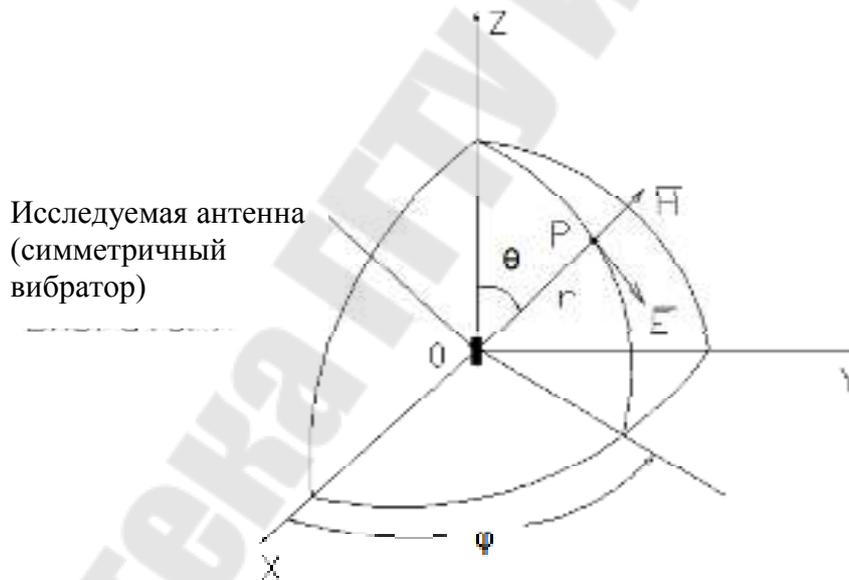


Рис.1.1. Сферическая система координат

Тогда напряженность электрического поля в точке наблюдения P с координатами r, θ, φ можно записать в виде

$$\vec{E} = E(\theta, \varphi, r) \cdot e^{i \cdot \psi(\theta, \varphi, r)} \cdot \vec{e}(\theta, \varphi, r) \quad (1.1)$$

Здесь $E(r, \theta, \varphi)$ характеризует амплитуду поля; $\psi(r, \theta, \varphi)$ характеризует фазу поля; $\vec{e}(\theta, \varphi, r)$ - характеризует ориентацию вектора \vec{E} .

Соответственно диаграмма (характеристика) направленности антенны, определяется как функция, описывающая распределение поля в пространстве в зависимости от угловых координат θ и φ (при $r = \text{const}$), запишется в виде

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \cdot e^{i\psi(\theta, \varphi)} \cdot \vec{e}(\theta, \varphi) \quad (1.2)$$

где $F(\theta, \varphi)$ - амплитудная диаграмма; $\psi(\theta, \varphi)$ - фазовая диаграмма; $\vec{e}(\theta, \varphi)$ - поляризационная диаграмма.

Амплитудная диаграмма направленности $F(\theta, \varphi)$ представляет собой зависимость амплитуды поля, излучаемого антенной, от угловых координат.

Фазовая диаграмма направленности $\psi(\theta, \varphi)$ представляет собой зависимость фазы поля, излучаемого антенной, от угловых координат.

Поляризационная диаграмма направленности $\vec{e}(\theta, \varphi)$ представляет собой зависимость поляризации поля, излучаемого антенной, от угловых координат.

Для многих типов антенн ориентация вектора \vec{E} в пространстве не зависит от угловых координат (например, для антенны в виде симметричного вибратора). В этом случае имеет место линейная поляризация поля.

При определении функций $F(\theta, \varphi)$, $\psi(\theta, \varphi)$ и $\vec{e}(\theta, \varphi)$ расстояние r до точки наблюдения является фиксированным (обычно $r \rightarrow \infty$) и, кроме того, с началом системы координат должна совпадать определенная точка антенны, называемая ее фазовым центром. Для антенны в виде симметричного вибратора фазовый центр совпадает с геометрическим центром антенны.

Графики функций $F(\theta, \varphi)$, $\psi(\theta, \varphi)$ и $\vec{e}(\theta, \varphi)$ также называются соответственно амплитудной, фазовой и поляризационной ДН.

Амплитудная ДН $F(\theta, \varphi)$ всегда нормируется по отношению к максимуму, так что ее значение в максимуме равно 1. Функция $F(\theta, \varphi)$ вообще представляет собой объемную (трехмерную) фигуру. В целях упрощения, обычно изображают не трехмерную, а две двухмерные диаграммы, представляющие собой сечения объемной фигуры двумя взаимно перпендикулярными плоскостями, проходящими

через направление максимума (или при необходимости через другие направления).

Для антенны, создающей поле с линейной поляризацией, эти плоскости совпадают с плоскостями векторов \vec{E} и \vec{H} , то есть плоскостями, в которых лежит соответственно вектор \vec{E} или \vec{H} . Так для антенны в виде симметричного вибратора диаграммы определяются в плоскостях $\varphi = const$ (плоскость \vec{E}) и $\theta = const$ (плоскость \vec{H}).

Кроме зависимости амплитуды поля от угловых координат (ДН по полю) иногда рассматривается диаграмма по мощности, обозначаемая $F^2(\theta, \varphi)$ или $P(\theta, \varphi)$ и представляющая зависимость мощности поля от угловых координат. ДН изображаются в декартовой и полярной системах координат (рис.1.2). В декартовой системе координат по горизонтальной оси откладывается угол относительно направления максимального излучения (чаще всего), по вертикальной – значение ДН. В полярной системе координат угол откладывается относительно определенного заранее направления (например, направления максимального излучения), а значение ДН откладывается по радиусу.



Рис.1.2. Изображение амплитудной ДН в декартовой (а) и полярной (б) системах координат

В ДН можно выделить главный и боковые лепестки. Лепестки ДН разделяются друг от друга нулями или направлениями с малым излучением. Главным называется лепесток с максимальным излучением. Остальные лепестки называются боковыми и задними лепестками.

Значения ДН $F(\theta)/F_{\max}(\theta)$ могут отсчитываться в относительных единицах или в децибелах (логарифмическом масштабе). Значение ДН в децибелах определяется из соотношения

$$L(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{F(\theta)}{F_{\max}(\theta)} = 10 \lg \frac{P(\theta)}{P_{\max}(\theta)}.$$

По ДН (измеренной или рассчитанной) можно определить вторичные параметры: направление главного максимума, ширину главного лепестка, относительный уровень боковых лепестков.

Ширина главного лепестка может определяться по нулям ($2\theta_0$) и по половинной мощности ($2\theta_{0,5}$). В последнем случае она определяется на уровне 0,707 по полю или 0,5 по мощности (рис.1.3), что в логарифмическом масштабе соответствует -3дБ.

Уровень боковых лепестков определяется как отношение максимального значения боковых лепестков к значению максимума ДН. Уровень боковых лепестков обычно определяется в децибелах. Так уровень лепестка 0,316 по полю соответствует -10дБ.

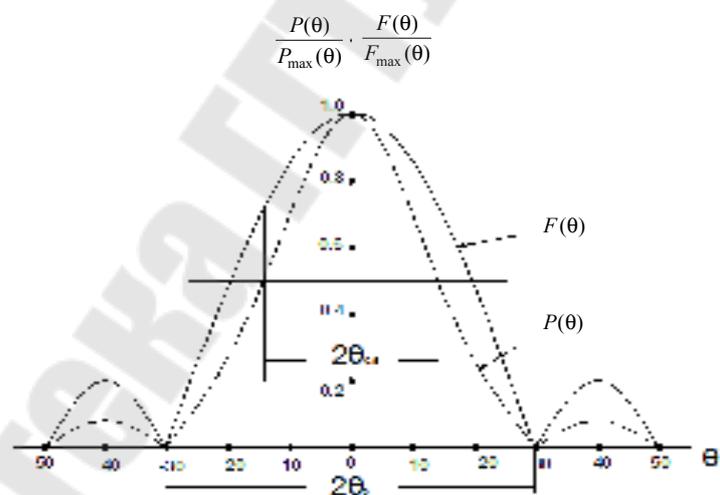


Рис.1.3. Нормированная ДН по полю и по мощности и определение ширины ДН

2. Методика измерения амплитудной ДН

Согласно принципу взаимности все диаграммы направленности антенны одинаковы при ее работе в качестве передающей или в качестве приемной. Поэтому исследуемая антенна может являться как приемной, так и передающей.

При измерении ДН используется вспомогательная антенна, которая также может быть как приемной, так и передающей.

На практике используются следующие варианты измерения амплитудной ДН:

1. Исследуемая антенна – передающая, вспомогательная антенна – приемная:

- исследуемая антенна неподвижна, вокруг нее по дуге окружности перемещается вспомогательная антенна с индикатором поля;
- исследуемая антенна вращается вокруг своей оси, вспомогательная антенна с индикатором поля неподвижна.

2. Исследуемая антенна – приемная, вспомогательная антенна – передающая:

- исследуемая антенна неподвижна, вокруг нее по дуге окружности перемещается вспомогательная антенна с генератором;
- исследуемая антенна с индикатором поля вращается вокруг своей оси, вспомогательная антенна с генератором неподвижна.

Обычно применяются два способа измерения ДН:

- непосредственно по измерительному прибору;
- с помощью калиброванного аттенюатора.

Одна из возможных блок-схем первого способа показана на рис.1.4.

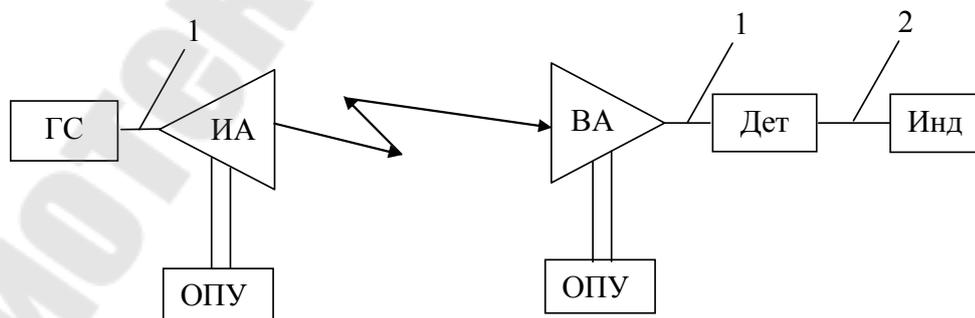


Рис. 1.4. Блок-схема измерения амплитудной ДН антенны непосредственно по измерительному прибору

где ГС - высокочастотный генератор; ВА - вспомогательная антенна (передающая); ИА - исследуемая антенна (приемная); Дет - детекторная секция; Инд – индикатор; 1 - высокочастотная линия передачи; 2 - низкочастотный кабель; ОПУ - опорно-поворотное устройство.

Если используется импульсная модуляция высокочастотного сигнала генератора, в качестве индикатора применяется высокочувствительный вольтметр, измеряющий выделяемый детектором сигнал с частотой модуляции. Если генератор работает в режиме непрерывной генерации, на нагрузке детектора выделяется постоянная составляющая, поэтому в качестве индикатора применяют чувствительный прибор постоянного тока (вольтметр или амперметр).

По блок-схеме рис.1.4 считывание ДН производится непосредственно по шкале указателя измерительного прибора. При этом обычно характеристику детектора полагают квадратичной. Тогда показания прибора пропорциональны мощности электромагнитного поля, и для перехода к значениям напряженности поля необходимо из показаний прибора извлекать квадратный корень. Для измерения малых боковых лепестков можно использовать ступенчатый аттенюатор измерительного прибора. При точных измерениях ДН необходимо знать характеристику детектора, то есть зависимость показаний измерительного прибора от величины напряженности (мощности) поля на входе детектора. Эта зависимость определяется экспериментально для тех же детекторной секции и измерительного прибора, которые будут применяться при измерении ДН.

Метод калиброванного аттенюатора отличается тем, что между приемной антенной и детекторной секцией (или между генератором и передающей антенной) включается высокочастотный калиброванный аттенюатор. При измерениях поддерживается постоянный сигнал на выходе детекторной секции (т.е. на измерительном приборе), а изменяющееся затухание аттенюатора характеризует ДН.

Метод калиброванного аттенюатора является более точным, так как, во-первых, результаты измерения не зависят от характеристики детектора, а во-вторых, можно более точно измерить малые боковые лепестки. Если калиброванный аттенюатор имеет шкалу, позволяющую отсчитывать затухание в децибелах, то по результатам измерения сразу может быть построена ДН в децибелах.

При измерении ДН важно правильно выбрать точку (ось), вокруг которой вращается исследуемая антенна (центр окружности, по

которой перемещается вспомогательная антенна). Точка эта является фазовым центром антенны и определяется следующим образом. Если при перемещении точки наблюдения P (см. рис. 1.1) по поверхности сферы, окружающей антенну (или части поверхности сферы в пределах главного лепестка ДН), фаза поля остается постоянной, то центр этой сферы называется фазовым центром антенны. Для многих типов антенн (симметричный вибратор, синфазная решетка излучателей, синфазная линейная антенна, плоский синфазный раскрыв) фазовый центр совпадает с геометрическим центром антенны.

Для получения достаточно точных результатов при измерении диаграмм направленности расстояние r между исследуемой и вспомогательной антеннами должно быть достаточно большим. Если требуется, чтобы ошибка в определении напряженности поля не превышала 1%, должно выполняться условие

$$r_{\min} \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

где D - размер раскрыва исследуемой антенны. При этом полагаем, что размер раскрыва вспомогательной антенны $d \ll D$.

Кроме того, при измерениях электромагнитные волны, отраженные от пола, стен и других объектов не должны влиять на результат измерения, а также должны отсутствовать помехи за счет излучения других антенн.

3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка позволяет исследовать различные методы измерения амплитудной ДН антенны. При этом исследуемая антенна работает в качестве передающей.

При измерении ДН путем непосредственного отсчета по измерительному прибору используется блок-схема, изображенная на рис.4. При этом если высокочастотный генератор работает в режиме импульсной модуляции, то в качестве измерительного прибора используется селективный вольтметр, а при работе высокочастотного генератора в режиме непрерывной генерации в качестве измерительного прибора используется вольтметр или амперметр постоянного тока.

При измерении ДН путем непосредственного отсчета по измерительному прибору характеристику детектора обычно полагают квадратичной. Для большей точности измерений необходимо использовать градуировочную кривую детектора.

Градуировочная кривая детектора может быть измерена по блок-схеме рис.1.4 с включенным между генератором сигнала и передающей антенной (или между приемной антенной и детектором) калиброванного аттенюатора.

При измерении ДН с помощью калиброванного аттенюатора используется переменный аттенюатор, шкала которого градуирована в дБ-х. Аттенюатор включается между генератором сигнала и передающей антенной.

4. Задание к экспериментальной части

1. Подготовить приборы к работе согласно инструкциям по эксплуатации.

2. Измерить амплитудную ДН исследуемой антенны в плоскостях векторов \vec{E} и \vec{H} путем непосредственного отсчета по измерительному прибору. Блок-схема измерений приведена на рис.1.4. Высокочастотный генератор работает в режиме внутренней импульсной модуляции. Несущая частота задается преподавателем.

С целью уменьшения ошибок необходимо соблюдать следующие правила:

- перед измерением необходимо взаимным ориентированием антенн добиться максимальных показаний индикатора в максимуме главного лепестка; при этом необходимо совместить направление максимального излучения (или приема) каждой антенны с направлением на другую антенну, а также плоскости поляризации двух антенн;

- при подаче высокочастотного сигнала стрелка индикатора должна находиться во второй половине шкалы; при отключении сигнала показания должны падать до нуля;

- ДН следует измерять в обе стороны от максимума и не менее чем в 7 – 8 точках для каждого лепестка. Диапазон измерения ДН – 40 дБ относительно уровня максимального излучения.

3. Заменить в измерительной схеме индикатор и повторить те же измерения при работе высокочастотного генератора в режиме непрерывной генерации.

4. Повторить измерения по пункту 2 с применением калиброванного аттенюатора. Высокочастотный генератор работает в режиме внутренней импульсной модуляции. Настроить антенны, направив максимумы их ДН друг на друга. Ввести ослабление аттенюатора – 40 дБ и зафиксировать показание индикатора. Изменяя угол излучения исследуемой антенны с помощью переменного аттенюатора восстановить прежнее показание индикатора. Для получения значения ДН в дБ нужно из показания индикатора вычесть 40 дБ.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. цель работы;
2. краткое описание установки и блок-схемы измерений;
3. протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
4. результаты измерений ДН, оформленные в виде таблиц и графиков, построенных в декартовой и полярной системах координат;
5. выводы по работе. В выводах по каждому пункту необходимо дать качественную оценку полученных результатов.

6. Контрольные вопросы

1. Состав измерительной установки.
2. Назначение отдельных приборов установки, ее выносных элементов и установки в целом.
3. Основные технические характеристики установки.
4. Что такое амплитудная ДН?
5. Перечислите количественные характеристики ДН антенны.
6. Перечислите способы графического изображения ДН антенны.
7. Что такое фазовая ДН и фазовый центр антенны?
8. Что такое поляризационная ДН антенны?
9. Как можно измерить диаграмму направленности антенны, исследуемой в данной работе?
10. Перечислите требования, которые необходимо выполнять при измерении параметров антенн.

11. В чем отличие методов измерения ДН путем непосредственного отсчета по прибору и с применением калиброванного аттенюатора?

12. Каким образом можно проверить, является ли характеристика детектора квадратичной?

7. Литература

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.Н. Антенны. – М., 1975. – С. 125-131, 140-149.

2. Фрадин А.З., Рыжков Е.В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. – М., 1972. – С. 30-40, 235-243, 245-247, 263-265.

3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1988.

4. Конспект лекций по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ РАМОЧНЫХ АНТЕНН

Цель работы: ознакомиться с конструкцией рамочных и ферритовых антенн диапазонов средних, длинных и сверхдлинных волн, расчетом и экспериментальным определением их характеристик.

1. Краткие теоретические сведения

В диапазонах средних (СВ), длинных (ДВ) и сверхдлинных волн (СДВ) широко применяются рамочные и ферритовые антенны. Они используются в качестве приемных антенн в системах дальней радиосвязи. Ферритовые антенны находят применение в радиовещательных приемниках.

Рамочная антенна представляет собой один или несколько последовательно соединенных витков провода [1 – 3]. При этом витки могут иметь различную форму – круглую, прямоугольную, треугольную и т.д. Размеры всех (даже самых больших) рамочных антенн,

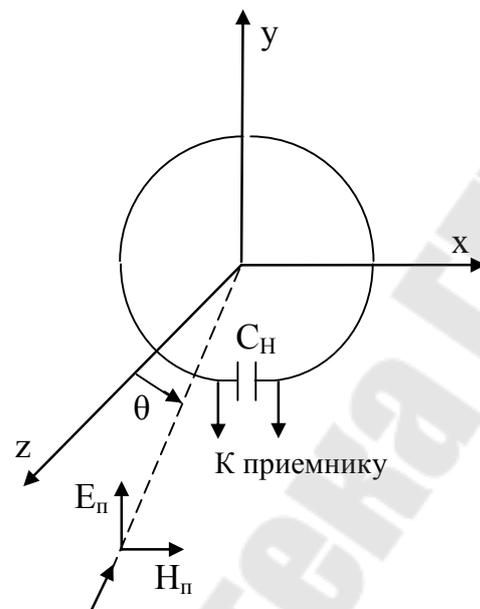
применяемых в диапазонах СВ, ДВ и СДВ, малы по сравнению с длиной волны. Поэтому ток в проводниках рамок распределяется равномерно, и для расчета характеристики направленности и сопротивления излучения оказываются применимыми формулы для элементарной рамки [1].

Если на круглую одновитковую рамку радиуса a падает плоская волна (рис. 2.1), то ток в нагрузке рамки будет равен

$$I_H = \frac{E_{\Pi} h_d}{Z_a + Z_H} \sin \theta, \quad (2.1)$$

где E_{Π} – напряженность электрического поля падающей волны; h_d – действующая длина рамки; Z_a – входное сопротивление рамки;

$Z_H = \frac{1}{j\omega C_H}$ – сопротивление нагрузки.



Направление прихода волны

Рис. 2.1. Рамочная антенна

Рамка располагается в плоскости XOY. Направление прихода волны θ отсчитывается от нормали к плоскости рамки. Отсюда видно, что нормированная диаграмма направленности (ДН) представляет собой восьмерку $F(\theta) = \sin \theta$. Максимум ДН лежит в плоскости рамки, в направлении нормали к рамке имеет место нуль излучения. В максимуме излучение рамки имеет линейную поляризацию, и вектор напряженности электрического поля лежит в ее плоскости.

Сопротивление излучения рамки определяется ее площадью s и длиной волны λ :

$$R_{\Sigma} = \frac{8\pi^3 W s^2}{3\lambda^4}, \quad (2.2)$$

где W – волновое сопротивление среды.

Сопротивление излучения рамки с числом витков n увеличивается в n^2 раз. Действующая длина рамки просто связана с сопротивлением излучения и коэффициентом направленного действия $D = 1,5$

$$h_d = \lambda \sqrt{\frac{DR_\Sigma}{W\pi}} = \frac{2\pi}{\lambda} sn. \quad (2.3)$$

Сопротивление излучения рамок, используемых на практике, чрезвычайно мало. Например, при $\lambda = 1000$ м, $n = 10$, $s = 4$ м², $R_\Sigma \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Ом и $h_d \approx 0,25$ м. Поэтому вещественная часть входного импеданса рамки $Z_{ВХ} = R_{ВХ} + j\omega L_p$ практически полностью определяется сопротивлением потерь, к.п.д. ничтожен и передающий режим неэффективен. Однако при радиоприеме низкий к.п.д. легко компенсируется в каскадах усиления приемника, сохраняющаяся направленность дает возможность отстройки от помехи, а также позволяет определять направление на радиостанцию по минимуму принимаемого сигнала. В большинстве случаев рамка настраивается в резонанс настроенным конденсатором и одновременно играет роль входного контура радиоприемника.

Для получения глубокого нуля приема рамочные антенны должны заключаться в экран (рис.2.2) с разрезом в вертикальной плоскости симметрии. Этим исключается так называемый «антенный эффект», то есть возможность приема на рамку как на вертикальный вибратор. При наличии экрана электромагнитная волна, пришедшая в направлении оси рамки, не создает разности потенциалов в разрыве экрана, внутренняя область антенны, то есть рамка, не возбуждается и этим обеспечивается глубокий нуль радиоприема.

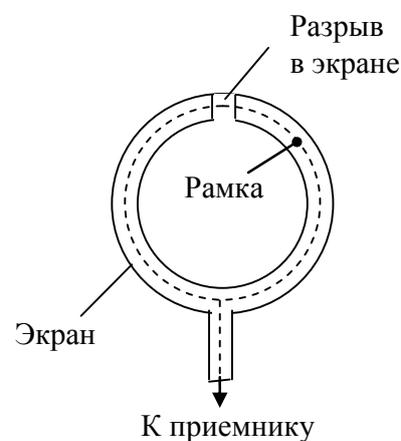


Рис. 2.2. Экранированная рамка

В ряде применений требуются малогабаритные рамочные антенны, например в переносных радиоприемниках. В этом случае используются магнитоэлектрические ферритовые сердечники с большой магнитной проницаемостью (рис.2.3). Действующая высота рамочной антенны с сердечником возрастает в $\mu_{эфф}$ раз по сравнению с

результатом расчета по формуле (2.3). Эффективная магнитная проницаемость сердечника $\mu_{\text{эфф}}$ зависит от относительной магнитной проницаемости μ феррита, а также учитывает соотношение длины и диаметра сердечника и определяется по графикам, приведенным на рис.2.4 [1]. Благодаря значительному уменьшению площади рамок при использовании ферритовых сердечников происходит резкое уменьшение «антенного эффекта». Нуль приема оказывается достаточно глубоким и экранирование рамок становится необязательным.

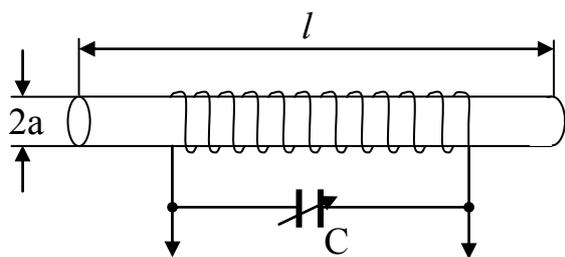


Рис. 2.3. Рамочная антенна с ферритовым сердечником

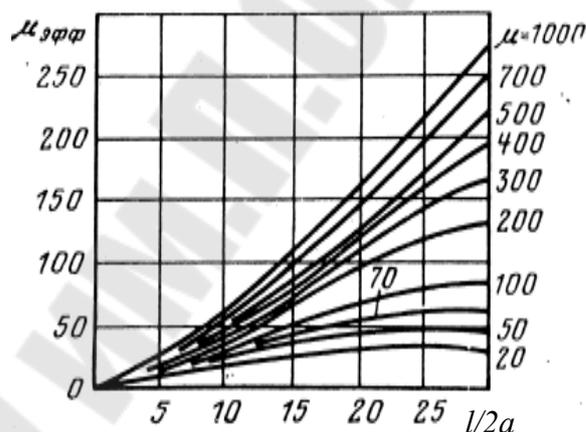


Рис. 2.4. Эффективная магнитная проницаемость ферритовых сердечников

2. Описание лабораторной установки

В работе исследуется диаграмма направленности и коэффициент усиления ферритовой антенны с различными по длине, диаметру и магнитной проницаемости сердечника.

Измерения выполняются с помощью схемы, приведенной на рис.2.5.

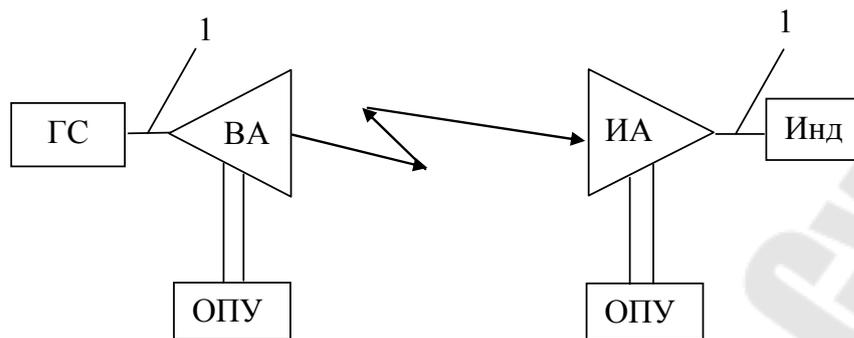


Рис. 2.5. Блок-схема экспериментального стенда

Здесь обозначено: ГС – генератор сигналов; ВА – вспомогательная антенна; ИА – исследуемая антенна; Инд – индикатор; 1 – коаксиальная линия передачи; ОПУ – опорно-поворотное устройство.

Генератором сигнала является функциональный генератор Гб-86, работающий в режиме формирования синусоидального напряжения с постоянной амплитудой. Генератор имеет ступенчатые и плавные регулировки частоты и амплитуды сигнала. Индикатором является селективный вольтметр переменного напряжения Вб-9. Стенд работает в диапазоне 10 – 100 кГц.

Вспомогательная антенна – экранированная многовитковая рамка работает в передающем режиме. Она устанавливается на ОПУ так, чтобы ее излучение в направлении на исследуемую антенну было максимальным, и вектор напряженности электрического поля был направлен вертикально по отношению к земле. Далее в процессе измерений вспомогательная антенна неподвижна. Согласование вспомогательной антенны с выходным сопротивлением генератора осуществляется с помощью переключения конденсаторов на зажимах антенны. Исследуемая ферритовая антенна устанавливается на поворотном устройстве, с помощью которого антенну можно вращать в горизонтальной плоскости. Конструкция антенны позволяет использовать в ней ферритовые сердечники с различными длиной, диаметром и магнитной проницаемостью. Исследуемая антенна также настраивается с помощью переключения конденсаторов до получения максимального показания на вольтметре.

Влияние сердечника на параметры ферритовой антенны оценивается в максимуме ее диаграммы направленности. Заменяя сердечник в антенне, измеряется напряжение на ее нагрузке и, следовательно, оценивается изменение действующей длины антенны.

3. Задание к расчетной части

1. Записать формулы для расчета диаграммы направленности многовитковой электрической рамки в свободном пространстве.

2. Рассчитать нормированные диаграммы направленности электрической рамки в E и H плоскостях.

3. Построить полученные диаграммы направленности в декартовой системе координат (по одной на каждом рисунке) при изменении угла от 0 до 180° с шагом 5° .

4. Рассчитать действующую длину цилиндрической рамки с числом витков $n = 100$. Заполнить таблицу 1.

Таблица 1. Действующая длина ферритовой антенны

$\mu = 1$	$\mu = 400,$ $2a = 10\text{мм},$ $l = 200\text{мм}$	$\mu = 400,$ $2a = 8\text{мм},$ $l = 125\text{мм}$	$\mu = 150,$ $2a = 10\text{мм},$ $l = 200\text{мм}$

В таблице обозначено (см. рис. 2.3): l – длина ферритового стержня; $2a$ – диаметр стержня; μ – магнитная проницаемость феррита (случай $\mu = 1$ соответствует отсутствию стержня). Частота задается преподавателем.

4. Задание к экспериментальной части

1. Собрать стенд для измерения диаграммы направленности ферритовой антенны (рис.2.5). Включить измерительные приборы и дать им прогреться. Установить частоту сигнала на выходе генератора, для которой выполнялся расчет характеристик антенны.

2. Измерить амплитудную ДН ферритовой антенны в плоскости \vec{H} (параметры ферритового стержня задаются преподавателем). Для этого:

- установить передающую и приемную антенны так, чтобы их центры были на одинаковой высоте;
- поворачивая антенны в горизонтальной плоскости, добиться максимального сигнала на индикаторе приемной антенны; установить указатель шкалы ОПУ на нулевое деление;
- переключая конденсаторы передающей и приемной антенн настроить их в резонанс;

- подобрать чувствительность вольтметра так, чтобы показания индикатора были удобны для считывания.

- поворачивая ферритовую антенну в горизонтальной плоскости от 0 до 360° с шагом 5°, снять ее диаграмму направленности; пронормировать полученную диаграмму на максимальное значение;

- сравнить измеренные результаты с расчетными, построив их на одном рисунке.

3. Исследовать влияние параметров ферритового стержня на действующую длину антенны. Для этого:

- аналогично предыдущему пункту настроить антенны на максимум сигнала на индикаторе;

- заменяя в ферритовой антенне стержни, измерить величину принятого сигнала для каждого стержня. Результаты свести в таблицу 2, аналогичную таблицы 1;

- сравнить изменение действующей длины антенны с рассчитанными результатами.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. цель и задачу работы;
2. краткое описание установки и блок-схемы измерений;
3. результаты расчета;
4. протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;
5. результаты измерений, оформленные в виде таблиц и графиков;
6. выводы по работе. В выводах по каждому пункту необходимо дать качественную оценку полученных результатов.

6. Контрольные вопросы

1. Состав измерительной установки.
2. Назначение отдельных приборов установки.
3. Основные технические характеристики установки.
4. Что такое амплитудная ДН?
5. Типы рамочных антенн.
6. Где применяются рамочные антенны?
7. Чем определяется ДН рамочной антенны?

8. Что такое действующая длина антенны?
9. Чем определяется действующая длина рамочной антенны?
10. Что такое антенный эффект рамочной антенны?
11. Конструкция экранированной рамки.
12. К чему приводит применение ферритового сердечника в рамке?
13. Как влияют геометрические размеры сердечника ферритовой антенны на ее характеристики?
14. Как зависит действующая длина ферритовой антенны от магнитной проницаемости сердечника?

7. Литература

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.Н. Антенны. – М., 1975.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1988.
3. Ерохин Г. А. И др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
4. Конспект лекций по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

Лабораторная работа № 3 ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН MMANA

Цель работы: ознакомиться с методом интегральных уравнений для антенн, состоящих из цилиндрических проводников, изучить программу расчета проволочных антенн MMANA.

1. Краткие теоретические сведения

Метод интегральных уравнений является одним из наиболее мощных методов, применяемых в настоящее время для анализа антенн. Он относится к строгим методам, точность получаемых результатов определяется только точностью решения интегрального уравнения. Метод интегральных уравнений наиболее удобен из существующих

щих методов решения электродинамических задач для реализации на компьютере.

Интегральное уравнение для электрического тока в металлическом проводнике составляется следующим образом [1] – [3]. Исходя из электрического тока в проводнике, получается интегродифференциальное соотношение для вектора напряженности электрического поля. К нему добавляется первичное поле, и применяются граничные условия на поверхности проводника. Это дает интегральное уравнение относительно тока в проводнике. Рассмотрим такую процедуру применительно к симметричному электрическому вибратору (рис.3.1). Цилиндрический вибратор имеет длину 2ℓ , диаметр $2a$ и возбуждается в центре сосредоточенным генератором э.д.с. V , ширина возбуждающего зазора b . Будем считать вибратор тонким, то есть $a \ll \ell$, $a \ll \lambda$ (λ – длина волны).

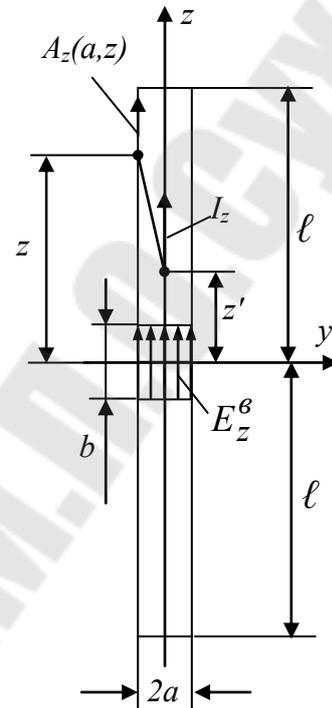


Рис. 3.1. Симметричный вибратор

При соблюдении этих условий и с учетом осевой симметрии вибратора допустимы следующие предположения:

1. Поверхностные токи J_z заменяются расположенной на оси вибратора бесконечно тонкой нитью продольного тока $I_z(z)$. Этот ток считается непрерывной функцией в области возбуждающего зазора и обращается в нуль на концах вибратора. Других составляющих тока в вибраторе нет.

2. Касательная составляющая вектора напряженности электрического поля $E_z(z)$ на боковой поверхности вибратора (то есть при $\rho = a$) обращается в нуль всюду, кроме области возбуждающего зазора.

3. Составляющая $E_z(z)$ на боковой поверхности в области зазора приравнивается некоторой возбуждающей функции $E^B(z)$. Для узких зазоров $b \ll \ell$ функция $E^B(z)$ считается постоянной. Тогда $E^B b = -V$.

Неизвестное распределение тока $I_z(z)$ будет создавать на боковой поверхности вибратора векторный потенциал с единственной составляющей A_z [2]

$$A_z(z) = \frac{1}{4\pi} \int_{z'=-l}^{\ell} I_z(z') \frac{\exp(-jk\sqrt{(z-z')^2 + a^2})}{\sqrt{(z-z')^2 + a^2}} dz', \quad (3.1)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число в среде, окружающей вибратор. Через векторный потенциал касательная составляющая вектора напряженности электрического поля в свою очередь будет выражаться в виде

$$E_z(z) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(k^2 A_z + \frac{d^2 A_z}{dz^2} \right). \quad (3.2)$$

Здесь ω – круговая частота, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Согласно второму и третьему предположениям

$$\begin{aligned} \left(k^2 + \frac{d^2}{dz^2} \right) \int_{z'=-l}^{\ell} I_z(z') \frac{\exp(-jk\sqrt{(z-z')^2 + a^2})}{\sqrt{(z-z')^2 + a^2}} dz' = \\ = \begin{cases} 0 & \text{при } |z| > \frac{b}{2}; \\ 4\pi j\omega\epsilon E^e(z) & \text{при } |z| \leq \frac{b}{2}. \end{cases} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Соотношение (3.3) представляет собой интегродифференциальное уравнение относительно неизвестного тока в вибраторе. Уравнение такого типа весьма широко применяется для более сложных проволочных антенн. При этом пределы интегрирования и выражение для квадратного корня будут определяться геометрией антенны.

Обращение дифференциального оператора второго порядка в (3.3) приводит к уравнению Халлена для тонкого симметричного вибратора относительно тока в вибраторе [1]

$$\int_{-l}^{\ell} I(z') \frac{\exp(-jk\sqrt{(z-z')^2 + a^2})}{\sqrt{(z-z')^2 + a^2}} dz' = C \cos kz - \frac{j2\pi V}{W} \sin k|z|, \quad (3.4)$$

где W – волновое сопротивление среды, C – произвольная постоянная, которая определяется из равенства нулю тока на концах вибратора.

Находящаяся под интегралом функция $K(z - z') = \frac{\exp(-jk\sqrt{(z - z')^2 + a^2})}{\sqrt{(z - z')^2 + a^2}}$ называется ядром этого уравнения.

Интегральное уравнение тем или иным способом сводится к системе линейных алгебраических уравнений, которая решается на компьютере. Численное решение интегрального уравнения рассмотрим на примере интегрального уравнения Халлена.

Решение уравнения (3.4) представляется в виде разложения искомой функции тока в ряд по системе функций $f_1(z), f_2(z), f_3(z) \dots$

$$I(z) = \sum_{n=1}^N I_n f_n(z), \quad (3.5)$$

где I_n – коэффициенты разложения, подлежащие определению, N – число функций $f_n(z)$ (и коэффициентов I_n). Функции $f_n(z)$ называются базисными функциями; они должны быть линейно независимыми. В случае точного решения уравнения Халлена они должны составлять полную систему функций и суммирование в (3.5) должно быть бесконечным. Удобно функции $f_n(z)$ выбирать так, чтобы удовлетворялись граничные условия для тока на концах вибратора.

Для сравнительно коротких вибраторов достаточно ограничиться несколькими членами ряда (3.5). Из подстановки (3.5) в (3.4) получаем

$$\sum_n I_n \int_{-\ell}^{\ell} f_n(z') K(z - z') dz' = C \cos kz - \frac{j2\pi V}{W} \sin k|z|. \quad (3.6)$$

Решение этого уравнения относительно неизвестных коэффициентов I_n может быть произведено, например, методом Галеркина. Для этого умножают левую и правую части (3.6) на выбранные функции $f_m(z)$, где m – фиксированное значение индекса, и интегрируют по z от $-\ell$ до ℓ . В результате задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений

$$\sum_n I_n \int_{-\ell}^{\ell} \int_{-\ell}^{\ell} f_n(z') f_m(z) K(z-z') dz' dz = C \int_{-\ell}^{\ell} f_m(z) \cos kz dz - \frac{j2\pi V}{W} \int_{-\ell}^{\ell} f_m(z) \sin k|z| dz, \quad m = 1, 2, \dots, N. \quad (3.7)$$

Решение системы уравнений (3.7) необходимо производить на компьютере. Некоторую трудность при этом составляет многократное вычисление двойных интегралов по переменным z и \bar{A} .

Применяется также другой метод, в котором отсутствуют двойные интегралы. Это метод согласования в точках. Интервал $-\ell \leq z \leq \ell$ разбивается на отрезки. Обозначим $p = 1, 2, 3, \dots$ – номера точек разбиения и z_p – координата какой-либо точки p -го отрезка. Левую и правую части (3.6) умножаются на дельта функции $\delta(z - z_p)$. Затем полученное выражение интегрируется по z от $-\ell$ до ℓ и получается система алгебраических уравнений в виде

$$\sum_n I_n \int_{-\ell}^{\ell} f_n(z') K(z_p - z') dz' = C \cos kz_p - \frac{j2\pi V}{W} \sin k|z_p|.$$

При этом интегрирование упрощается, однако уравнение (3.6) удовлетворяется только в отдельных точках вибратора.

В качестве базисных можно выбирать тригонометрические функции, то есть разлагать искомый ток в ряд Фурье по синусоидальным функциям, удовлетворяющим граничным условиям на концах вибратора

$$f_n(z) = \sin \frac{\pi n(\ell - |z|)}{2\ell}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Для недлинных вибраторов удобнее выбирать базисные функции в виде более простых степенных выражений

$$f_n(z) = \left(1 - \frac{|z|}{\ell}\right)^n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

и, следовательно, представить разложение (3.5) в виде полинома.

Для проволочных антенн более сложной геометрии широко применяются базисные функции, каждая из которых существует на небольшом отрезке антенны. Антенна разбивается на отрезки малой длины (равные или не равные), $n = 1, 2, 3, \dots$ – номера точек разбиения. Кусочно-постоянный базис образуется из функций f_n , каждая из которых равна единице на n -ом отрезке и нулю на всех остальных отрезках. Кусочно-синусоидальный базис образуется из синусоидальных функций f_n , каждая из которых существует на n -ом и $n+1$ -отрезках, на остальных отрезках f_n равна нулю.

Известное распределение тока на проволочной антенне позволяет определить ДН и другие характеристики антенны [1].

Коэффициент направленного действия (КНД) – число, показывающее, во сколько раз нужно было бы увеличить мощность, излученную изотропным излучателем с тем, чтобы в точке приема, расположенной на оси максимального излучения данной антенны, получить такую же интенсивность поля.

Коэффициент усиления (КУ) – число, показывающее, во сколько раз нужно было бы увеличить мощность, подводимую к изотропному излучателю, с тем, чтобы в точке приема, расположенной на оси максимального излучения данной антенны, получить такую же интенсивность поля.

Коэффициент усиления равен произведению коэффициента направленного действия на коэффициент полезного действия антенны. Последний равен отношению мощности излучения к мощности, подводимой к антенне.

Входное сопротивление антенны – отношение напряжения на входных зажимах антенны к протекающему через них току.

Коэффициент защитного действия – отношение уровня сигнала в главном направлении (направлении максимального излучения или приема) к уровню сигнала, усредненного в некотором угловом секторе вокруг направления обратного излучения или приема.

2. Описание лабораторной установки

В работе исследуются электрические характеристики вибраторных антенн различной геометрии. С помощью программы MMANA рассчитываются диаграммы направленности, коэффициенты усиления и входные характеристики симметричного и петлевого вибратора в

свободном пространстве и над землей различной проводимости. Описание программы MMANA приведено в Приложении и в [5].

3. Задание к домашней подготовке

1. По рекомендованной литературе ([1], [3]) ознакомиться с основными параметрами антенн.
2. Изучить параметры вибраторных антенн.
3. Изучить основные правила работы с программой MMANA [5].
4. Ответить на контрольные вопросы.

4. Задание к расчетной части

1. Нарисовать геометрии двух предложенных преподавателем проволочных антенн с указанием размеров и материала, из которого они изготовлены.

2. С помощью программы MMANA рассчитать их характеристики. Частота и расположение антенн задается преподавателем. При этом необходимо рассчитать:

- нормированную диаграмму направленности в E и H плоскостях;
- входное сопротивление;
- коэффициент усиления в максимуме ДН;
- коэффициент стоячей волны. Волновое сопротивление тракта задается преподавателем.

3. Построить полученные зависимости.

4. Исследовать частотные зависимости характеристик одной из антенн (по выбору). Полоса частот задается преподавателем.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. цель и задачу работы;
2. краткое описание исследуемых антенн;
3. результаты расчета, оформленные в виде таблиц и графиков;
4. обсуждение полученных результатов и выводы.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое ДН антенны?
2. Что такое коэффициент усиления антенны?
3. Как определяется входное сопротивление антенны?
4. Как характеризуется согласование антенны с питающей линией?
5. Типы проволочных антенн.
6. Где применяются проволочные антенны?
7. Чем определяется ДН вибраторной антенны?
8. Какими свойствами обладает ДН вибратора над идеально проводящей землей?
9. Какими свойствами обладает ДН вибратора над землей с потерями?
10. Каковы граничные условия для идеально проводящего тела?
11. Как составляется интегральное уравнение для проволочной антенны?
12. Базисные функции.
13. Решение интегрального уравнения методом Галеркина.
14. Решение интегрального уравнения методом согласования в точках.
15. Какие антенны можно анализировать с помощью программы MMANA?
16. Какие антенные характеристики можно рассчитывать с помощью программы MMANA?
17. Чем определяются предельные возможности программы MMANA?
18. От чего зависит время счета характеристик антенны с помощью программы MMANA?

7. Литература

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.Н. Антенны. – М., 1975. – С. 17-24, 125-131, 140-149.
2. Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Сов. Радио, 1979.
3. Ерохин Г. А. И др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.

4. Конспект лекций по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

5. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. Всё о программе MMANA. М.: Радио Софт. 2002.

Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ

Цель работы: ознакомиться с конструкцией симметричных электрических вибраторов, расчетом и экспериментальным определением его характеристик.

1. Краткие теоретические сведения

Электрические вибраторы используются как самостоятельно, так и в качестве элементов сложных антенных систем. На практике применяются вибраторы длиной в четверть, половину длины волны и одну длину волны (рис.4.1). Симметричный вибратор возбуждается симметричной двухпроводной линией (рис.4а), либо коаксиальным кабелем через симметрирующее устройство (или симметрирующе-трансформирующее устройство). Несимметричный вибратор (рис.4.1.б) возбуждается непосредственно коаксиальным кабелем.

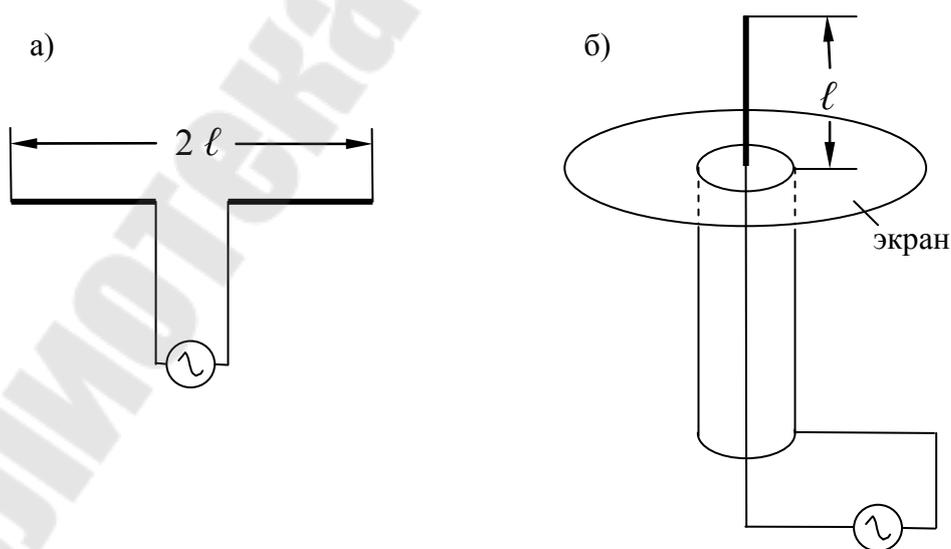


Рис. 4.1. Симметричный (а) и несимметричный (б) вибраторы

В экваториальной плоскости (плоскости, перпендикулярной оси вибратора, – плоскости H) антенны не имеют направленности, то есть $F(\varphi) = 1$.

В меридиональной плоскости, проходящей через ось вибратора, (плоскости E) нормированная диаграмма направленности (ДН) может быть определена по формуле:

$$F(\theta) = \frac{\cos(k\ell \cos \theta) - \cos k\ell}{\sin \theta} \quad (4.1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, 2ℓ – длина антенны, λ – длина волны. Угол θ отсчитывается от оси вибратора.

Из этой формулы следует:

1. для короткого вибратора ($2\ell \ll \lambda/2$) $F(\theta) = \sin(\theta)$, то есть ДН такая же, как у диполя Герца;

2. для симметричного полуволнового вибратора ($2\ell = \lambda/2$)

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \quad (4.2)$$

3. при $2\ell > \lambda/2$ в ДН появляются боковые лепестки, при $2\ell > \lambda$ главный лепесток расщепляется.

Электрический симметричный полуволновой вибратор имеет коэффициент направленного действия КНД = 1,64; ширину ДН по половинной мощности $2\theta_{0,5} = 80^\circ$ и сопротивление излучения $R_\Sigma = 73$ Ом.

На практике находят применение различные конструкции вибраторных антенн. Приведенные на рис. 4.1 вибраторы выполняются из сплошного или полого металлического цилиндра. Применяются также электрические вибраторы (рис.4.2), плечи которых выполнены из нескольких расположенных по цилиндрической образующей тонких проводов (вибратор Надененко), петлевой вибратор Пистолькорса, плоскостной вибратор и некоторые другие.

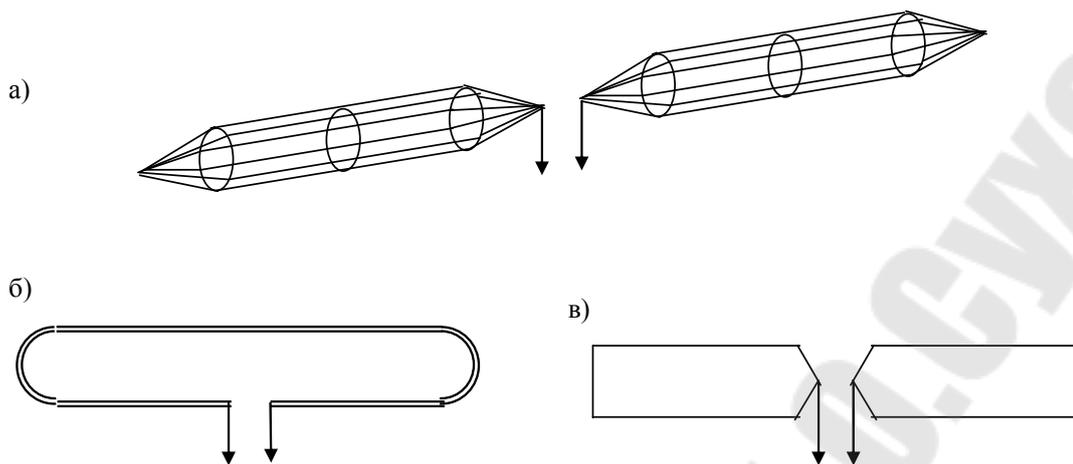


Рис. 4.2. Конструкции вибраторных антенн (а – вибратор Надененко, б – петлевой вибратор Пистолькорса, в – плоскостной вибратор)

В диапазоне коротких волн симметричный вибратор возбуждается симметричным двухпроводным кабелем, в ультракоротковолновом диапазоне – коаксиальным кабелем. В последнем случае между вибратором и кабелем необходимо включить симметрирующее (рис. 4.1.а, 4.2.а, 4.2.в) или симметрирующе-трансформирующее устройство (рис.4.2.б). Несимметричный вибратор (рис.4.1.б) возбуждается коаксиальным кабелем, центральная жила которого соединяется с вибратором, а оплетка – с экраном.

Строгий расчет вибраторных антенн может быть выполнен с помощью вычислительной программы MMANA, которая позволяет рассчитывать нормированную диаграмму направленности, коэффициент усиления антенны в максимуме излучения, входное сопротивление и другие характеристики антенны (см. лаб. раб. № 3).

Для расчета плоскостного вибратора (рис.4.2.в) могут быть использованы расчетные формулы, относящиеся к электрическому вибратору цилиндрической формы. Нужно только учесть [1], что поперечное сечение металлической ленты шириной $d \ll \lambda$ в расчетах входных импедансов (проводимостей) эквивалентно цилиндру с круговым сечением, имеющему радиус $a = d/4$.

2. Методика измерения диаграммы направленности антенны и описание установки

Лабораторный стенд позволяет измерять ДН антенн методом непосредственного отсчета по измерительному прибору. В стенде

расстояние между приемной и передающей антеннами велико в сравнении с длиной волны и размерами антенн. В противном случае экспериментально снятые характеристики будут отличаться от характеристик антенны в дальней зоне (см. лаб. раб. № 1). Стенд работает в дециметровом диапазоне волн.

В работе исследуется симметричный электрический вибратор. Для измерения диаграммы направленности вибратор поворачивается в горизонтальной плоскости в пределах $0 - 360^\circ$. Блок схема измерения изображена на рис.4.3.

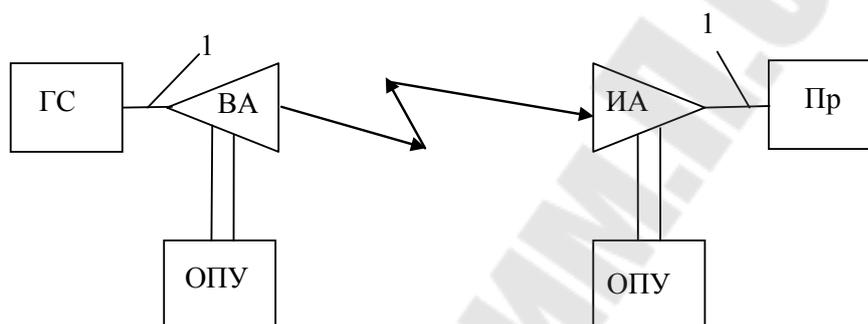


Рис. 4.3. Блок-схема измерения ДН симметричного вибратора

Здесь обозначено: ГС – высокочастотный генератор, ВА – вспомогательная антенна (передающая), ИА – исследуемый вибратор (приемная антенна), Пр – высокочастотный приемник, 1 – высокочастотная линия передачи, ОПУ – опорно-поворотное устройство.

Вспомогательная антенна работает в передающем режиме, исследуемый вибратор – в приемном. Антенны располагаются на поворотных устройствах. Высокочастотный генератор (Г4-144 или встроенный генератор от вольтметра SMV-8,5) работает в режиме непрерывной генерации. В качестве измерительного приемника используется селективный вольтметр SMV-8,5.

Кроме того, в установке используются соединительные коаксиальные кабели с разъемами.

Макеты исследуемых и вспомогательных антенн совмещены с симметрирующими устройствами.

Измерения ДН выполняются следующим образом:

1. Собрать измерительный стенд с антеннами на поворотных устройствах. Включить генератор и измерительный приемник, дать им прогреться.

2. Совместить плоскость поляризации вспомогательной антенны с плоскостью вращения поворотного устройства (вибраторы обеих антенн должны быть горизонтальны).

Настроить генератор и приемное устройство на необходимую частоту. По максимуму показаний индикатора направить друг на друга максимумы излучения исследуемой и вспомогательной антенн. Удобно для сокращения вычислений при нормировании диаграмм направленности с помощью регулировок выходной мощности генератора и чувствительности приемника установить показания индикатора приемника на цифру 10. Установить шкалу поворотного устройства на нуль.

3. Поворачивая исследуемую антенну на необходимый угол, измерить принимаемый сигнал. В пределах ширины главного лепестка ДН по нулям обычно достаточно измерить 10 – 20 точек, в боковых лепестках – максимумы и минимумы и ещё 2 – 3 точки. Учесть, что значения напряжения на шкале селективного вольтметра SMV-8,5 выражены в дБ-ах.

В работе исследуется также уровень согласования входа вибраторной антенны с питающим кабелем. Это выполняется с помощью измерительной линии P1-5. Сигнал с выхода генератора Г4-144 подается на вход линии, к ее выходу подключается исследуемая антенна. Сигнал на выходе детекторной секции измерительной линии измеряется вольтметром В7-40. Коэффициент стоячей (или бегущей) волны на входе антенны определяется по максимальному и минимальному значению напряжения. Градуировочная характеристика детектора измерительной линии считается квадратичной. Для этого мощность сигнала на выходе генератора устанавливается такой, чтобы напряжение на вольтметре не превышало 10 мВ. Генератор при измерениях работает в режиме непрерывной генерации, вольтметр – в режиме измерения постоянного напряжения. Волновое сопротивление питающего кабеля 75 Ом.

3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со структурной схемой, аппаратурой и элементами измерительной установки, описанием приборов.

2. С помощью формул (4.1) и (4.2) рассчитать и построить диаграмму направленности симметричного вибратора. Конструкция, размеры вибратора и частота возбуждения указываются преподава-

телем. ДН строить в E - (меридиональной) и H - (экваториальной) плоскостях в прямоугольной и полярной системах координат.

3. По материалам данного пособия изучить методики измерения диаграммы направленности вибраторной антенны и уровня согласования входного сопротивления антенны с питающим кабелем.

4. Собрать установку согласно рис. 4.3. Включить измерительные приборы и дать им прогреться.

5. Установить на генераторе заданную частоту.

6. Измерить диаграмму направленности вибратора в E -плоскости. Измерения выполнить в диапазоне углов $0-180^\circ$ относительно направления максимального излучения, шаг изменения угла 5° .

7. Пронормировать полученные результаты на максимальное значение диаграммы направленности. Сравнить их с расчетными результатами, построив их на одном графике.

8. Собрать стенд для измерения уровня согласования входа вибраторной антенны с питающим кабелем (см. п. 2). Установить выходную мощность генератора такой, чтобы значение на индикаторе измерительной линии не превышало 10 мВ. Передвигая каретку измерительной линии, измерить минимальное и максимальное значения напряжения в линии. При этом учесть квадратичность характеристики детекторной секции измерительной линии, рассчитывая напряжения в линии как корень квадратный из показаний вольтметра. Рассчитать коэффициент стоячей волны на входе вибраторной антенны.

9. Оформить отчет о проделанной работе.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

– структурную схему измерительной установки, назначение её элементов;

– протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем;

– результаты расчета и измерения диаграммы направленности вибратора;

– результаты измерения коэффициента стоячей волны на входе вибратора;

– выводы по работе. В выводах необходимо указать причины расхождения результатов эксперимента с теорией.

5. Контрольные вопросы

1. Какими электрическими параметрами характеризуется вибраторная антенна?
2. Что такое диаграмма направленности антенны?
3. Как в лабораторном стенде выбирается расстояние между вспомогательной и исследуемой антеннами?
4. Что такое коэффициент усиления антенны?
5. Нарисовать распределение тока по плечам симметричного вибратора при различных значениях отношения l/λ .
6. Нарисовать диаграмму направленности симметричного вибратора в E - и H -плоскостях.
7. Назначение и основные технические данные приборов, входящих в измерительную установку.
8. Как измеряется диаграмма направленности антенны?
9. Чем определяется точность измерения диаграммы направленности антенны?
10. Как в лабораторной работе измеряется КСВ на входе вибраторной антенны?
11. Чем определяется полоса рабочих частот вибраторной антенны?
12. Чем определяется коэффициент усиления вибраторной антенны?

6. Литература

1. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ. / – М. : Высш. школа, 1988. – С.191-201, 222-232, 246-251.
2. Марков Г. Т. Антенны. – М. : Энергия, 1975. – с. 55–67, 78–81, 335–340.
3. Ерохин, Г. А. И др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007.
4. Конспект лекций по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

ПРИЛОЖЕНИЕ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН ВСЕ О ПРОГРАММЕ MMANA

ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ MMANA

MMANA – это программа моделирования проволочных антенн, работающая в среде Windows. Программа позволяет:

- Создавать и редактировать описания антенны как заданием координат, так и мышкой.
- Рассматривать множество разных видов антенны.
- Рассчитывать диаграммы направленности (ДН) антенн в вертикальной и горизонтальной плоскостях (под любыми вертикальными углами).
- Одновременно сравнивать результаты моделирования нескольких разных антенн (ДН и все основные характеристики).
- Редактировать описание каждого элемента антенны, включая возможность менять форму элемента без сдвига его резонансной частоты.
- Редактировать описание каждого провода антенны. Имеется возможность перекомпоновки антенны без утомительного перебора цифр координат, простым перетаскиванием мышкой (практически всю антенну можно нарисовать и редактировать одной мышкой);
- Просчитывать комбинированные провода, состоящие из нескольких, разных диаметров.
- Использовать удобное меню создания многоэтажных антенн – стеков, причем в качестве элемента стека можно использовать любую существующую или созданную вами антенну.
- Оптимизировать антенну, гибко настраивая цели оптимизации: $Z_{вх}$, $K_{СВ}$, усиление, F/B , минимум вертикального угла излучения.
- Задавать изменение при оптимизации более 90 параметров антенны. Возможно описание совместного (зависимого) изменения нескольких параметров.
- Сохранять все шаги оптимизации в виде отдельной таблицы. Это полезно для последующего неспешного просмотра и анализа.
- Строить множество разнообразных графиков: $Z_{вх}$, $K_{СВ}$, усиления, отношения излучений вперед/назад (F/B), включая показ зависимости ДН от частоты.
- Автоматически рассчитывать несколько типов согласующих устройств (СУ), причем возможно включать и выключать их при построении графиков.
- Создавать файлы-таблицы (формата *.csv, просматриваемого в *Excel*) для всех переменных расчетных данных: таблицы токов в каждой точке антенны, зависимости усиления от вертикальных и горизонтальных углов, таблицы основных параметров антенны как функций частоты, и таблицу напряженности электрического и магнитного полей антенны в заданном пространстве. Она необходима для определения соответствия антенны на требования электромагнитной совместимости.

- Рассчитывать катушки, контура, СУ на LC элементах, СУ на отрезках длинных линий (несколько видов), индуктивности и емкости, выполненные из отрезков коаксиального кабеля.

Ограничений по взаимному расположению проводов нет. Это означает, что любая конфигурация проводников будет рассчитана корректно. Максимальное число: проводов – 512, источников – 64, нагрузок – 100.

ЗАКЛАДКА «ГЕОМЕТРИЯ»

Описание проводов

При старте программы открывается закладка **Геометрия** и вы видите несколько полей сверху и три таблицы, на которой открыт файл уже имеющейся антенны (меню **Файл - Открыть**), например, ...:/ММАНА/АНТ/УКВ направленные/4deltaб.maa (это четырехэлементная «дельта» диапазона 50 МГц, все следующие рисунки сделаны для этого файла).

Эта закладка – базовое описание антенны.

Поле **Имя** – это название антенны, любое, какое вы зададите. Оно будет фигурировать сверху всех закладок, и под этим же именем антенна будет выводиться при ее последующем сравнении с другими.

Поле **F...MHz** – основная частота антенны. Это значение будет использоваться в последующих расчетах по умолчанию (если вы не зададите там иное значение). В этом поле имеется удобный для выбора список частот – по несколько из каждого любительского диапазона, а если вам нужна специфическая частота, то просто введите ее значение вручную.

Первая таблица **Провода** – это описание проводов. В методе моментов любая антенна представляется как набор проводов. Каждая строка в этой таблице – описание одного провода: $X1, Y1, Z1$ – это координаты в трехмерном пространстве начала провода, а $X2, Y2, Z2$ – то же самое, но конца провода. R – радиус провода (обратите внимание, не диаметр, а именно радиус). Размерность всех этих величин можно задавать либо в метрах (для R в мм), либо в длинах волн установкой флага в верхнем левом окошке **В лямбдах**. Если вы задали размерность в λ , то при изменении частоты будут изменяться и размеры антенны в метрах и в λ будут показываться размеры во всех других окнах.

В ячейки таблицы можно вводить не только цифры, но и арифметические выражения – они будут автоматически просчитаны. Допустимы знаки $+ - / * ()$. Например запись вида $10/4+2$ после нажатия **Enter** сменится вычисленным значением 4,5. Такой оперативный калькулятор временами бывает очень удобен, например, при делении провода на части, или, если вы вводите описание антенны, размеры которой даны в футах. Можно прямо вводить значение в футах, не забывая дописать после цифры в футах $*0.305$, и все будет автоматически пересчитано.

Если величину R установить равной 0, то данный провод будет восприниматься программой изолятором. Такой прием удобен при анализе сложных многопроводных антенн для экспериментов: можно временно удалить из анализи-

руемой антенны провод (не удаляя его из таблицы описания), установив его радиус равным 0. При этом сегменты этого провода исключаются из расчета, поэтому вычисления будут несколько быстрее.

Если величину R установить отрицательной (например, -1 , -2 , -3 и т.д.), то это означает, что данный провод комбинированный, и физически состоит из нескольких проводов или труб разного радиуса. Если провод создали вы и сами установили $R = -1$, то надо задать и описание комбинированного провода. Для этого во всплывающем под правой кнопкой мышки меню выберите пункт **Установки комбинированного провода**, и в появившемся окне-табличке **Установки комбинированного провода** объясните компьютеру, каким образом, из труб какого диаметра и какой длины вы намереваетесь составить этот провод.

Способ расположения труб по уменьшению диаметра (от центра провода к его краям, или от начала к концу) выбирается из всплывающего под **двойным левым** (именно левым – это не опечатка!) щелчком мыши по табличке в графе **Туре** из следующих значков:

- $\leftarrow\rightarrow$ Самая толстая труба в центре, уменьшение радиуса к каждому из краев провода. Вариант вибратора волнового канала.
- \rightarrow Самая толстая труба в начале провода, уменьшение радиуса к концу провода. Вариант штыря.
- $\leftarrow\rightarrow^*$ Почти то же самое, что и $\leftarrow\rightarrow$, но при переменной сегментации (что это такое – несколькими абзацами ниже), уплотненная расстановка точек будет осуществляться не только по концам провода, но и вокруг каждого места физического изменения радиуса (стыка труб), что повышает точность расчетов.

- \rightarrow^* Отличается от \rightarrow тем же самым, что и $\leftarrow\rightarrow^*$ от $\leftarrow\rightarrow$.

Например, откройте файл *...ANT/KB направленные/ 3el20.maa*. Установлен $R = -1$ выбран тип $\leftarrow\rightarrow^*$, в таблице описано следующее: $L0$ (в типе $\leftarrow\rightarrow$ это будет центральный отрезок, счет идет от середины провода к его краям) = 1,8 м, реальный физический радиус этого куска $R0 = 15$ мм.

Далее $L1 = 1,8$ м, реальный радиус $R1 = 12,5$ мм. Это означает, что к каждому из концов трубы $L0$ пристыкованы трубы (их будет две – по одной с каждой стороны) длиной по $L1 = 1,8$ м и радиусом $R1 = 12,5$ мм. И, наконец, $L2$ это длина кусков труб, пристыкованных к концам труб $L1$. Если это последний радиус, то удобно установить $L2 = 9999$ – это как раз и объясняет компьютеру, что крайние трубки, какой бы длины в последующих расчетах они не вышли, должны быть с радиусом $R2$, который в нашем примере составляет 10 мм. В данном примере мы описали следующий элемент: средняя труба длиной 1,8 м и радиусом 15 мм, далее по ее краям две трубы по 1,8 м с радиусом 12,5 мм, и далее в обе стороны до конца элемента (а какой он получится зависит уже от последующих расчетов или ваших установок) идут трубы с радиусом 10 мм.

А вот если бы в данной таблице был выбран тип \rightarrow или \rightarrow^* , то тогда это же описание соответствовало бы следующему элементу: первая труба с начала (уже не с середины!) провода 1,8 м длиной и 15 мм радиусом, вторая тоже 1,8 м и 12,мм радиусом, и третья – до конца провода 10 мм радиусом. Для волнового канала такой элемент конечно не нужен, а вот для вертикального излучателя – вполне пригодится.

Посмотреть реальные физические размеры труб комбинированного провода вы можете, выбрав во всплывающем меню закладки **Геометрия** пункт **Таблица размеров комб. провода**. В этой таблице дано число труб, из которых состоит ваш комбинированный провод, и их размеры.

Таким образом, вы можете описать любой провод с переменным радиусом. Если таких проводов несколько и различных по набору труб – обозначьте радиус каждого отдельной отрицательной цифрой и в табличке Установки комбинированного провода отдельными строками опишите, какой набор труб имеется в виду под каждым отрицательным значением R.

Если вы загружаете файл антенны, в которой уже есть установленные комбинированные провода (вы увидите отрицательные значения в столбце R), то чтобы увидеть, что на самом деле представляют собой такие провода, выберите во всплывающем меню пункт «Таблица размеров комбинированного провода» – в ней увидите все параметры. В большинстве имеющихся описаний «волновых каналов» уже установлены комбинированные провода, загрузите, например ...:/MMANA/ANT/KB направленные/bell10.maa (это 6-элементный волновой канал на 28 МГц) и посмотрите.

Отметим, что одно и то же значение отрицательного радиуса (-1, например) в разных антеннах может означать совершенно разные установки физических размеров (как задал проектировщик данной антенны), поэтому всегда смотрите таблицу размеров комбинированного провода.

Рекомендуется при описании геометрии антенны располагать ее так, чтобы предполагаемый максимум излучения был направлен в положительном направлении оси X, элементы – в направлении оси Y, высота антенны – в направлении оси Z. В принципе, можно этого и не делать – ДН и входное сопротивление антенны также будут рассчитаны корректно, но MMANA по умолчанию считает усиление антенны Ga и отношение излучений вперед/назад F/V именно вдоль оси X. Поэтому, если ваша антенна окажется повернута к оси X например боком, то значения Ga и F/V будут весьма странными. Забегая далеко вперед, замечу, что поправить такую ситуацию уже на нарисованной антенне можно, выбрав в меню **Правка** команду **Вращать** и далее **Вокруг оси Z на 90 град**.

Если вы проектируете GP, то нижний конец провода должен иметь $Z = 0$, иначе программа «не увидит землю» (кроме случая с отдельными приподнятыми радиалами, явно нарисованными, как отдельные провода). Не стремитесь поднимать антенну над землей, увеличивая значения Z, для задания высоты. В программе для этого есть отдельная опция. Точка начала координат ($X = 0, Y = 0, Z = 0$) удобна для размещения в ней середины питаемого элемента. Не рекомендуется без необходимости смещать антенну от нулевых значений по осям X и Y, иначе при обзоре и правке вы можете ее легко «потерять из виду», так как по умолчанию все виды антенны показывают в центре именно начало координат.

Электрическое соединение проводов осуществляется автоматически, как только совпадут все три координаты начала или конца провода. Соединение осуществляется только при совпадении координат начала или конца проводов, при пересечении же их в пространстве в любой другой точке (кроме начала и конца) не приводит к электрическому соединению. Например, если вы проекти-

руете вертикальную Т-образную антенну, то недостаточно двух проводов – одного вертикального и одного горизонтального. В этом случае не будет контакта с серединой горизонтального провода: необходимо три провода – один вертикальный и подключенные к его концу два горизонтальных.

Величина *Seg* определяет число точек (сегментов), на которое разбивается провод при моделировании. Если величина *Seg* установлена положительной, от 1 и больше – это режим ручного разбиения на сегменты, который принят в большинстве других моделирующих программ. В принципе, чем на большее количество сегментов разбивается провод, тем точнее результаты моделирования. Обычно считается, что достаточно несколько (4–6) сегментов на длине провода в четверть волны. Но тут есть свои сложности, поскольку львиная доля всех ошибок при моделировании происходит именно из-за неверного разбиения провода на сегменты. Правильно разбить провод на сегменты в методе моментов неподготовленному пользователю весьма непросто. Поэтому поначалу я бы рекомендовал пользоваться только имеющимся в *MMANA* (и очень удобным) режимом автоматического деления на сегменты, для установки которого достаточно установить величину *Seg* равной 0 или отрицательному числу.

Параметры автосегментации зависят от величин, установленных в полях *DM1* и *DM2*. Когда вы хотите получить автоматическое деление на равные части, установите *Seg* = 0. В этом случае провод будет разбит на сегменты длиной $\lambda/DM2$.

Для повышения точности моделирования весьма желательно, чтобы плотность сегментов была переменной – минимальной в середине провода и максимальной на его концах. Автосегментация с переменной плотностью достигается установкой значения *Seg* равным -1 , -2 или -3 . Если установлено -1 , то включается режим уплотненной расстановки сегментов на обоих краях провода, причем величина сегментов будет убывать от $\lambda/DM2$ до $\lambda/DM1$. Установка -2 – то же самое, но только в начале провода, -3 – только в его конце.

Параметр *EC* – множитель уплотнения, увеличивая его можно добиться более плотной расстановки точек на концах провода. Показывает, во сколько раз уменьшается размер сегмента на краю провода. Допустимые значения 1–64.

Параметр *SC* (его значение должно быть больше единицы, но меньше, либо равна 3, допустимы дробные значения) – определяет, с какого расстояния от края провода начнет возрастать плотность сегментов. При *SC* = 1,001 уплотнение сегментов начинается уже от самой середины провода, при *SC* = 3 добавляется только по одной точке в начале и конце (по умолчанию *SC* = 2). Не устанавливайте *SC* = 1, при этом возможно «зависание» программы.

Практический совет. Пока вы не наберетесь достаточного опыта – не трогайте установленные по умолчанию значения *DM1*, *DM2*, *EC* и *SC*, а параметр *Seg* всегда ставьте равным -1 для оптимальной автосегментации. Эти настройки дают весьма хорошие результаты в подавляющем большинстве случаев. Только в некоторых специальных случаях, например параллельное соединение нескольких проводов с пучностями напряжения на их концах или наличие пучностей напряжения в середине провода между двумя соседними сегментами, может иметь смысл увеличить параметр *EC* до 2–4 и уменьшить *SC* до 1,1...1,2.

Ответ на вопрос, как именно можно определить, не требуется ли в вашем случае увеличить число сегментов, есть в конце книги (ответы на часто задаваемые вопросы).

Автосегментация – это очень полезная функция *MMANA*, позволяющая, во-первых, свести к минимуму ошибки при ручном разбиении на сегменты. А во-вторых, поскольку при автосегментации длина сегмента пропорциональна длине волны, исключить ошибки связанные с изменением частоты.

Установленный флаг в поле **Не разрывать** позволяет при последующем редактировании антенны и перемещении провода не разрывать электрически соединенные с ним другие провода, перемещая их вместе с исходным проводом.

Всплывающее меню

Мы уже упоминали, о всплывающем (под правой кнопкой мыши) меню – его опциях **Установки размеров комбинированного провода** и **Таблица размеров комбинированного провода**. Почти все команды этого меню имеют «быстрые» клавиши (подчеркнутые буквы) и «горячие» клавиши (написаны рядом). Не будем останавливаться на самоочевидных командах Удалить, Добавить – рассмотрим другие:

- **Поменять местами начало и конец** (обменивает координаты начала и конца провода). Бывает очень полезна, когда вы случайно установили источник или нагрузку не на ту сторону провода, которую нужно.

- **Поиск и замена** позволяет заменить значение координаты новым, причем по выбранным осям. Специальный флаг позволяет менять и зеркальные значения (удобно для симметричных антенн).

- **Подвинуть** – перемещение по выбранным координатам. Здесь нередко ошибка пользователя. По умолчанию в меню **Подвинуть** стоит флаг в поле **Выделенную точку**, и если вы хотите подвинуть всю антенну, то надо переставить флаг в поле **Все координаты**, ибо иначе подвинется только одна точка и форма антенны исказится.

- **Описание провода** – подробная таблица, описывающая все параметры выбранного провода (есть даже полярные координаты!). Удобна при различных правках антенны, когда вы хотите что-то поменять в описании данного провода без захода в закладку **Геометрия**.

- **Сервис и установки** – под этой командой прячется обширное, очень интересное и полезное меню (в которое можно попасть также через команду **Сервис** в самой верхней строке), которое, по сути, представляет собой несколько разных, удобных расчетных программ. Пользоваться ими можно совершенно независимо от *MMANA*.

Источники

Левая нижняя табличка описывает источники. Прямо под словом *PULSE* пишется:

- *wlc* – если источник в середине первого провода,
- *wlb* – если он в начале первого провода,
- *wle* – если он в конце первого провода,

- $w2c$ – если он в середине второго провода, и т.д.

Если источник не в середине и не в конце, а где-то сбоку пишется так:

- $w1c4$ – источник, смещенный в направлении конца от центра первого провода на 4 сегмента (где именно получился источник можно посмотреть, нажав закладку **Вид**, о которой ниже).

- $w2c-5$ – источник, смещенный от центра первого провода в направлении его начала на 5 сегментов.

То есть первая буква – всегда w (от *wire* – провод), цифра – номер провода, буква за номером (b , c , e) – обозначение начала, середины и конца провода соответственно, а последняя цифра (ее может и не быть) – величина смещения в сегментах от начала конца или середины. Если вы устанавливаете источник на начало или конец провода проверьте, чтобы к этому началу или концу было что-нибудь присоединено – или другой провод, или земля (координата по $Z = 0$). Току куда-то надо утекать, т. е. второй вывод источника не может «висеть в воздухе».

Следующий столбец таблицы Источники – это фаза источника в градусах. Если источник один, то его фаза безразлична. Но если вы проектируете систему с активным питанием и соответственно несколькими источниками, то в каждом должна быть установлена нужная фаза.

Последний столбец этой таблицы – напряжение источника. Если источников несколько, вы можете вручную установить амплитуду каждого из них, либо, установив флаг «Одинаковые источники» включить автоматическое уравнивание амплитуд всех источников.

Нагрузки

Под термином «нагрузка» здесь понимается любая пассивная сосредоточенная цепь – резистор, реактивность, контур.

Расположение и вид нагрузок описываются в таблице **Нагрузки**. Положение нагрузки задается точно также как и положение источников в столбце **PULSE**. Тип нагрузки задается в следующем столбце выбором из меню, всплывающего под левой кнопкой мыши (курсор должен быть в этом столбце): LC , $R+jX$, S .

При выборе LC можно описать:

- Катушку. Столбец L – индуктивность в мкГн, в столбце C – 0, в столбце Q – добротность катушки (0 в этом столбце означает катушку без потерь, то есть с бесконечной добротностью).

- Конденсатор (столбец L – 0, столбец C – емкость в пФ).

- Параллельный колебательный контур. Либо заполнив столбцы L , C , Q , либо в столбце f (MHz) заполнив только L или только C , и, не вводя второй параметр, указать резонансную частоту контура в МГц – недостающий параметр будет автоматически подсчитан. Удобно для описания трапов.

При выборе $R+jX$ в соответствующих столбцах просто указываются активное и реактивное части сопротивления нагрузки в Омах. Для задания резистора указывается только R .

При выборе S , устанавливается режим описания Лапласова типа нагрузки. Этот тип нагрузки наиболее полезен для представления сложных, комбинированных цепей, которые не могут быть представлены другими типами нагрузок. Этот режим удобен для описания сложных последовательнопараллельных цепей из множества реактивностей, например многорезонансных контуров.

Любая комбинация R , L и C может быть представлена Лапласовым типом нагрузок. Описание нагрузки вводится как коэффициенты полинома Лапласа требуемой цепи.

Первый коэффициент задается так: числитель дроби A_0 , знаменатель B_0 , второй коэффициент A_1 и B_1 и т.д. По крайней мере один коэффициент знаменателя должен быть ненулевым. *MMANA* допускает описание полинома (и соответственно цепи) до 13-го порядка (сравните новый и дорогой *EZNEC* – только до пятого). Не используйте этот тип нагрузок, если вы не знакомы с использованием преобразования Лапласа, рассмотрение которого не входит в задачу этой книги.

Для включения нагрузки в состав антенны надо установить флаг в поле **Включить нагрузку(и)**. При отсутствии этого флага описанные в таблице нагрузки при моделировании считаются отключенными (удобно для экспериментов по выяснению влияния нагрузки на параметры антенны). Из типичных ошибок – указать провод, в котором задана нагрузка, и не описать ее (все нули или пустые столбцы). Это приводит к остановке вычислений. Либо удалите эту нагрузку, если она вам не нужна, либо опишите ее до конца.

Появляющаяся справа над табличкой **Нагрузки** кнопка **Комментарии** вызывает текстовый файл, в котором записаны любые дополнительные данные об антенне. Эта кнопка появляется только тогда, когда при создании антенны были написаны какие-нибудь комментарии. Для создания комментариев на новой антенне используйте команду **Файл – Комментарии**. Эту опцию удобно использовать как записную книжку для хранения сведений, относящихся к данной антенне.

ЗАКЛАДКА «ВИД»

Выбрав эту закладку можно посмотреть внешний вид в трехмерном пространстве описанной вами антенны (или взятой из готового файла) и распределение сегментов и токов по ней. Последнее возможно только после предварительного проведения расчета в закладке **Вычисления**, о которой речь пойдет позднее.

Движками **Верт. вращение**, **Гор. вращение** и **Масштаб** можно внимательно рассмотреть антенну со всех сторон. Если вы потеряли из виду антенну, нормальное изображение восстанавливается либо флагом **Нормальный вид**, либо нажатием одной из двух кнопок **Центр на антенне** или **Центр на $X=0, Y=0, Z=0$** .

Первая кнопка помещает в центр экрана геометрический центр антенны (автоматически изменяя при этом масштаб таким образом, чтобы в экран поместилась вся антенна целиком), вторая – в начало координат (выбранный масштаб

при этом не меняется). Источники показаны красными кружками, нагрузки – красными крестиками. Напоминание об этом «висит» в левом верхнем углу окна. При установке флага «сегменты» зелеными крестиками показываются точки разбиения проводов на сегменты. Это удобно делать, чтобы изучить, как меняется сегментация провода при установке разных значений в поле **Seg** закладки **Геометрия** и влияние на параметры автосегментации (при **Seg** равной отрицательной величине) изменение значений DM1, DM2, SC, EC.

При установке флага «токи» показывается распределение тока в проводах (для этого предварительно должны быть сделан расчет антенны в закладке **Вычисления**). Масштаб отображения токов регулируется соответствующим движком. **Просмотр** распределения тока по антенне весьма желателен.

Всплывающее меню

В этом меню (под правой кнопкой мыши) часть команд такая же как и во всплывающем меню закладки.

Остановимся только на новых командах:

- **Центр изображения на этой позиции** – устанавливает центр обзора на выбранное курсором место. Полезно, если вы хотите детально рассмотреть какой-либо фрагмент антенны. Перед тем как растянуть масштаб изображения, установите интересующий вас участок на центр. Тогда при растяжке он не «убежит» за экран.

- **Удалить источник** – тут почти все ясно. Почти – потому что для активизации этой команды надо предварительно выделить тот провод, в котором этот источник установлен.

- **Передвинуть/добавить источник в** и далее выбрать из следующего окна, куда именно (в начало, конец или середину) вы хотите поместить источник. Предыдущее заме

ЗАКЛАДКА «ВЫЧИСЛЕНИЯ»

Параметры окна

В этом окне производятся установки условий расчета, выводится ход расчета и окончательные результаты. В окне **Частота** устанавливается частота анализа антенны (по умолчанию берется частота, установленная в закладке **Геометрия**). В этом поле имеется удобный для выбора список частот, по несколько из каждого любительского диапазона, а если вам нужна специфическая частота, то введите ее значение вручную.

Правое окно – информационное. Оно отображает текущее состояние расчета. Туда же выводятся сообщения о возможных ошибках расчета.

В окошке **Земля** выбирается тип земли. Пункты **Свободное пространство** и **Идеальная** пояснения не требуют, а вот при установке **Реальная земля**, в этом же окошке появляется кнопка **Параметры**, которая вызывает окно **Параметры реальной земли**.

Высота антенны над землей устанавливается в поле **Высота** (естественно, этого можно не делать, если в окошке **Земля** выбрана опция **Свободное пространство**). Программа поднимает антенну вверх по оси Z .

В поле **Материал** выберите из списка материал антенны. Тип материала оказывает заметное влияние на УКВ и укороченных КВ антеннах.

Меню «Графики»

Теперь, когда мы увидели результаты расчета антенны в таблице, было бы неплохо более детально изучить их. Для этого жмем на кнопку **Графики**. В поле **Полоса** устанавливается ширина полосы частот (относительно центральной), в которой вы хотите посмотреть параметры (как и во всех подобных) полях. Этот параметр можно либо выбрать из списка, либо установить вручную. Выбранное значение автоматически устанавливается по горизонтальной оси графика. Далее кнопками вверху выбирается число точек расчета. Для первого анализа достаточно нажать **2 точки** – график будет построен грубо, только по двум точкам. Остальная часть его будет построена сложной экстраполяцией – предположениями *MMANA* как же этот график должен по ее мнению идти дальше.

Точность таких предположений довольно высока, но конечно не абсолютна. Кроме того, на антеннах с нестандартным поведением *KCB* от частоты (широкополосных, например) предположения *MMANA* оказываются неточными. При нажатии **Вся сетка** – просчитываются пять точек – каждый шаг сетки, чем уточняется предыдущий график. При нажатии **Доп. точки**, кроме пяти точек сетки, просчитываются несколько дополнительных точек между шагами сетки (по умолчанию 1, максимум 4), что позволяет иметь уже весьма точный и подробный график из 20 точек.

Последовательно выбирая закладки **Z**, **KCB**, **Gain/FB**, **ДН** можно наглядно увидеть, как меняются от частоты в заданном вами диапазоне параметры антенны (для тех же самых частот расчета).

Кнопка **Поиск резонанса** предназначена для автоматического поиска резонансной частоты антенны (т. е. той, на которой реактивная составляющая ее входного импеданса равна нулю). Это бывает полезно в некоторых случаях, а именно:

- Если обнаружить резонанс вручную упорно не удается.
- Для поиска резонансных частот несущих конструкций (мачт например).
- Для определения точного (в цифрах) значения резонансной частоты (не всегда удобно считывать ее значение с обычных графиков).
- После нахождения резонансной частоты на нее автоматически устанавливается центр всех графиков этого окна.

Два важных нюанса. Во-первых, резонансная частота

Закладка «Z»

Черной линией показан график $R(f)$, а красной) $-jX(f)$. Есть очень полезная функция – обеспечивающая возможность включить/выключить (во всплывающем под правой кнопкой мыши меню) на этом графике СУ согласующее

устройство. Оно автоматически уже рассчитано, и можно посмотреть, как изменится график.

Закладка «*KCB*»

Выводит график зависимости *KCB* от частоты. Размер графика по оси *KCB* автоматически адаптируется под получившиеся в процессе расчета значения, поэтому вы всегда увидите полный график.

Если же в заданной вами полосе есть значения с очень высоким *KCB*, то график становится чрезмерно плотным в области малых значений. Рассмотреть подробно область малых значений *KCB* можно либо, уменьшив полосу (до такой, в которой максимум *KCB* будет невелик – оценивается по исходному графику), либо, зайдя в закладку **Установки** в окне **Лимит *KCB***, выбрать желаемый верхний предел графика по *KCB*. Все значения выше этого уйдут за пределы окна, и график будет частично обрезан, но зато вы получите возможность детально рассмотреть график для малых *KCB*.

В углу графика написаны вычисленные полосы пропускания антенны по уровням *KCB* 1,5 и 2,0, что весьма удобно – не надо напрягаться и высчитывать их по клеткам. Также как и в предыдущем пункте на графике можно включить СУ (меню под правой кнопкой мыши) и посмотреть его влияние на согласование и полосу пропускания. Обратите внимание – бывают, на первый взгляд, нелогичные случаи, когда снижая *KCB* до 1 на резонансной частоте СУ, тем не менее, уменьшает полосу антенны по уровню $KCB < 2$.

Закладка «*Gain/FB*»

Выводит графики усиления $Gain(f)$ черным цветом и отношения излучений вперед/назад – красным.

Закладка «ДН»

Выводит разными цветами диаграммы направленности антенны для всех частот (шагов сетки) в рассчитанной полосе, а также табличку изменения основных параметров.

Это бывает очень полезно при подгонке антенны, когда требуемые характеристики и форма ДН могут оказаться не на центральной частоте, а где-то в стороне. В этой же закладке в окошке **ДН для поляризаций** можно выбрать для какой поляризации (вертикальной *V*, горизонтальной *H*, их суммы **Сумма** или для одновременного отображения разными цветами *V+H*) будут построены ДН.

Закладка «Установки»

*F*центр – центральная частота графика. По умолчанию совпадает с установленной в описании антенны в закладке **Геометрия**.

Лимит *KCB* – см. выше.

Число доп. точек – показывает, сколько дополнительных точек будет рассчитано между соседними шагами сетки (меняется только от 1 до 4, ручной ввод иных значений невозможен).

СУ на графиках – дублирует всплывающее меню.

F согласования – по умолчанию частота согласования (настройки СУ) равна центральной частоте. Но в этом окошке, по необходимости, можно установить и любую другую частоту согласования.

ЗАКЛАДКА «ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ»

Выбрав эту закладку, вы увидите ДН антенны в вертикальной и горизонтальной плоскости и табличку всех основных параметров антенны. ДН любой антенны является объемной трехмерной фигурой, в общем случае, неправильной формы. Отображение этой фигуры на плоских графиках *ММАНА* имеет свои особенности. ДН в вертикальной плоскости *ММАНА* представляет собой сечение плоскостью *X-Z* объемной ДН.

Для случая идеальной или реальной земли ДН в горизонтальной плоскости по умолчанию строится для зенитного угла, соответствующего максимальному уровню излучения.

Иное значение зенитного угла задается кнопкой **Установить значение зенитного угла**. Это полезно при изучении излучения антенны под малыми зенитными углами к горизонту и формы ее ДН при этом в горизонтальной плоскости.

Если антенна моделируется в свободном пространстве, то установленный по умолчанию зенитный угол для построения ДН в горизонтальной плоскости составляет 0 градусов.

МЕНЮ «ПРАВКА ПРОВОДА»

После того, как получены все параметры антенны, обычно возникает желание чего-нибудь в ней подправить. Конечно, это можно сделать, вернувшись в закладку **Геометрия** и изменяя вручную координаты проводов, но путь этот громоздок и весьма трудоемок. Гораздо проще нажать кнопку **Правка провода** и вызвать окно, которое представляет собой мощный *CAD*-редактор, позволяющий наглядно создавать и редактировать антенну только мышью без утомительного перебора цифр в закладке **Геометрия**.

В открывшемся окне имеются четыре закладки с очевидным назначением – трехмерный вид антенны, а также двухмерные в каждой из трех плоскостей. В трех последних случаях для облегчения проектирования на изображение накладывается координатная сетка с указанием масштаба.

Команды и кнопки

На правом поле окна, кроме очевидных движков **Масштаб** и **Вращать** (два движка – вокруг вертикальной и горизонтальной осей), имеются еще пять

кнопок (сразу под движком **Масштаб**) с пиктограммами. Первые три кнопки действуют только при выборе одной из закладок двухмерных видов ($X-Y$, $Y-Z$, $Z-X$) и устанавливают режим редактирования.

- Первая кнопка (с наклонной белой стрелкой) включает режим редактирования-перетаскивания правой кнопкой мыши существующих проводов. Щелчок – выделение провода (он при этом меняет цвет на красный), щелчок и удержание клавиши нажатой – перетаскивание провода. Причем, если вы возьмете выделенный провод за край (курсор совмещается с концом провода и превращается в крестик – это называется выделением конца провода), то будет перетаскиваться только один его конец, а второй останется на месте. Если же вы возьмете середину провода (при этом рядом с курсором появиться небольшой белый прямоугольник), перемещаться будет весь провод параллельно исходному положению. Электрические соединения при этом не разрываются, то есть будут перемещаться и концы тех проводов, которые электрически соединены с перемещаемым проводом.

- Вторая кнопка (с тонкой диагональной линией) включает режим рисования новых проводов. Просто щелкните в нужном месте координатной сетки правой кнопкой и, держа ее нажатой, нарисуйте провод. С этого действия обычно и начинается рисование новой антенны. Эта кнопка (в отличие от первой и третьей) также действует и на объемном виде, но с некоторыми ограничениями.

- На объемном виде нельзя рисовать провода с произвольными (висящими в воздухе) началами и концами, но зато можно (и нужно, потому что удобнее всего) соединять новыми проводами концы уже имеющихся проводов. Надо попробовать эту функцию, чтобы почувствовать, как она полезна. Создание сложных объемных антенн (вообще говоря, представляющее собой весьма сложную и трудоемкую задачу при вводе координат цифрами, как например в *EZNEC*, и вообще, во всех известных мне моделировщиках) при помощи этой функции превращается в сплошное удовольствие – простой и совершенно ясный ввод проводов в трехмерном пространстве.

- Третья кнопка (с квадратиком внутри) аналогична второй, но рисуется не один провод, а сразу «квадрат» или прямоугольник.

- При всех перемещениях координаты начала и конца провода меняются не произвольно, а с выбранным шагом координатной сетки.

- Следующие две отдельно расположенные кнопки относятся к управлению изображением, поэтому работают при выборе любой закладки изображения.

- Четвертая кнопка (с плюсом внутри) устанавливает центр изображения на начало координат ($X = 0$, $Y = 0$, $Z = 0$).

- Последняя пятая кнопка (с четырьмя стрелками по углам) устанавливает нормальный масштаб, помещая центр изображения на геометрический центр антенны. Это очень удобно, если вы «потеряли из виду» антенну.

В меню **Показ** имеется выбор из трех строк: **Все** – показ всех проводов антенны; **Плоск** – показ только тех проводов, которые лежат в одной плоскости с выделенным проводом; **Элемент** – показ только проводов, электрически соединенных с выделенным. Это меню полезно при редактировании сложных, объемных антенн, когда на плоских видах провода могут накладываться друг на

друга и надо временно удалить из рассмотрения не редактируемые в данный момент провода.

В окне **Сетка** устанавливаются параметры координатной сетки. Кроме очевидных флага **Вкл** и меню **Шаг** имеется флаг **Автошаг**, который, будучи включен, обеспечивает автоматическое изменение шага координатной сетки при смене масштаба изображения. Кроме имеющихся в списке шагов, вы можете вручную задать собственное значение шага (в метрах).

Под движками **Вращать** при выделении провода появляется его полное описание, включая его длину.

МЕНЮ «ПРАВКА ЭЛЕМЕНТА»

В этом меню объектом правки служит не отдельный провод, а элемент – несколько соединенных между собой электрических проводов. Например, одна рамка многоэлементного квадрата или один из диполей «волнового канала». Очень удобно для ввода и редактирования параметров многоэлементных антенн в очевидной, интуитивно ясной форме.

Закладка «Параметры»

Выводит таблицу основных параметров каждого элемента. Активный элемент подсвечен красным. Столбцы в этой таблице (по порядку):

1. Форма и расположение элемента :
2. Расстояние между элементами, считая либо от первого элемента, либо от активного (выбирается соответствующим флагом внизу).
3. Ширина элемента.
4. Высота элемента.
5. Длина (для электрически разомкнутого, например диполя) или периметр (для электрически замкнутого, например квадрата) элемента. Например, для «квадратов» или «дельт» не надо высчитывать размер и координаты сторон – просто задайте периметр, а все остальное сделает *MMANA*.
6. Радиус в миллиметрах (если элемент состоит из проводов разных радиусов, будет надпись *Mixt*).
7. *Seg* – сегментация (если элемент состоит из проводов с разным разбиением на сегменты, будет надпись *Mixt*).
8. Количество проводов в элементе.

Размерность величин в столбцах 2–5 (в метрах или в длинах волн) выбирается установкой соответствующего флага внизу.

Закладка «Вид»

Выбрав закладку **Вид**, можно оперативно посмотреть на антенну после преобразования формы элемента или правок в таблице закладки **Параметры**. Интерфейс и команды этого окна практически совпадают с главной закладкой **Вид** и не требует дополнительных пояснений.

МЕНЮ «ОПТИМИЗАЦИЯ»

Вернемся в закладку **Вычисления**. Поредактировав антенну вручную, приходим к пониманию, что добиться таким путем желаемого результата непросто (хотя и интересно) и что лучше использовать автоматическую оптимизацию.

После нажатия кнопки Оптимизация открывается соответствующее меню.

Окно «Параметры вычислений»

В этом окне надо объяснить компьютеру, что же именно вы хотите получить в результате оптимизации от антенны, т. е. установить цели. Это делается семью движками, положением движка задается важность (удельный вес) данного параметра для вас. Крайнее левое положение движка – параметр для вас совсем не важен, крайнее правое – максимально важен.

Назначение движков *F/B*, *Gain*, *KCB* очевидно, а вот остальные требуют пояснений.

- Движок **Верт. угол** подразумевает максимально низкий вертикальный угол максимума излучения.
- Движок *jX* – минимальную (по модулю) реактивную часть входного сопротивления антенны.
- Движок **Согласование** – оптимальное согласование под специально заданный в окне **Детальные установки цели** импеданс.
- Движок **Ток** – минимум или максимум тока в заданной точке.

Кнопка «Установки цели»

Кнопка **Установки цели** вызывает окно **Детальные установки цели**. В закладке **Цель** задаются:

- В окне **Допустимый максимум** устанавливаются максимальные величины *Gain*, *F/B*, *jX*, *KCB*, достижение которых будет считаться конечным результатом оптимизации.

- В окне **Согласование** выбирается тип согласования или устанавливается выбранный импеданс, под который будет производиться согласование. Это окно задает параметры для движка **Согласование** предыдущего раздела. Тип **Согласование индуктивностью** означает выбор такого входного импеданса антенны, который может быть согласован с выбранным сопротивлением питающего кабеля при помощи параллельной катушки или петли индуктивности в виде U-образной шпильки (так называемое *hairpin*-согласование).

- Тип **Согласование емкостью** – почти то же самое, но вместо согласующей катушки используется параллельный согласующий конденсатор. Такое согласование возможно, только если активная часть входного импеданса антенны меньше волнового сопротивления кабеля, а реактивная носит индуктивный характер. Это нечастый случай, но, например, так можно согласовать GP немного длиннее четверти длины волны с входным импедансом $40 + j19$ Ом. Подключение параллельно конденсатора с реактивным сопротивлением $-j19$ Ом приводит к тому, что входное сопротивление оказывается равным точно 50 Ом.

- В окне **Цель тока** устанавливается, в какой точке и минимума или максимума тока надо достичь. Это окно задает параметры для движка «Ток» предыдущего раздела. Скажем, вы хотите иметь пучности напряжения или тока в заданных точках провод, например того, который доступен случайному касанию посторонними людьми, и наличие высокого напряжения (то есть минимума тока) на нем нежелательно.

В закладке **Установки** задаются:

- Окно **Направление тыла для F/B** . *MMANA* при подсчете отношения F/B берет уровень излучения не только точно назад, а в некотором, задаваемом в этом окне угловом диапазоне. Это очень разумный подход. В самом деле, что толку, если антенна имеет подавление строго назад (азимут 180 градусов) скажем, 30 дБ, но зато в паре задних лепестков ДН (на азимуты 135 и 225 градусов) только на 6 дБ. Это типично, например, для антенны *G4ZU*.

В данном меню устанавливается угловой диапазон, и излучение назад считается по наибольшему уровню в этом диапазоне. Установленный по умолчанию **Азимут** 120 град означает, что излучением назад будет считаться в азимуте от 120 до 240 градусов (180 ± 60). Аналогично **Элевация** 60 градусов – это диапазон вертикальных углов от 0 до 60 градусов.

- Окно **Стандартное Z** устанавливает Z , при котором $KCB = 1$, можно даже установить комплексное Z . Кнопка **Установить Z для *hairpin* согл.** позволяет установить Z для случая *hairpin*-согласования. При нажатии этой кнопки программа в открывающемся окне просит ввести волновое сопротивление кабеля (оно должно быть больше активной части Z , иначе такое согласование невозможно), и затем автоматически подсчитывается необходимая реактивная часть Z антенны.

Кнопка «Источники по диапазонам»

Выводит окно **Установка источников по диапазонам**, которое позволяет задать оптимизацию на разных частотах одного диапазона (для обеспечения широкополосности антенны) или для многодиапазонных антенн – сразу на нескольких диапазонах.

Изменяемые параметры

Теперь, когда вы установили, к какой цели стремиться, объясните компьютеру, изменением каких параметров это надо сделать. Другими словами, что в конструкции и параметрах антенны можно менять и в каких пределах. Для этого имеется таблица **Изменяемые параметры** со следующими столбцами (все значения можно устанавливать и вручную):

- Первый – тип изменяемого параметра. Щелкнув в этом столбце левой кнопкой мыши, увидите первое всплывающее меню, из которого этот тип выбирается.

- Второй – номер провода, источника, нагрузки, элемента в соответствии с их нумерацией в закладке **Геометрия** и меню **Правка элемента**.

- Третий – что именно вы хотите менять в выбранном в первом столбце типе. Щелкнув в этом столбце левой кнопкой мыши, увидите второе всплываю-

щее меню, в котором выбирается конкретный параметр для изменения. Обратите внимание, для каждого типа, выбранного в первом столбце, имеется свое отдельное второе всплывающее меню.

- Четвертый – кооперация (совместная, зависимая оптимизация). Очень часто нельзя или нежелательно менять размеры (или иные параметры антенны независимо друг от друга). Самый простой пример – вибратор волнового канала, координаты дальних его концов должны меняться одинаково по модулю, но с противоположным знаком, иначе вибратор перестанет быть симметричным. Как правило, если позволить менять размеры антенны независимо друг от друга да еще во все стороны, то результатом оптимизации будет нечто перекошенное весьма странной формы, мало напоминающее антенну. Чтобы избежать этого четко продумайте, что именно вы позволяете менять в антенне, и не стоит ли изменение данного параметра сделать зависимым (связанным) от какого-то иного?

- Пятый – шаг изменения величины. По умолчанию вычисляется автоматически, исходя из текущего значения величины. Но нередко имеет смысл изменить его вручную на более мелкий. Например, при оптимизации размеров рефлектора на максимум F/B или при оптимизации по KCB индуктивности настроечной катушки узкополосной антенны, чтобы в обоих случаях не проскочить оптимум из-за слишком грубого шага.

- Шестой – минимальное значение величины. По умолчанию обычно минимально возможное. Почти всегда имеет смысл изменить его на что-то более реальное (если вы в состоянии, хотя бы ориентировочно, оценить пределы изменения). Например, совершенно ясно, что директор волнового канала на 14 МГц ну никак не может быть короче 8 м, и этой величиной стоит ограничить его минимум.

- Седьмой – максимальное значение величины. Все то же самое, что и в предыдущем пункте. Необходимо думать и ограничивать верхнее значение изменения параметра более или менее реальной величиной (тот же директор из предыдущего примера никогда не будет длиннее 11 м), если вы не хотите получить в результате ненормально большие параметры.

- Восьмой – исходное (нынешнее) значение величины. Должно быть больше минимума, но меньше максимума. В случае необходимости это значение можно вручную поменять без выхода в закладку **Геометрия** или меню **Правка провода** или **Правка элемента**.

Команды первого всплывающего меню

- **Провод** – единица измерения метры. Не забудьте вручную установить во втором столбце номер провода, который вы хотите оптимизировать. Щелкнув левой кнопкой мыши на третьем столбце строки, описывающей провод, во втором всплывающем меню выберите, какие именно координаты ($X1$, $Y1$, $Z1$, $X2$, $Y2$, $Z2$) провода или его радиус (в мм) будут изменяться.

- **Провод (полярные координаты)** – то же самое, но в полярных координатах. Удобно использовать для оптимизации углового положения или длины наклонного провода. Выбираемые в этом меню координаты имеют привязку к началу, середине или концу провода – выбранное место провода будет оставать-

ся неподвижным. Например, если выбрана **Длина (стартовая точка)** то будет меняться длина провода без изменения его углового положения, причем начало провода останется на прежнем месте, а удлиниться будет дальний конец. Если выбрана **Длина (конечная точка)**, то на месте останется конец провода, а если **Длина (средняя точка)**, то фиксируется середина, а двигаются одновременно (но в разные стороны) оба конца провода.

Все то же самое относится и к азимутальным и к зенитным углам этого меню.

Элемент – устанавливает оптимизацию на элемент. Номер элемента можно посмотреть в меню **Правка элемента**. Щелкнув левой кнопкой мыши на третьем столбце строки, описывающей элемент из очень обширного всплывшего второго меню, можно выбрать, какие именно параметры элемента будут оптимизированы. Содержание этого меню практически совпадает со столбцами таблицы меню **Правка элемента**:

- **Радиус** – радиус провода в элементе. Если элемент состоит из проводов разного радиуса, то радиус первого провода в элементе.

- **Интервал** – дистанция между соседними элементами (0 для активного элемента). То же самое, что и в меню **Правка провода**.

- **Позиция** – расстояние элемента, считая от первого. То же самое, что и в меню **Правка провода**.

- **Ширина** – габаритный размер элемента по оси Y .

- **Высота** – габаритный размер элемента по оси Z .

- **Периметр, или длина X** – двойное назначение. На электрически незамкнутых элементах – габаритный размер элемента по оси X . На замкнутых (квадраты, ромбы, дельты и т. п.) – суммарный периметр всех проводов элемента.

- **Нагрузка**. Указав во втором столбце ее номер и щелкнув левой кнопкой мыши на третьем столбце строки, описывающей нагрузку, из всплывшего второго меню можно выбрать тип нагрузки для оптимизации: L или R , C или jX . Из типичных ошибок в этом месте: если у вас имеется нагрузка в виде L , а в третьем столбце указано C или jX , то нагрузка не будет найдена процессом оптимизации.

- **Высота над землей** – в метрах. Естественно, эта команда неактивна, если установлено свободное пространство.

- **Частота** – в МГц. Удобная функция для поиска частоты, на которой антенна имеет наилучшие характеристики.

- **Источник**. Щелкнув левой кнопкой мыши на третьем столбце строки, описывающей источник, из всплывшего второго меню выберите напряжение (в вольтах) или фазу (в градусах), которые вы хотите оптимизировать. Полезно для оптимизации амплитуды и фазы источников в активных антенных системах с несколькими источниками.

Строк изменяемых параметров в таблице может быть столько, сколько параметров вы намереваетесь менять. Например, можно вписать несколько строк **Элемент**, в каждой из них установив из меню под левой кнопкой в третьем столбце свои параметры (**Интервал**, **Позиция**, **Ширина**, и т.д.), и/или вписать несколько строк **Провод**, в каждой из них установив изменение одного парамет-

ра (например, в первой – X_2 , во второй – Y_2 , в третьей – R и т. д.). Здесь следует быть внимательным, чтобы ошибочно не задать изменение несуществующих или взаимоисключающих параметров, иначе процесс оптимизации не начнется. Порядок строк в таблице имеет значение: сначала идет оптимизация по параметру, описанному в первой строке, потом во второй, и т.д. – потом процесс циклически и с переменными шагами несколько раз повторяется. Если оптимум единственный (что практически бывает редко), то при любом порядке строк в таблице получится одно и то же. А если же нет, в зависимости от порядка строк будут получаться несколько разные результаты оптимизации.

Команды третьего всплывающего меню

Под правой кнопкой мыши в таблице всплывает меню общего редактирования таблицы. Его команды (кроме очевидных – **Удалить эту строку**, **Вставить строку**, **Удалить все**):

- **Установка общего шага** – задает общий шаг изменения линейных размеров во всей таблице.
- **Совместные установки на элемент** – установка совместного изменения параметров одного элемента.
- **Авто совместное изменение параметров** – установка совместного изменения параметров одного провода.

Установки совместного изменения (кооперации)

Устанавливается цифрой в четвертом столбце таблицы **Изменяемые параметры**.

- 0, установленный по умолчанию, означает, что параметр, описываемый данной строкой, изменяется независимо от остальных.
- 1 – изменять параметр совместно с описанным в первой строке таблицы (вместо 1 может быть любое целое число – номер строки в таблице Изменяемые параметры).
- -1 (или 2, 3, 4...) – изменять параметр совместно с зеркальным (отрицательным) значением параметра, описанного в первой (2-й, 3-й, 4-й...) строке таблицы.
- $1*0.5$ – изменять параметр совместно с описанным в строке 1, но с коэффициентом 0,5. Могут быть и иные математические выражения (допустимые знаки $+ - /*$), например $2 + 1,5$ – изменять параметр совместно с описанным в строке 2, но со сдвигом 1,5.

Таким образом, потратив время на заполнение таблицы **Изменяемые параметры**, вы можете совершенно определенно указать компьютеру, что и в каких пределах ему позволено менять при оптимизации.

Другие команды меню «Оптимизация»

Флаг **Не цель простое сканирование** включает режим последовательного перебора параметров, установленных в таблице **Изменяемые параметры** с заданным в ней шагом, без достижения цели, описанной в окне **Параметры вы-**

числений или установленной движками. Полезно для просмотра влияния выбранного параметра на характеристики антенны. Кнопка **Все элементы** – под ней открывается окно **Выбор вариации элемента**, в котором наглядно можно установить совместные изменения желаемых размеров. В результате происходит запись необходимых строк в таблицу **Изменяемые параметры**.

Флаг **Разрешение 2 градуса** снижает точность расчета ДН до шага в 2 градуса (иначе 0,5 градуса), что ускоряет вычисления, но может привести к неточностям при расчете остронаправленных УКВ-антенн.

Флаг **Показывать журнал** позволяет наблюдать в реальном времени на экране шаги оптимизации.

Кнопка **Старт** запускает процесс оптимизации.

Если вы включили предыдущий флаг, то можете выбирать любую из вкладок **Вид**, **Вычисления**, **Диаграммы направленности** и наблюдать, как меняется антенна и ее параметры в процессе оптимизации. Если необходимо остановить процесс оптимизации до его завершения (например, он слишком затянулся, или вы видите, что оптимизация пошла явно «не туда»), то для этого достаточно нажать кнопку **Остановить** в закладке **Вычисления**. С некоторой задержкой (на завершение вычислений в текущей точке) оптимизация будет остановлена.

По окончании процесса оптимизации в появившемся окне вам будет предложено сохранить шаги оптимизации. Если вы ответите **Да**, то программа сохранит все шаги в отдельный файл с расширением **.tao*, который можно будет изучать в дальнейшем.

Обзор шагов оптимизации

После проведения оптимизации в закладке **Вычисления** становится активной кнопка **Обзор шагов оптимизации**, которая выводит окно просмотра последних 128 шагов оптимизации. В нем выводятся: установки цели (в заголовке, в виде процентной важности каждого параметра), таблица с основными параметрами антенны для каждого из последних 128 шагов оптимизации и ДН в обеих плоскостях для выделенной курсором строки таблицы. В строке **Порядок** можно выбрать, по возрастанию какого из параметров оптимизации расположатся строки в таблице.

КОМАНДЫ ГЛАВНОГО МЕНЮ «ФАЙЛ»

Во всех командах главного меню **Файл** быстрые клавиши обозначены большими подчеркнутыми буквами.

Файлы, в которых сохраняется описание антенны, имеют расширение **.taa* и к ним относятся очевидные команды **Новый**, **Открыть**, **Сохранить**, **Сохранить как**. Файлы **.taa* имеют текстовый формат и очень маленький размер. Описание даже очень большой антенны занимает максимум несколько килобайт.

Комментарии – отрывает окно создания и/или редактирования произвольного текстового комментария, который удобно использовать для текущих записей, относящихся к данной антенне. Эти комментарии сохраняются в файле описания антенны. Если описание антенны имеет комментарии, в закладке **Геометрия** появляется кнопка **Комментарии** (над табличкой описания нагрузок).

Файлы, в которых сохраняются ДН и все рассчитанные параметры антенны, имеют расширение **.tab*. К ним относятся команды **Открыть ДН**, **Сохранить ДН** (последняя активна только после проведения расчетов **Вычисления - Пуск**). В этих файлах также хранится полное описание антенны (та же информация, что и в **.maa* файлах). Объем файлов **.tab* достаточно велик (десятки килобайт), и сохранять их имеет смысл, только если расчет антенны занимает очень большое время, а повторный расчет нежелателен.

Файлы, в которых сохраняются таблицы оптимизации, имеют расширение **.tao*, к ним относятся команды **Открыть табл. оптимизации**, **Сохранить табл. оптимизации** (последняя активна только после проведения оптимизации).

Последняя группа команд этого меню относится к созданию файлов-таблиц (**.csv*, просмотр – в *Excel*) со всевозможными параметрами антенны.

Команды этой группы:

- **Таблица токов** – создает таблицу, в которой приведены параметры тока (амплитуда, фаза, реальная и мнимая часть) в каждом из сегментов расчета.

- **Параметры таблицы напряженности полей** – в открывшемся окне указываются мощность *TX* и координаты той части пространства, в которой вы хотите вычислить напряженности полей (например, вашего дома).

Координаты задаются по каждой оси в следующем формате: начальная координата интересующей вас части пространства, шаг изменения ее и число шагов. Скажем, запись вида «*X 10 2 25*», будет означать, что для оси *X* будут вычислены параметры для координат от 10 м до 60 м с шагом 2 м. Аналогично задаются интересующие вас координаты по остальным осям. В таблице будут приведены напряженности электрического и магнитного полей (реальная и мнимая части, амплитуда и фаза) в интересующем вас пространстве. Очень полезная функция для определения соответствия антенны нормам на предельный уровень напряженности поля.

- **Параметры таблицы углы/усиление** – в открывшемся окне указываются диапазоны азимутальных и вертикальных углов, в которых вы хотите вычислить усиление антенны. Полезно для «тонкого» анализа остронаправленных антенн, оценить ширину ДН которых на закладке **Диаграммы направленности** проблематично. Углы, для которых вычисляется эта таблица, задаются в следующем формате: интересующий вас начальный угол, шаг его изменения и количество шагов. Скажем запись вида «*Азимут -20 0.1 400*», будет означать, что будут вычислены параметры антенны для диапазона углов по азимуту от -20 до 20 градусов с шагом $0,1$ градуса (доли градуса вводятся не в минутах и секундах, а в десятичной форме). Выводится усиление как отдельно по вертикальной и горизонтальной составляющим поля, так и по их сумме.

- **Таблица *F/KCB/Gain/Z*** – в открывшемся окне указывается диапазон частот, в которых вы хотите вычислить указанные в названии параметры. Есть

возможность сделать это со включенным СУ (установкой флага). Если вы, находясь в закладке **Вычисления**, в меню **Графики** нажмете кнопку **Записать F в табл KCB/Gain/Z**, то установленный в этом меню частотный диапазон будет автоматически использован для создания рассматриваемой таблицы.

КОМАНДЫ ГЛАВНОГО МЕНЮ «ПРАВКА»

Очевидные команды – **Удалить**, **Добавить**.

Команды **Поиск и замена**, **Установки комбинированного провода**, **Подвинуть**, **Описание провода** – полностью совпадают с командами всплывающего меню закладки **Геометрия**.

Остальные команды:

- **Установить параллельно** с последующим выбором **оси X, Y, Z** – устанавливает антенну параллельно выбранной оси.
- **Вращать** с последующим выбором **вокруг оси X, Y, Z** на выбранную величину угла – поворачивает антенну вокруг выбранной оси на заданный угол.
- **Масштабирование** позволяет пересчитать антенну на другую частоту, указав новое значение частоты. Есть возможность менять масштаб только по выбранным осям. Именно этой командой надо пользоваться при переделке понравившейся по параметрам антенны на другой диапазон.
- **Округлить цифры до** с последующим выбором **2, 3, 4, 5 знаков после запятой** – удаляет ненужные цифры. Полезно после выполнения предыдущей команды **Масштабирование**, поскольку при пересчете получается много знаков после запятой.
- **Открыть временные условия** – черновик, открыв который можно делать любые эксперименты с антенной, не опасаясь потерять исходные данные.
- **Вернуться из временных условий** – возврат к исходному состоянию.
- **Вернуться к условиям до оптимизации** – если результаты оптимизации вас не порадовали, используйте эту команду для возврата к исходному состоянию.
- **Правка провода** – переход в меню **Правка провода**.
- **Правка элемента** – переход в меню **Правка элемента**.

КОМАНДЫ ГЛАВНОГО МЕНЮ «СЕРВИС»

- **Калькулятор** – вызов стандартного *Windows* калькулятора.
- **Оптимизация** – переход в окно «**Оптимизация**».
- **Обзор шагов оптимизации** – то же самое, что описано выше

Окно «Сравнить»

Сравнить – это меню позволяет объективно сравнивать разные антенны (ДН и основные параметры).

Если вы попадаете в него после расчета своей антенны (закладка **Вычисления** – кнопка **Пуск**), то увидите ДН и характеристики своей антенны. Кнопкой **Открыть *.tab** файл вы можете вызвать ДН и характеристики другой антенны (заранее сохраненные в *.tab файле, как описано ранее) и увидеть их наложенными друг на друга. В табличке под ДН будут приведены основные параметры сравниваемых антенн.

Меню «Сервис и установки»

Это очень полезное меню, позволяющее выполнять целый ряд смежных с антенными ВЧ расчетов. Может использоваться совершенно независимо от основной программы как ВЧ-калькулятор для расчета СУ, линий и реактивных элементов.

Закладка «Контур»

Расчет всех параметров LC контура, длины волны и наиболее употребляемых в антенной технике размеров, кратных длине волны.

Закладка «L»

Конструктивный расчет однослойной цилиндрической катушки. Выберите в окне **Вычислить** подлежащий расчету параметр и заполните поля исходных данных, кроме той величины, которую вы хотите вычислить.

Закладка «СУ на LC»

Пример расчета самого простого и употребительного Г-образного СУ на LC.

В двух правых полях введите комплексное $Z_{вх}$ антенны и частоту настройки (по умолчанию туда подставляются параметры из расчета последней антенны). В левом поле введите волновое сопротивление линии передачи (по умолчанию – то, которое вы используете для расчетов). В середине появится схема СУ, с указанием номиналов и реактивных сопротивлений элементов. В окне Вид можно выбрать желаемую конфигурацию схемы СУ: конденсатор в параллельной или в последовательной ветви. Это может иметь некоторое значение при использовании КПЕ с заземленным ротором.

Закладка «СУ на линиях 1»

Это меню состоит из двух независимых окон.

Верхнее **Согласование и трансформация одним отрезком линии** позволяет наглядно рассчитать трансформацию импедансов отрезком длинной линии. В правых полях устанавливается импеданс источника R_i , в левых – нагрузки Z_L (по умолчанию туда подставляются параметры из расчета последней антенны), в среднем окне (стилизованном под изображение отрезка кабеля) – параметры линии (длина электрическая, без учета коэффициента укорочения). При

ручной смене любого из введенных параметров остальные меняются автоматически. При наличии птички в окне

Фиксировать R_i при неизменном импедансе источника рассчитывается импеданс нагрузки. При отсутствии этой птички – при фиксированной нагрузке рассчитывается импеданс линии со стороны источника. Тут же рассчитывается KCB в данном отрезке линии. Это окно с успехом заменяет многоэтажные формулы и сложные диаграммы Вольперта-Смита при расчете входного сопротивления отрезка длинной линии, нагруженной на произвольный импеданс.

Нижнее **Согласование двумя последовательными отрезками линий** рассчитывает малоизвестное, но весьма интересное и удобное согласование двумя последовательно включенными отрезками линий с разным волновым сопротивлением.

Интерфейс очень близок к предыдущему окну, только окон с параметрами линий два. Введите справа R_i , слева – ZL (по умолчанию туда подставляются параметры из расчета последней вашей антенны), а в два средних окна – волновые сопротивления имеющихся в наличии линий (по умолчанию 50 и 75 Ом, вручную можно установить любые другие) и нажмите кнопку **Настроить**. Программа вычислит необходимую длину (электрическую, без учета коэффициента укорочения) каждой из линий. При этом в верхнем окне **Согласование и трансформация** одним отрезком линии автоматически подставятся данные о первом из рассчитанных отрезков с индикацией KCB в нем и импеданса на его выходе. Рекомендую использовать это окно – имея два отрезка кабелей 50 и 75 Ом, часто удастся согласовать антенну. Если у вас имеются отрезки кабелей с другими волновыми сопротивлениями, просто введите их в соответствующие окна.

Закладка «СУ на линиях 2»

Рассчитывается классическое согласование двумя шлейфами из двухпроводной линии.

В левом окне устанавливается импеданс ZL . По умолчанию туда подставляются параметры из расчета последней антенны. В среднем устанавливаются волновое сопротивление и коэффициент укорочения двухпроводной линии, из которой делаются шлейфы; а в левом – частота согласования и необходимое сопротивление Z_i , которое надо получить в результате согласования. По умолчанию – то, которое вы используете для расчетов в качестве стандартного. Нажмите кнопку **Настроить** – в графическом окошке слева появится рисунок, показывающий схему согласования, а в двух нижних окнах – два варианта (для некоторых соотношений ZL и Z_i такое согласование или невозможно, или возможен только один вариант) согласования с указанием длин шлейфов.

Закладка «L, C из линии»

В этом окне рассчитываются емкости и индуктивности, изготовленные из коаксиального кабеля или двухпроводной линии.

Сначала надо выбрать из списка тип используемого кабеля или задать вручную его параметры. Конечно, большинство кабелей в списке японские, но их параметры (см. правое поле, где показывается их волновое сопротивление и

коэффициент укорочения) весьма близки к большинству распространенных кабелей. Есть и известный в СНГ *RG58*. Верхние четыре строки списка, соответственно: ручная установка параметров вашего кабеля, воздушная линия 600 Ом, воздушная линия 450 Ом, двухпроводная линия в пластике 300 Ом.

Закладка «Установки»

- Окно **Направление тыла для F/B** – то же самое, что описано в разделе «Кнопка «Установка цели». Установки данного окна записываются в файл конкретной антенны.

- **Зенитный угол в св. пространстве** устанавливает вертикальный угол для ДН в свободном пространстве или нулевым, или соответствующим максимальному излучению (оно не всегда идет под нулевым углом).

- **Показывать токи, учитывая фазу** – при выборе этой опции на закладке **Вид** токи будут отображены с учетом их фазы.

- Окно **Стандартное Z** и кнопка **Установить Z** для *hairpin* согл. то же самое, что описано в разделе «Кнопка «Установка цели».

- **Последние файлы** – устанавливает количество отображаемых в меню **Файл** последних использованных файлов. При отсутствии флага в поле **только МАА файлы** будут показываться не только файлы **.maa*, но и **.tab*, и **.mao*.

- **Максимум сегментов.** Установка максимального числа сегментов. Необходимый объем ОЗУ: для 1024 точек – 8 М, для 2048 – 32 М, для 4096 – 128 М, для 8192 – 512 М.

КОМАНДЫ ГЛАВНОГО МЕНЮ «ПОМОЩЬ»

Имеется краткая информация о программе, номере версии, а также ссылка на сайт, с которого можно скачать программу и на котором выкладываются обновленные версии программы и дополнения библиотеки антенн. Полноценных файлов помощи в этом меню нет (только краткая информация), читайте эту книжку, в ней самое полное описание *ММАНА*.

ФАЙЛЫ ГОТОВЫХ АНТЕНН

В папке *.../ANT* имеется около двухсот файлов **.maa* интересных готовых антенн, внимательное изучение которых не менее информативно и полезно, чем хорошая книга по антеннам. Для удобства пользования они рассортированы по тематическим директориям. Некоторые файлы встречаются в двух директориях сразу, куда они подходят по тематике.

Например, файл двухдиапазонной *Inverted V* попадет как в директорию КВ простые, так и в директорию КВ многдиапазонные. Папка *...ANT/...* периодически пополняется новыми файлами – заглядывайте на сайт.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	
Измерение амплитудной диаграммы направленности антенны	3
Лабораторная работа № 2	
Исследование рамочных антенн	12
Лабораторная работа № 3	
Программа расчета проволочных антенн MMANA	19
Лабораторная работа № 4	
Исследование характеристик электрических вибраторов	27
Приложение	34

**Вяхирев Николай Иванович
Елисеева Ольга Александровна**

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

**Лабораторный практикум
по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-36 04 02 «Промышленная
электроника» специализации 1-36 04 02 02
«Техника и средства электронной связи»
дневной формы обучения
В двух частях
Часть 1**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 01.06.11.

Рег. № 14Е.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>