

# Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования

## Часть 1. Логопериодическая вибраторная антенна

Андрей Пластиков (Москва)

На примере логопериодической вибраторной антенны рассмотрен процесс создания модели в программной среде EDITFEKO с использованием встроенного языка программирования.

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня перед разработчиками аппаратуры СВЧ ставятся всё более сложные задачи. При этом разработка комплексной системы занимает много времени даже на стадии компьютерного моделирования. Процесс проектирования электродинамической модели системы в современных программных комплексах расчёта антенн и устройств СВЧ можно ускорить благодаря использованию возможностей программирования, предоставляемых самими программными пакетами, а также посредством взаимодействия соответствующих программ с пакетом Matlab и его упрощёнными функциональными аналогами.

В программных комплексах CST Microwave Studio и Ansoft HFSS пользовате-

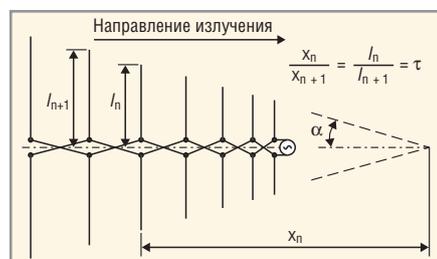


Рис. 1. Принцип построения логопериодической структуры антенны

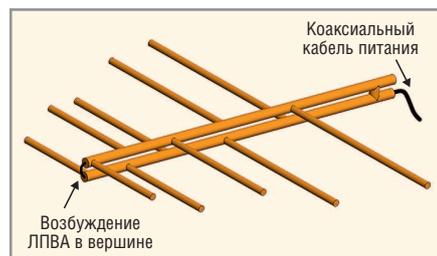


Рис. 2. Классическая конструкция антенны в метровом и дециметровом диапазонах частот для приёма волн одной линейной поляризации

лю предоставляется возможность написания собственных макросов на языке Visual Basic for Applications и сценариев на языке Visual C++. Соответствующие программные средства обеспечивают доступ ко всем этапам процесса проектирования СВЧ-устройств, включая построения геометрии модели, разбиения на ячейки и обработку результатов. Определённый набор программных средств доступен и в программном комплексе FEKO Suite: в средах EDITFEKO на стадии создания модели и POSTFEKO (начиная с версии FEKO Suite 6.1) на стадии постпроцессорной обработки результатов, а также, например, в программных пакетах AWR Microwave Office и Agilent Advanced Design System.

Пользоваться макросами и сценариями удобно при создании моделей сложных многоэлементных СВЧ-структур, геометрию которых можно задать определёнными формулами или алгоритмами, а число образующих структуру элементов может изменяться. Примерами подобных устройств являются полосковые фрактальные, фасетные и профилированные зеркальные и логопериодические вибраторные антенны; многослойные линзы Люнеберга; многоэлементные антенные решётки, в том числе с переменным шагом и/или переменной геометрией самих элементов; волноводные и микрополосковые многосвязные СВЧ-фильтры; периодические системы со случайным образом распределёнными элементами и др. Макросы могут быть крайне полезными и на стадии постпроцессорной обработки данных.

В предлагаемом цикле статей автор планирует рассмотреть несколько ха-

рактерных примеров автоматизации и ускорения процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в популярных программных комплексах электродинамического моделирования, в том числе с использованием внешних программ. Тема является достаточно актуальной ввиду малого числа публикаций на русском языке. В данной статье мы рассмотрим возможности автоматизации создания модели многоэлементной антенны на примере логопериодической вибраторной антенны (ЛПВА) в программе FEKO.

### ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ

Логопериодические вибраторные антенны представляют собой удачный вариант построения частотно-независимых антенн и находят достаточно широкое применение как в качестве одиночных антенн, так и в качестве облучателей зеркальных антенных систем. Антенна такого типа впервые была рассмотрена в 1960 г. в работе Избелла [1].

Одними из основных параметров, задающих геометрию полотен ЛПВА, являются величины  $\tau$  (характеризует отношение длин соседних вибраторов) и  $\sigma$  (задаёт электрическое расстояние между полуволновым и ближайшим к нему вибратором). При этом справедливы следующие соотношения:

$$l_{i+1} = l_i / \tau, \quad (1)$$

$$\text{ctg} \alpha = 4\sigma / (1 - \tau), \quad (2)$$

где  $l_i$  – длина плеча  $i$ -го вибратора (отсчитываемая от оси антенны), а  $\alpha$  – половина угла при вершине логопериодической структуры, на сторонах которого лежат концы плеч вибраторов (см. рис. 1).

Полоса частот ЛПВА принципиально не ограничена, а определяется лишь размерами самой структуры антенны. При этом если нижняя граница рабочего диапазона частот ограничивается габаритами антенны, то максимальная

рабочая частота ЛПВА на практике ограничена размерами линии питания. В метровом и дециметровом диапазонах частот такие антенны изготавливают обычно из металлических труб или стержней, а для более коротких волн используют микрополосковое исполнение. Классическая схема питания ЛПВА проста: для антенн метрового и дециметрового диапазонов питающий коаксиальный кабель проходит внутри одной из двух трубок питающих линий, и в вершине антенны его внешняя жила соединяется с этой же линией, а центральная жила припаивается к другой линии питания (см. рис. 2).

Определение начального приближения геометрии ЛПВА (числа вибраторов, диаметра линий питания, величин  $\tau$  и  $\sigma$  и длин плеч начальных вибраторов) можно проводить с учётом методики, предложенной Яцкевичем и Александровым [2].

### FEKO и возможности программирования

Создание модели устройства в программном комплексе FEKO Suite [3, 4] возможно производить в одной из двух доступных сред – в CADFEKO и EDITFEKO. Последняя взаимодействует с пользователем посредством так называемых карт (cards). Соответствующий интерфейс (см. рис. 3) напоминает текстовый редактор для создания файла проекта с расширением \*.pre, являющегося входным файлом подпрограммы PREFEKO.

Комплекс CADFEKO представляет собой современную программную среду построения трёхмерных электродинамических моделей с дружественным «оконным» интерфейсом наподобие программ HFSS и Microwave Studio, позволяющую, в том числе, в реальном времени визуализировать саму модель СВЧ-устройства.

В последних версиях FEKO Suite среда CADFEKO вобрала в себя все карты среды EDITFEKO и, обладая значительно более широкими возможностями создания моделей по сравнению с EDITFEKO, стала более удобной и функциональной для решения большинства задач. Однако, в отличие от HFSS и Microwave Studio, среда CADFEKO не имеет возможностей программирования, которые присутствуют в EDITFEKO.

Функциональных возможностей используемого в EDITFEKO/PREFEKO языка программирования достаточно для создания моделей тонких цилинд-

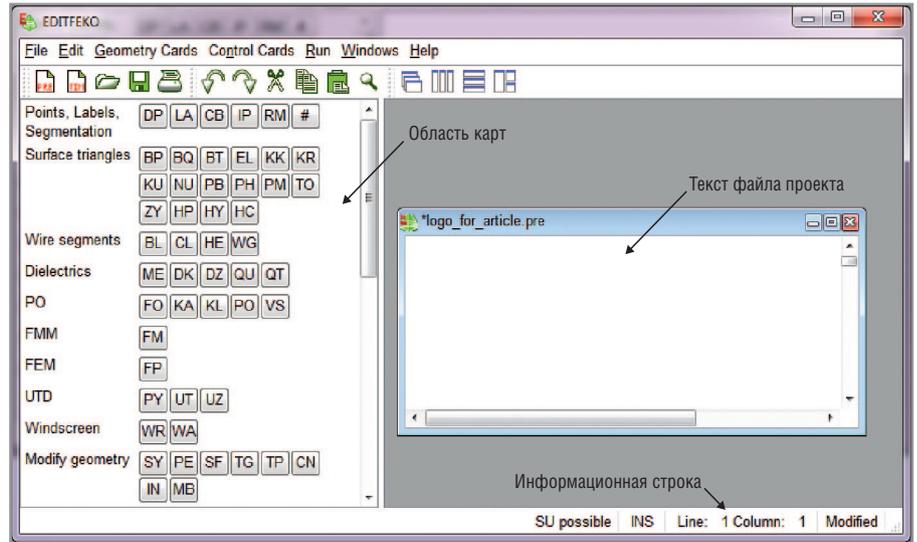
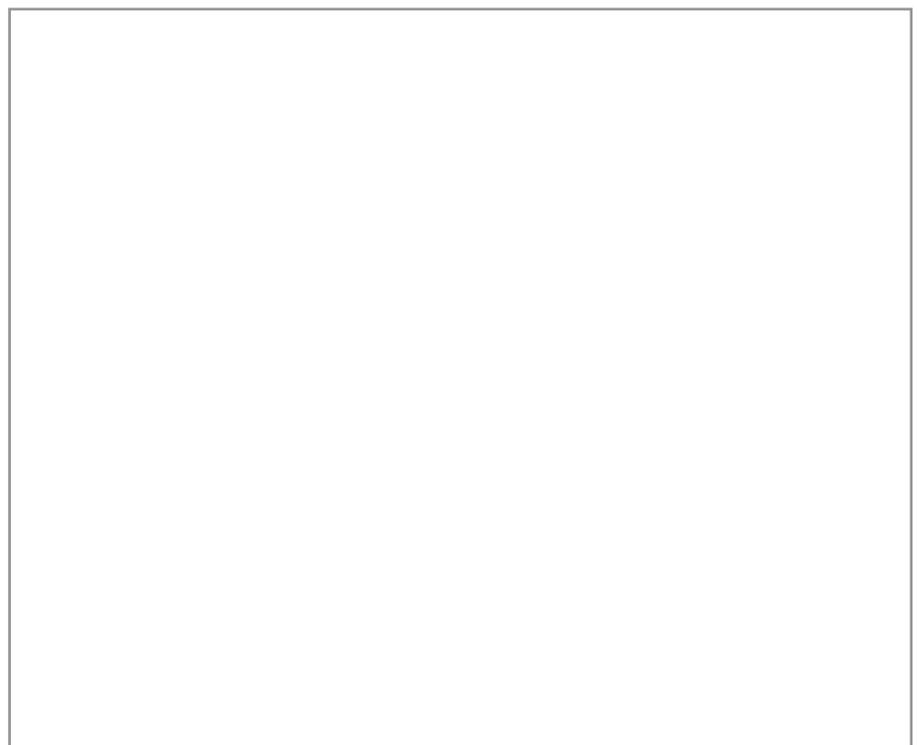


Рис. 3. Интерфейс программной среды EDITFEKO

рических вибраторных антенн типа ЛПВА с варьируемым количеством элементов и настройки их разбиения на ячейки (меширования), необходимого для дальнейшего численного решения. Синтаксис языка включает возможности задания переменных, использования циклов For/Next, конструкций If/Else/EndIf и логических операций, задания массивов координат точек и одномерных массивов данных, чтения данных из внешнего файла, использования встроенных математических функций типа тригонометрических, логарифмических, функций Бесселя и др.

Обобщённую структуру создаваемого в EDITFEKO файла проекта (префайла) можно описать следующим образом:

- комментарии \*\* в начале файла (при необходимости);
  - карты, задающие геометрию модели; комментарии (при необходимости);
  - EG – обозначение окончания ввода геометрии;
  - карты управления, которые определяют параметры возбуждения, указывают специальные параметры управления численными и квазиоптическими методами, задают требуемые для расчёта характеристики, а также частоты, на которых их следует рассчитать;
  - комментарии ; (при необходимости);
  - EN – обозначение окончания файла.
- Использование элементов программирования возможно как при постро-



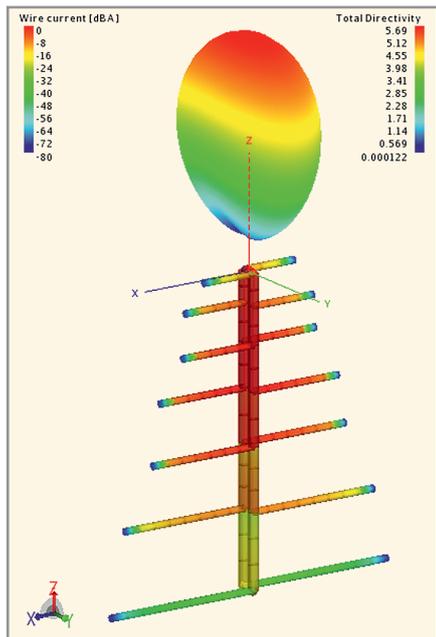


Рис. 4. Визуализированное распределение токов на поверхности ЛПВА и пространственная диаграмма направленности на частоте 1,2 ГГц

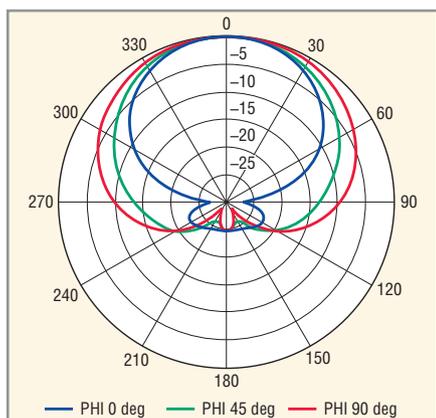


Рис. 5. Нормированная диаграмма направленности в логарифмическом масштабе на частоте 1,2 ГГц для трёх направлений угла φ

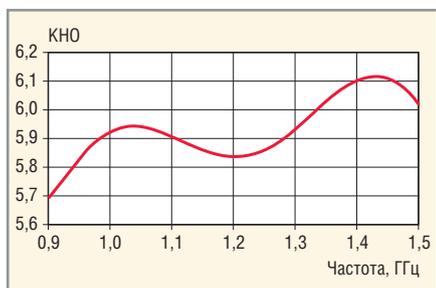


Рис. 6. Частотная зависимость КНД

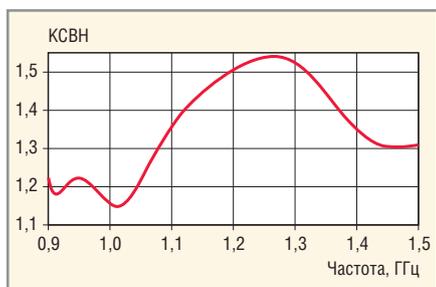


Рис. 7. Частотная зависимость КСВН

ении геометрии модели, так и для описания карт управления. К сожалению, в EDITFEKO отсутствует программный модуль оптимизации, вследствие чего самую оптимизацию необходимо проводить «вручную».

### ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЛПВА В СРЕДЕ EDITFEKO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИКЛОВ

Проследим основные стадии построения модели ЛПВА на примере антенны дециметрового диапазона волн с относительной полосой частот 50%. Элементы модели антенны будем строить из так называемых проволочных сегментов (wire segments), которые аппроксимируют решение задачи с тонкими проводящими цилиндрическими поверхностями методом моментов в предположении существования только продольных электрических токов.

Создадим новый префайл, для чего в меню EDITFEKO выберем *File* → *New* → → *\*.pre file*. В начале файла с помощью карты SF (Scale all dimensions) введём коэффициент масштабирования 0,001, что позволит нам указывать размеры элементов модели в миллиметрах. Зададим переменные, характеризующие диапазон рабочих частот, геометрию ЛПВА, а также параметры меширования её элементов:

```
#fmin=0.9e9 ** нижняя граница
частотного диапазона (в Гц)
#fmax=1.5e9 ** верхняя граница
частотного диапазона (в Гц)
#N=7 ** число вибраторов
#tau=0,84
#sigma=0,12
#L[1]=30 ** длина плеча первого
(наименьшего) вибратора;
#r=2 ** радиус вибраторов
#seglen=10 ** длина сегмента раз-
биения плеч вибраторов
#fl_r=3 ** радиус линии питания
#fl_seglen=15 ** длина сегмента
разбиения линии питания
#d=8 ** расстояние между центрами
линий питания
```

Определим угол  $\alpha$ , координату первого вибратора по оси антенны, расстояние между первым и вторым вибраторами, и укажем параметры меширования самих плеч:

```
#alpha=DEG(arctan((1-
#tau)/4/#sigma))
#z[1]=0
#z[2]=-#L[1]*4*#sigma/#tau
```

```
** задание параметров меширования
для строящейся далее геометрии
IP: : : : : #r: : #seglen
```

Теперь в цикле рассчитаем массивы длин плеч и координат  $z$  всех вибраторов, зададим точки начала и конца антенных элементов для одного полотна ЛПВА и осуществим построение плеч вибраторов с заданными свойствами меширования:

```
!!for #k = 2 to #N step 1
#L[#k]=#L[#k-1]/#tau
...
DP A#k 0 #d/2 #z[#k]
...
VL: A#k : B#k ** построение плеча
k-го вибратора
!!next
```

При необходимости здесь можно задать индивидуальные параметры разбиения для каждого из антенных элементов.

Далее строим линию питания. В рассматриваемом примере её длина равна расстоянию между крайними вибраторами, но линию питания нельзя построить как единый провод, поскольку в этом случае мы не сможем гарантировать сопряжения сегментов линии питания и вибраторов. Поэтому задаём её как совокупность нескольких (в нашем случае шести) отдельных проводов, соединяющих начальные точки соседних плеч вибраторов, с заданными параметрами меширования. С помощью карты TG (Geometry transformation) построим второе полотно ЛПВА. Введём в модель короткозамыкающий провод, соединяющий оба полотна в начальных точках оконечных вибраторов:

```
DP Aend 0 -#d/2 #z[#N]
VL: A#N : Aend
```

Создадим провод с меткой source, соединяющий концы линий питания со стороны меньших вибраторов, на который впоследствии мы установим дискретный порт возбуждения:

```
DP P1 0 -#d/2 0
DP P2 0 #d/2 0
LA: source ** задание метки
IP 0.1 #d
VL: P1: P2
```

На этом геометрические построения окончены, что указывается в тексте фай-

ла картой EG (End of the geometry input). В следующей области карт управления необходимо задать карты возбуждения дискретным источником напряжения с волновым сопротивлением 75 Ом на центральный сегмент провода source, указав частотные точки расчёта модели, вывода токов, расчёта диаграмм направленности и в заключение обозначить окончание файла картой EN.

На рисунках 4–7 представлены визуализированные в POSTFEKO результаты расчёта построенной модели ЛПВА – распределение токов в логарифмическом масштабе и диаграмма направленности на центральной частоте рассматриваемого частотного диапазона, частотные зависимости коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН).

Если, например, перед разработчиком ставится задача проектирования подобной антенны в качестве облучателя зеркальной, то возможно осуществить расчёт непосредственно всей антенной системы в EDITFEKO путём дополнения рассмотренной модели ЛПВА самим зеркалом.

#### Ограничения на параметры разбиения проволочного сегмента в FEKO

Параметр разбиения сегмента	Предупреждение (снижение точности расчёта)	Ошибка (невозможность расчёта)
Электрическая длина сегмента	$l/\lambda > 0,3$	$l/\lambda > 0,5$
Отношение радиуса сегмента к его длине	$r/l > 0,3$	$r/l > 1,0$

Отметим, что при создании модели СВЧ-структуры, составленной из проволочных сегментов, требуется соблюдать введённые в FEKO ограничения на электрическую длину сегмента разбиения и отношение радиуса сегмента к его длине, которые связаны с ограничениями численного метода расчёта (соответствующие «правила» сведены в таблицу). Это, в свою очередь, может ограничить допустимые электрические габариты модели ЛПВА и, как следствие, возможности анализа сверхширокополосных ЛПВА.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере ЛПВА дециметрового диапазона волн рассмотрен процесс создания модели в среде EDITFEKO с использованием встроенного языка программирования. Подобная автоматизация позволяет снизить затраты времени на проектирование антенны.

Особенностью предложенной методики проектирования ЛПВА является возможность построения антенны с требуемым числом элементов – вибраторов. Заметим, что в случае создания модели многоэлементной структуры в среде CADFEKO пользователь не имеет возможности непосредственно задавать варьируемое число её элементов, поэтому при изменении числа вибраторов ЛПВА необходимо вручную удалять или добавлять соответствующие элементы модели антенны.

В следующей статье мы продолжим рассмотрение ЛПВА и уделим внимание вопросам построения модели такой антенны в программе Microwave Studio посредством написания макроса на языке Visual Basic for Applications.

*Автор выражает благодарность компании EMSS-SA за предоставление ознакомительной версии программного пакета FEKO Suite.*

