

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

Часть 3. Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр на сосредоточенных элементах

Андрей Пластиков (Москва)

В статье описан процесс создания сценария, осуществляющего автоматизированное построение полосно-пропускающего СВЧ-фильтра на сосредоточенных элементах в среде Microwave Office. В сценарий, написанный на языке Visual Basic, введено диалоговое окно интерфейса пользователя.

ВВЕДЕНИЕ

В первых двух частях статьи была описана методика автоматизированного построения модели логопериодической антенны, составленной из произвольного числа вибраторов. В третьей части мы рассмотрим процесс написания программы-сценария, осу-

ществляющей построение и расчёт схемы ППФ на сосредоточенных элементах [1–3] для среды AWR Microwave Office [4, 5]. В основу данного сценария положены известные соотношения для расчёта чебышевских фильтров с использованием низкочастотного фильтра – прототипа.

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ СВЧ С ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ЧЕБЫШЕВА И ИХ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ПРОТОТИПЫ

Под электрическим фильтром принято понимать частотно-селективную линейную цепь, пропускающую колебания одних частот с минимальным ослаблением, а колебания других частот – с существенным ослаблением. Соответствующие полосы частот называют полосой пропускания (ПП) и полосой заграждения (ПЗ). В зависимости от положения ПП и ПЗ на оси частот различают фильтры нижних частот (ФНЧ), верхних частот (ФВЧ), режекторные (РФ) и полосно-пропускающие (ППФ). Схемы ФВЧ, РФ и ППФ могут быть получены в результате преобразования схемы соответствующего ФНЧ, называемого в таком случае их низкочастотным (НЧ) фильтром – прототипом.

Электрические фильтры также различают по типу (форме) характеристики ослабления в полосе пропускания. Наибольшее распространение получили фильтры с характеристиками Баттерворта (гладкая) и Чебышева (равноволновая) (см. рис. 1). Две возможные схемы построения N-полюсных НЧ-прототипов таких фильтров показаны на рисунке 2 и представляют собой каскадные соединения емкостных и индуктивных элементов. Порядок фильтра N равен числу реактивных элементов в схеме. Коэффициенты g_i характеризуют нормированные величины емкостей и индуктивностей для $i = 1, 2, \dots, N$ и нормированное сопротивление (если ближайший элемент – ёмкость) или проводимость (ближайший элемент – индуктивность)

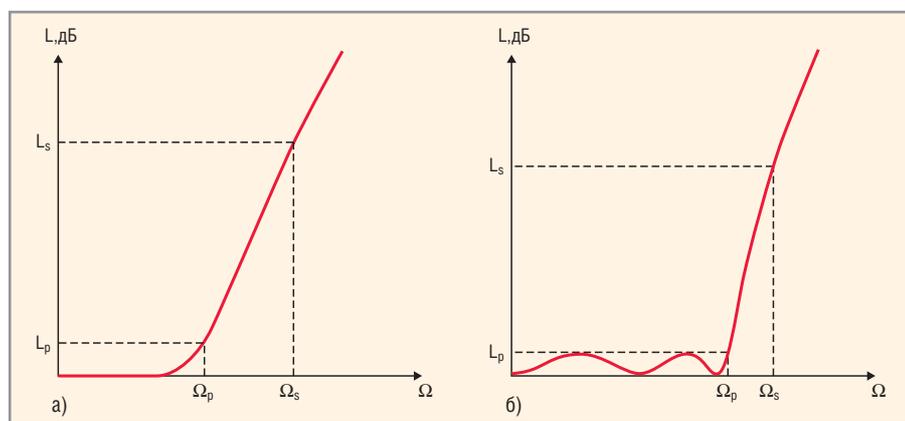


Рис. 1. Частотные характеристики коэффициента ослабления НЧ-прототипа фильтров Баттерворта (а) и Чебышева (б)

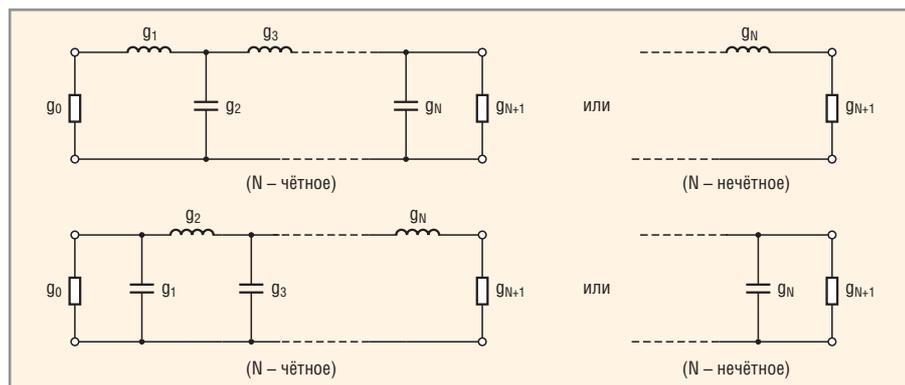


Рис. 2. Схемы НЧ-прототипов фильтров СВЧ

со стороны источника и нагрузки для $i = 0$ и $i = N + 1$ соответственно. Коэффициенты g_i фильтра-прототипа и его порядок зависят, в том числе, и от типа характеристики ослабления. Ниже мы ограничимся рассмотрением фильтров с чебышевской характеристикой. Порядок НЧ-прототипа фильтра Чебышева определяется выражением:

$$N \geq \frac{\operatorname{arccosh} \sqrt{\frac{10^{0,1L_s} - 1}{10^{0,1L_p} - 1}}}{\operatorname{arccosh} \Omega_s}, \quad (1)$$

где L_p – допустимое ослабление в ПП, L_s – ослабление на границе ПЗ, задаваемой частотой Ω_s . При этом, не теряя общности, полагаем нормированную частоту границы ПП НЧ-прототипа $\Omega_p = 1$. Коэффициенты g_i для фильтра с чебышевской характеристикой вычисляются следующим образом [3]:

$$g_0 = 1, \\ g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin \frac{\pi}{2N}, \\ g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \frac{4 \sin \frac{(2i-1)\pi}{2N} \sin \frac{(2i-3)\pi}{2N}}{\gamma^2 + \sin^2 \frac{(i-1)\pi}{N}} \\ \text{для } i = 2, 3, \dots, N, \quad (2) \\ g_{N+1} = \begin{cases} 1 & (N - \text{нечётное}) \\ \operatorname{ctgh}^2 \frac{\beta}{4} & (N - \text{чётное}) \end{cases}$$

где

$$\beta = \ln \left(\operatorname{ctgh} \frac{L_p}{17,37} \right), \\ \gamma = \sinh \frac{\beta}{2N}.$$

На практике бывает удобно пользоваться не величиной допустимого ослабления L_p в ПП, а уровнем модуля коэффициента отражения L_{RL} или КСВН. Эти величины связаны с L_p так, что

$$L_p = -10 \log \left(1 - 10^{0,1L_{RL}} \right), \text{ дБ}$$

и

$$L_p = -10 \log \left(1 - \left(\frac{\operatorname{КСВН} - 1}{\operatorname{КСВН} + 1} \right)^2 \right), \text{ дБ.}$$

Переход от НЧ-прототипа к схеме реального фильтра осуществляется с помощью преобразования частоты и

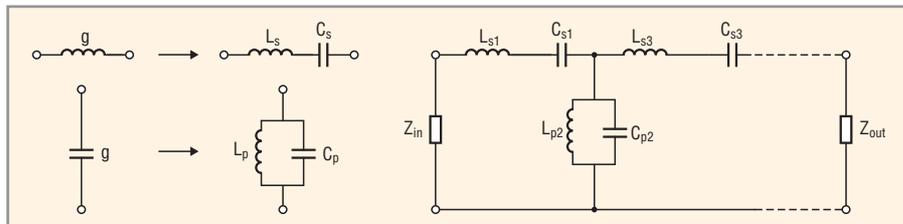


Рис. 3. Трансформация элементов схемы НЧ-прототипа в колебательные контуры ППФ (а) и схема ППФ (б), соответствующего фильтру-прототипу, показанному на рисунке 2а

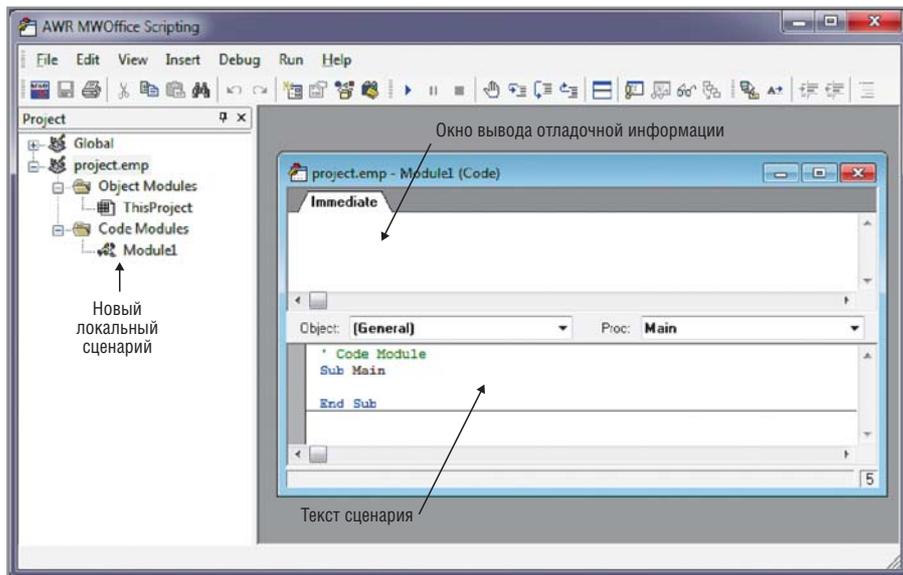


Рис. 4. Интерфейс редактора сценариев

трансформации элементов. Для ППФ справедливо преобразование оси частот вида:

$$\Omega = \frac{\Omega_p}{BW} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right), \quad (3)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}, \\ BW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0},$$

ω_0 и $\omega_{1,2}$ – средняя угловая частота и границы ПП ППФ, BW – относительная ширина полосы частот в ПП.

Реактивные элементы схемы фильтра-прототипа необходимо трансформировать в колебательные контуры (КК), составленные из пары индуктивностей и ёмкостей (см. рис. 3а). Возможная схема такого ППФ приведена на рисунке 3б. При этом для последовательных колебательных контуров номиналы элементов определяются соотношениями:

$$L_{S_i} = \frac{\Omega_p}{BW \omega_0} \gamma_0 g_i, \\ C_{S_i} = \frac{BW}{\Omega_p \omega_0} \frac{1}{\gamma_0 g_i}, \quad (4)$$

а для параллельных –

$$L_{P_i} = \frac{BW}{\omega_0 \Omega_p} \frac{\gamma_0}{g_i}, \\ C_{P_i} = \frac{\Omega_p}{BW \omega_0} \frac{g_i}{\gamma_0}, \quad (5)$$

где

$$\gamma_0 = Z_0 / g_0 \equiv Z_0,$$

Z_0 – сопротивление со стороны входа цепи (например, волновое сопротивление линии).

Положим приведённые соотношения в основу программы-сценария для автоматизированного построения ППФ произвольного порядка в программе Microwave Office.

О СЦЕНАРИЯХ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MICROWAVE OFFICE

В программе Microwave Office пользователю предоставляется возможность написания сценариев (scripts) на языке Visual Basic, посредством которых можно управлять многими объектами среды Microwave Office, доступными при непосредственном проектировании. В частности, можно запрограммировать процесс построения схемы какого-либо устройства,

исходя из пользовательского алгоритма.

Редактор сценариев встроен в среду Microwave Office и может быть вызван из меню Tools → Scripting Editor или нажатием клавиш Alt+F11. Типичный вид окна редактора изображён на рисунке 4. Отметим наличие окна вывода отладочной информации, которым удобно пользоваться при отладке программы-сценария. В процессе работы сценария можно занести в окно требуемую информацию с помощью команды Debug.Print. Имеется возможность создания диалогового окна интерфейса пользователя, которое может быть сконструировано в окне UserDialog Editor (пункт меню Insert → UserForm).

Сценарии можно сделать глобальными, т.е. доступными из любого проекта, или локальными. Созданные сценарии могут быть запущены как непосредственно из окна редактора, так и из вкладок Global Scripts или Local Scripts пункта меню Scripts окна Microwave Office. Тело основной процедуры сценария включается в конструкцию Sub Main ... End Sub. Допустимо использовать также пользовательские функции и процедуры как внутри данной конструкции, так и за её пределами.

Язык команд обращения к объектам среды Microwave Office чётко структурирован. Например, для удаления списка частот проекта необходимо выполнить команду Project.Frequencies.Clear. Первый элемент данной конструкции Project означает обращение к свойствам всего проекта, второй – конкретное «свойство» проекта (здесь Frequencies – параметры частот проекта), третий – действие над этим «свойством» (в нашем случае, Clear – очистка массива частот).

НАПИСАНИЕ СЦЕНАРИЯ для расчёта ППФ Чебышева на сосредоточенных ЭЛЕМЕНТАХ

Создадим сценарий, осуществляющий построение ППФ по схеме рис. 3б с чебышевской характеристикой на сосредоточенных LC-элементах с учётом приведённых выше выражений. Для примера зададимся следующими требованиями: центральная (среднеарифметическая) частота ПП $f_0 = 10$ ГГц, ширина ПП $\Delta f_0 = 1,2$ ГГц, граничная частота ПЗ $F_s = 12$ ГГц, ослабле-

ние в ПП $L_p = 0,05$ дБ, ослабление на границе ПЗ $L_s = 80$ дБ, $Z_0 = 50$ Ом, порядок фильтра $N = 5$. Написание текста основной программы осуществим в теле Sub Main ... End Sub.

Для начала очистим окно отладочной информации, введём исходные данные как константы и рассчитаем число л:

```
Debug.Clear
Const F0=10e9 ' Центральная частота ПП (Гц)
Const dF0=1.2e9
Const FS=12e9
Const Lp=0.05
Const Ls=80
Const Z0=50
Const N=5
Const Pi = Atn(1)*4
```

Отметим, что вследствие преобразования (3), центральной угловой частотой ω_0 , относительно которой осуществляется расчёт номиналов элементов схемы ППФ в (4), (5), будет являться среднегеометрическое граничных частот ПП. Определим некоторые необходимые для расчёта частотные параметры фильтра:

```
Dim Omega0, Omega1, Omega2, OmegaS, BW As Double
' Расчет граничных и среднегеометрической частот ПП
Omega1=(F0-dF0/2)*2*Pi
Omega2=(F0+dF0/2)*2*Pi
Omega0=Sqr(Omega1*Omega2)
' Относительная полоса частот ПП
BW=(Omega2-Omega1)/Omega0
' Нормированная частота ПЗ
OmegaS=1/BW*(2*Pi*FS/Omega0-Omega0/(2*Pi*FS))
```

Расчёт коэффициентов g НЧ-прототипа фильтра осуществим на основе выражений (2) следующим образом:

```
Dim g() As Double
ReDim g(N) As Double
beta=Log(Ctgh(Lp/17.37))
gamma=Sinh(beta/2/N)
g(1)=2/gamma*Sin(Pi/2/N)
Debug.Print g(1)
For i=2 To N
g(i)=...
Debug.Print g(i)
Next i
```

Здесь мы используем две пользовательские функции Ctgh и Sinh, кото-

рые определим после основного тела сценария:

```
' Гиперболический синус
Function Sinh(x As Double) As Double
Sinh = (Exp(x)-Exp(-x))/2
End Function
' Гиперболический котангенс
...
```

Зададим диапазон частот проекта, составляющий, для примера, 100%-полосу относительно частоты f_0 и включающий 1001 расчётную точку:

```
Dim freq(1000) As Double
For k=0 To 1000
freq(k)=F0*0.5+(k)*F0/1000
Next k
Project.Frequencies.Clear
Project.Frequencies.AddMultiple(freq)
```

Создадим в проекте новую схему (Schematic) с названием filter_circuit и поместим на неё первый порт:

```
' Включение в проект нового элемента "Schematic"
Dim Filter As Schematic
Dim filter_name As String
Set
Filter=Project.Schematics.Add("filter_circuit")
filter_name = Filter.Name
Dim elem As Element
' Установка порта со стороны входа
Set elem =
Filter.Elements.Add("PORT", 0, 0, 0)
elem.Parameters("Z").ValueAsDouble = Z0
```

Команда вида Filter.Elements.Add(Element, X, Y, Angle) добавляет в нашу схему Filter элемент из набора доступных в среде Microwave Office (здесь Element="PORT") так, что его первая клемма располагается в точке с координатами (X, Y), а сам элемент повернут на угол Angle. Присвоив при этом команду добавления порта переменной elem, объявленной как элемент среды Microwave Office, мы можем задать значения его параметров, в нашем случае – внутреннего сопротивления Z.

Дальнейшие построения и расчёт номиналов элементов осуществим в цикле For ... Next. Колебательный контур можно реализовать в виде набора отдельных L- и C-элементов, но проще использовать последовательный SLC-

и параллельный PLC-контур, имеющиеся в базе элементов Microwave Office. При этом в окне схемы необходимо расположить все эти элементы друг за другом, а также заземлить параллельные КК (см. рис. 5). Для удобства введём дополнительную переменную dx , задающую координату X положения первого узла следующего элемента. Итоговый текст цикла построения приведен ниже:

```
dx=0
For i=1 To N
If (i Mod 2) Then 'i - нечетное
' последовательный контур
Set elem =
Filter.Elements.Add("SLC",dx,0,0)
elem.Parameters("L").ValueAsDouble = ...
elem.Parameters("C").ValueAsDouble = ...
' смещение координаты положения
следующего элемента
dx=dx+(elem.Nodes.Item(2).x-
elem.Nodes.Item(1).x)
Else 'i - четное
' параллельный контур, повернутый
на 90 градусов
Set elem =
Filter.Elements.Add("PLC",dx,0,-
90)
...
' Добавление заземления
Filter.Elements.Add("GND",elem.No
des.Item(2).x,elem.Nodes.Item(2).
y,0)
End If
Next i
```

Расчёт номиналов реактивных элементов выполняется в соответствии с выражениями (4), (5). Однако если в настройках проекта заданы масштабные коэффициенты для емкостных и индуктивных элементов, то их необходимо учесть. В тексте сценария величину масштабного коэффициента, например, для ёмкости можно получить посредством команды `Project.Units(mwUT_Capacitance).MultValue`.

Завершим построение схемы фильтра добавлением второго порта, зададим вывод графиков S-параметров в прямоугольной системе координат и на диаграмме Вольперта-Смита, и запустим проект на расчёт:

```
Set elem =
Filter.Elements.Add("PORT",dx,0,1
80)
```

```
If (N Mod 2) Then ' N -
нечетное
elem.Parameters("Z").ValueAsDou-
ble = Z0
Else
elem.Parameters("Z").ValueAsDou-
ble = Z0*(Ctgh(beta/4))^2
End If
' Добавление графиков
Dim graphic,graphic2 As Graph
Dim graphic_name,graphic_name2 As
String
' Вывод графиков в прямоугольной
```

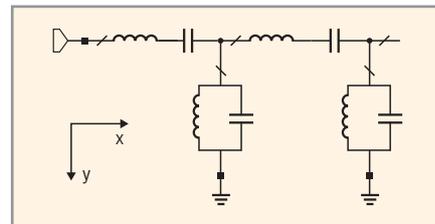


Рис. 5. Расположение элементов при построении схемы ППФ

```
CK
graphic_name = filter_name & "
Rectangular"
```

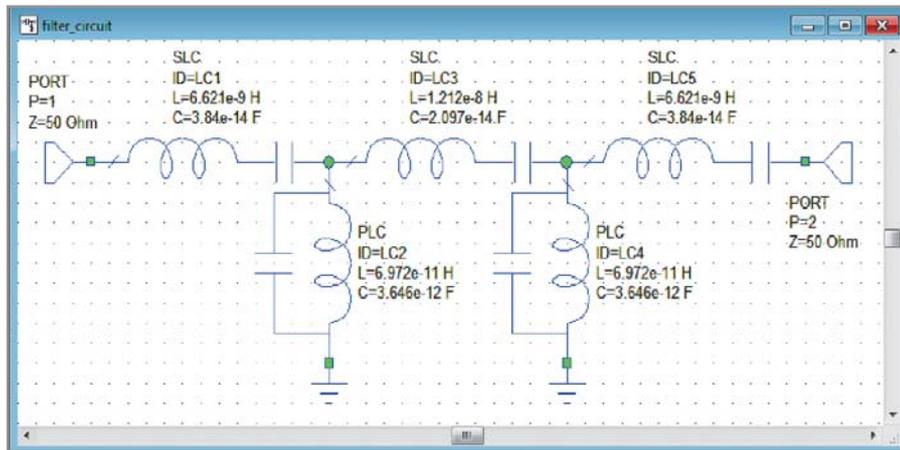


Рис. 6. Схема ППФ, построенная при помощи сценария

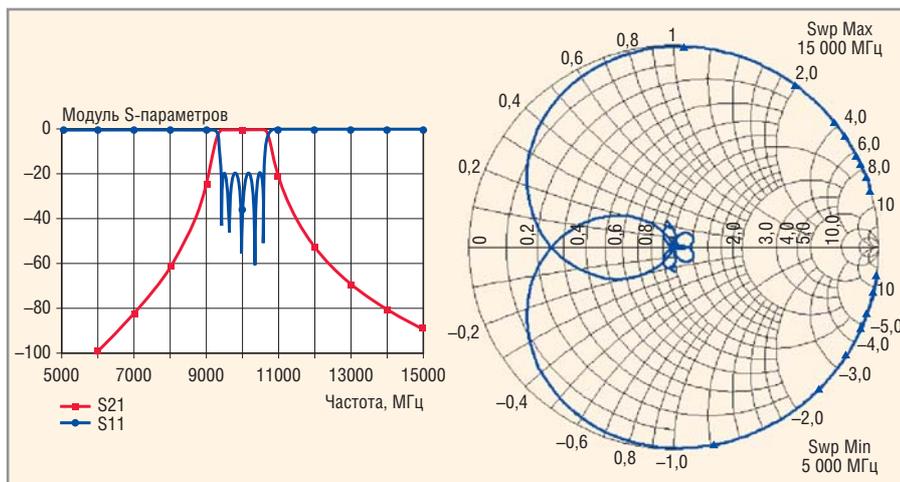


Рис. 7. Рассчитанные S-параметры схемы ППФ

```
Set graphic =
Project.Graphs.Add(graphic_name, mwGT_Rectangular)
graphic.Measurements.Add(filter_name, "DB(|S(1,1)|)")
graphic.Measurements.Add(filter_name, "DB(|S(2,1)|)")
'Вывод диаграммы Смита
graphic_name2 = filter_name & "
SmithChart"
Set graphic2 =
Project.Graphs.Add(graphic_name2, mwGT_SmithChart)
graphic2.Measurements.Add(filter_name, "S(1,1)")
```

Запустим созданный сценарий непосредственно в редакторе сценариев или из пункта меню Scripts → Local Scripts окна Microwave Office. В результате работы сценария в проекте появится новая схема с названием filter_circuit (см. рис. 6), будет произведён её расчёт, и на экран будут выведены S-параметры в логарифмическом масштабе в прямоугольной системе координат (см. рис. 7а) и на диаграмме Смита (см. рис. 7б).

В теле сценария можно также выполнить расчёт необходимого порядка фильтра согласно формуле (1) на основе заданных требований к характеристикам. Осуществим расчёт, используя пользовательскую функцию гиперболического арккосинуса, и выведем сообщение с информацией о рассчитанном порядке фильтра order (с округлением до двух знаков после запятой) и заданном порядке N:

```
MsgBox "Рассчитанный порядок
фильтра "& Round(order,2) & ";
заданный - N=" & N
```

В результате выполнения данных команд для используемых исходных данных на экран будет выведено окно сообщения с текстом: «Рассчитанный порядок фильтра 4,85; заданный – N=5».

СОЗДАНИЕ ДИАЛОГОВОГО ОКНА ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Повысить удобство использования написанного сценария можно за счёт введения в него пользовательского интерфейса в виде диалогового окна, ко-

торое создаётся с помощью конструктора UserDialog Editor. Реализованный интерфейс диалогового окна рассматриваемого сценария построения ППФ показан на рисунке 8. Введение подобной оконной среды взаимодействия с пользователем даёт возможность применять написанный сценарий пользователям, не знакомым с языком программирования сценариев и даже не имеющим достаточных навыков работы в среде Microwave Office, т.к. сценарий самостоятельно осуществляет создание схемы фильтра, её расчёт и вывод результатов. Вследствие этого подобный сценарий может быть использован, например, на учебных занятиях со студентами второго-третьего курсов, не имеющими опыта работы с данной программой, при изучении дисциплин теории цепей и техники фильтров СВЧ.

Кратко охарактеризуем код сценария при введении диалогового окна. Чтобы иметь возможность переопределения исходных данных в соответствии с введёнными в окне значениями, соответствующие величины необходимо определить как переменные и сделать их глобально доступными в теле всего сценария, объявив их в первых строках кода до тела основной процедуры.

Для вызова диалога создадим отдельную процедуру User_Dialog, которую будем вызывать уже из основного тела Main:

```
Sub User_Dialog
Begin Dialog UserDialog
500,273,"Синтез полосно-пропускающего фильтра",.MyDialogFunction '
%GRID:10,7,1,1
TextBox 180,49,60,21,.F0
Text 20,42,150,28,"Центральная частота, ГГц",.Text1
...
End Dialog
Dim dlg As UserDialog
' Вызов диалогового окна
Dialog dlg
' Запись введенных в диалоге данных
F0=Val(dlg.F0)*1e9
...
End Sub
```

Большая часть этого кода, находящаяся в теле конструкции Begin Dialog ... Dialog dlg, генерируется автоматически после создания в конструкторе окна

диалога. Обращение к основному телу сценария Sub Main ... End Sub по умолчанию происходит при нажатии на кнопку OK.

С процедурой вызова диалога непосредственно свяжем функцию MyDialogFunction, в которой осуществляется обработка определённого набора событий диалогового окна – инициализации, нажатии на кнопку и др. В нашем случае она будет иметь следующий вид:

```
Function MyDialogFunction% (DlgItem$, Action%, SuppValue%)
Select Case Action%
Case 1 ' Dialog box initialization
' Вывод неких начальных данных при инициализации диалогового окна, расчет порядка фильтра по формуле и вывод в TextBox
DlgText "F0", Format(F0/1e9)
...
Case 2 ' Value changing or button pressed
' Выход по нажатии на кнопку "Cancel"
If DlgItem$ = "Cancel" Then
End
End If
Case 3 ' TextBox or ComboBox text changed
' Расчет порядка фильтра по формуле и вывод в TextBox
...
Case 4 ' Focus changed
Case 5 ' Idle
Case 6 ' Function key
End Select
End Function
```

В результате при запуске сценария на экране появится диалоговое окно (см. рис. 8б), в котором пользователь сможет задать требуемые характеристики ППФ и увидеть предварительно рассчитанный с помощью выражения (1) порядок фильтра, который будет обновляться при каждой смене значений параметров и отображаться в неактивном окне TextBox.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в статье сценарий может быть полезен для инженерной оценки порядка фильтра и его частотных характеристик. В зависимости от технологического исполнения реального фильтра, модель можно уточнить, заменив дискретные элементы отрезками линий передачи или другими

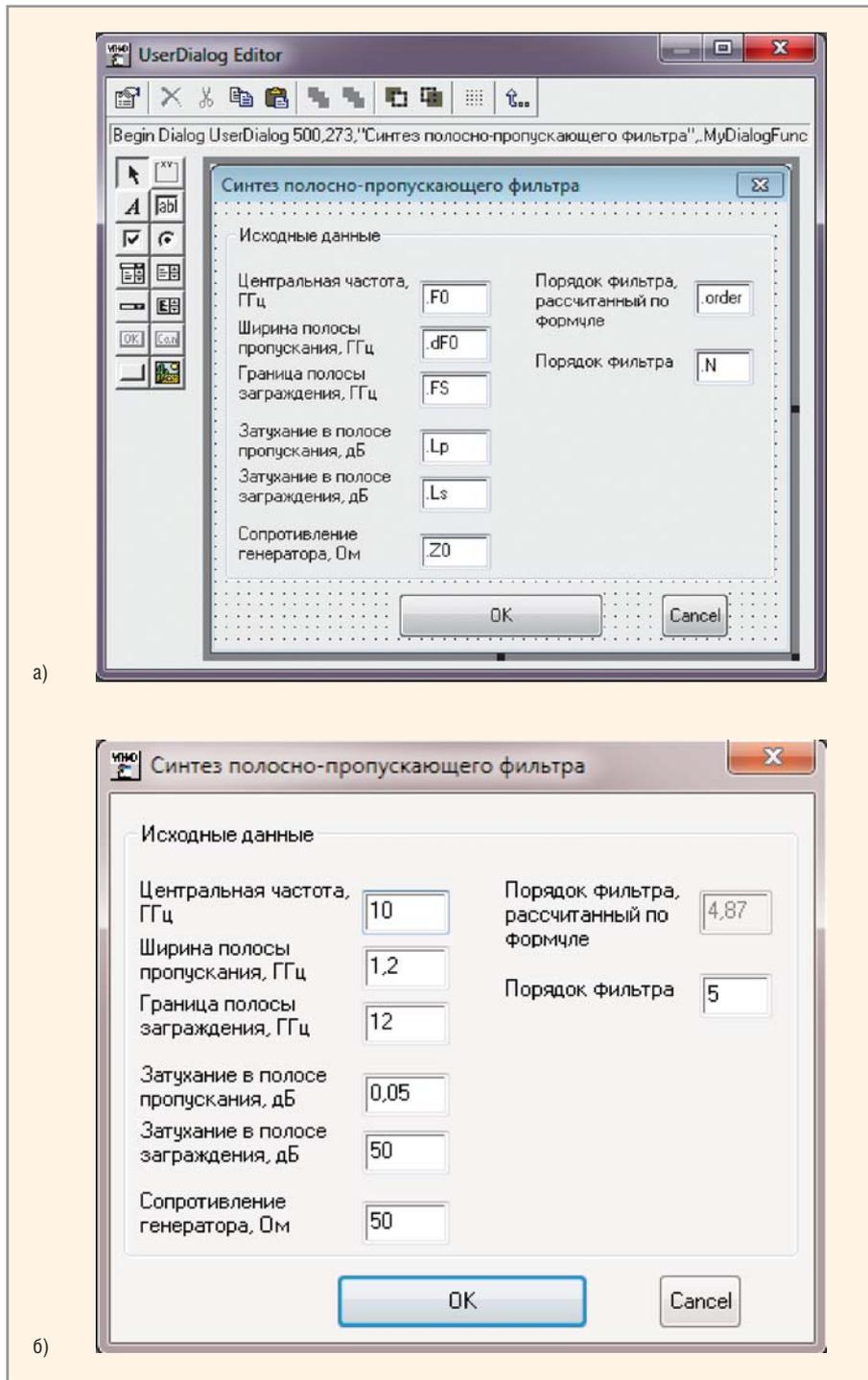


Рис. 8. Диалоговое окно сценария в конструкторе (а) и в процессе работы сценария (б)

элементами, входящими в базу элементов среды Microwave Office. Таким образом, можно автоматизировать процесс синтеза модели СВЧ-фильтра в соответствии с желаемым алгоритмом, запрограммировав его с помощью сценария на языке Visual Basic.

В следующей части статьи мы рассмотрим конкретную реализацию ППФ, построенного на основе прямоугольного волновода с индуктивными диафрагмами, и опишем процесс создания трёхмерной модели такого фильтра посредством сценария в программе Ansoft HFSS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамтей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. Связь, 1971.
2. Линии передачи сантиметровых волн. Пер. с англ., под ред. Г.А. Ремеца. Советское радио, 1951.
3. Hong J.-S., Lancaster M.J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. John Wiley & Sons, 2001.
4. Разевиг В.Д., Потанов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. СОЛОН-Пресс, 2003.
5. <http://web.awrcorp.com>.