

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

Часть 4. Волноводный фильтр на индуктивных диафрагмах

Андрей Пластиков (Москва)

Рассмотрена методика проектирования волноводного полосно-пропускающего фильтра с индуктивными диафрагмами в программных пакетах AWR Microwave Office и Ansoft HFSS. Описан процесс создания сценария на языке VBScript, осуществляющего автоматизированное построение модели фильтра произвольного порядка в программе HFSS на основе параметров геометрии, введенных пользователем. В качестве примера спроектирован фильтр сантиметрового диапазона волн.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей части статьи [1] был рассмотрен сценарий, осуществляющий расчёт и построение схемы полосно-пропускающего фильтра (ППФ) на сосредоточенных элементах в среде Microwave Office. В данной статье мы рассмотрим возможный подход к проектированию полосно-пропускающего фильтра (ППФ) в волноводном исполнении в программе HFSS. В частности, мы опишем процесс создания программы – сценария на языке Visual Basic Scripting Edition, осуществляющего построение модели фильтра. Для удобства использования сценария в него добавлены диалоговые окна.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ волноводного ППФ на индуктивных диафрагмах

Если начинать процесс проектирования СВЧ-фильтра в программе трёхмерного электродинамического моделирования «с нуля», без предварительной оценки характеристик и па-

раметров геометрии с помощью некой упрощённой модели (инженерной оценки), то процесс синтеза фильтра может потребовать больших затрат времени даже на современных персональных компьютерах (ПК).

Основываясь на рассчитанных номиналах LC-элементов рассмотренного [1] фильтра-прототипа на сосредоточенных элементах, можно перейти к конструкции фильтра, например, в микрополосковом исполнении, применив т.н. преобразование Ричарда для определения схемы фильтра на основе отрезков линии передачи с последующим её пересчётом в полосковую конструкцию. В работе [2] приведён пример реализации подобной цепочки проектирования микрополосковых фильтров, при этом расчёты выполнены в пакете MATLAB, а окончательная модель устройства проверена методом конечных разностей во временной области. Однако такую методику нельзя применить для расчёта волноводного ППФ на индуктивных диафрагмах.

Зададим порядок фильтра $N = 5$, по аналогии с [1]. Геометрия соответствующего ППФ на индуктивных диафрагмах изображена на рисунке 1. При проектировании ППФ на индуктивных диафрагмах можно использовать эквивалентные схемы фильтров-прототипов, приведённые на рисунке 2. В этом случае можно выделить следующие четыре возможных последовательных этапа синтеза:

- 1) расчёт ППФ – прототипа на сосредоточенных элементах [1];
- 2) расчёт ППФ – прототипа с инверторами импеданса (см. рис. 2а);
- 3) расчёт «полудискретной» модели фильтра с отрезками линии передачи и параллельно включенными индуктивностями (см. рис. 2б);
- 4) определение трёхмерной геометрии ППФ на индуктивных диафрагмах, моделирование полученной структуры одним из методов численной электродинамики.

Начиная со второго этапа, структуры фильтра основываются на данных, полученных на предыдущем этапе.

В работе [3] предварительные стадии синтеза были реализованы в пакете MATLAB. Представляется возможным реализовать соответствующие вычисления и рассчитать полученные предварительные модели непосредственно в среде Microwave Office, как это было сделано для первой стадии проектирования [1], тем более что в базе элемен-

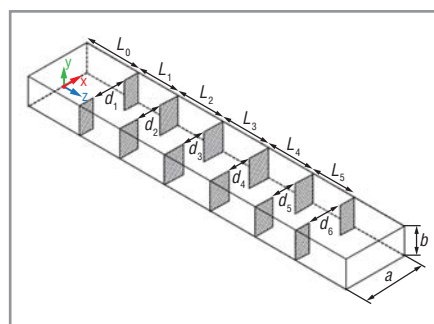


Рис. 1. Проектируемый волноводный ППФ

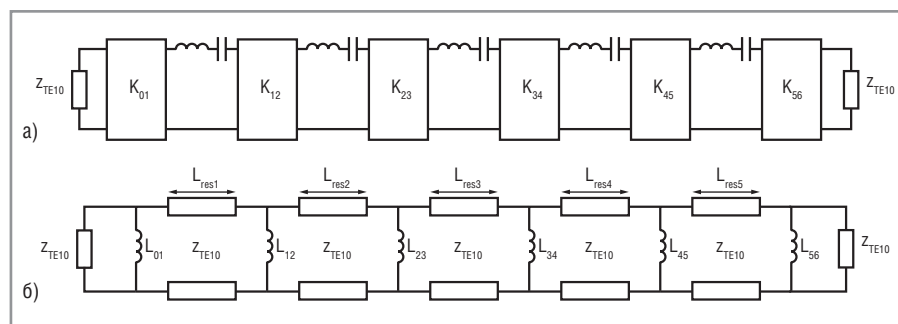


Рис. 2. Эквивалентные схемы волноводного ППФ с индуктивными диафрагмами

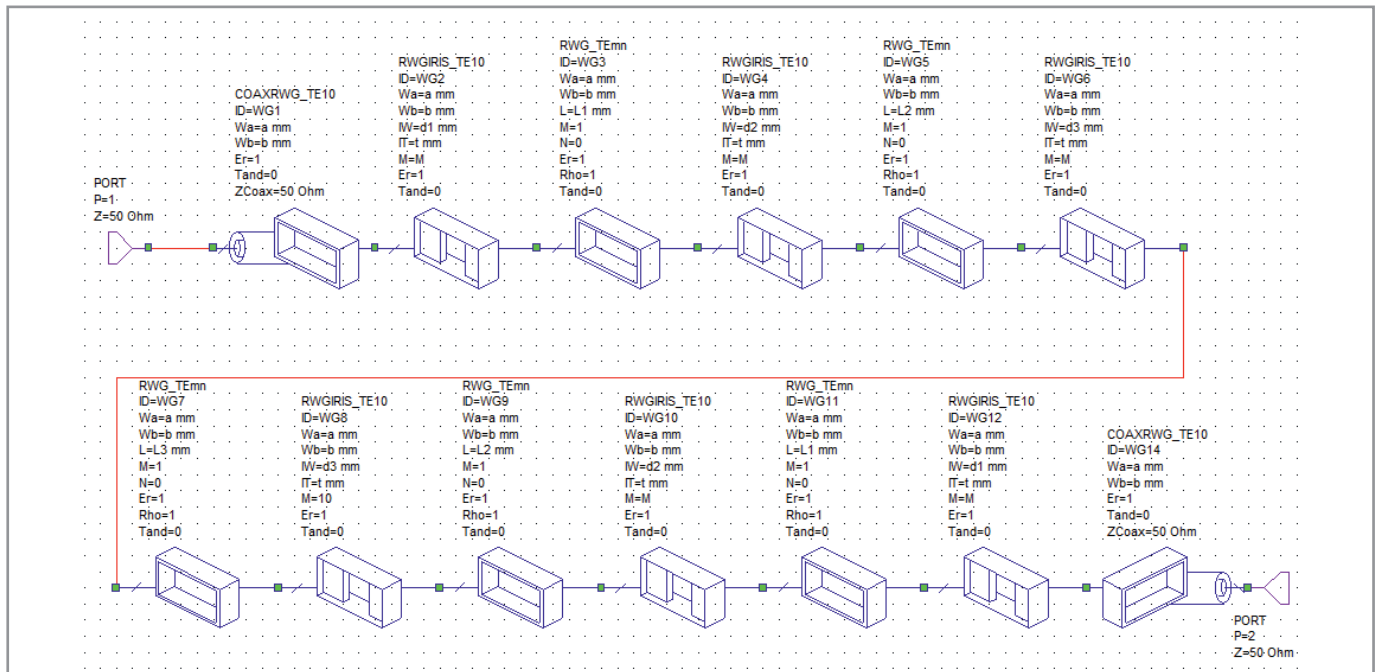


Рис. 3. Схема волноводного ППФ с индуктивными диафрагмами в среде Microwave Office

тов этой программы есть и модели идеальных инверторов импеданса. Но в рамках данной статьи мы не будем рассматривать промежуточные этапы синтеза и для получения предварительной модели ППФ на индуктивных диафрагмах сразу воспользуемся набором волноводных элементов в среде Microwave Office. В качестве примера рассмотрим фильтр сантиметрового диапазона волн.

РАСЧЁТ ФИЛЬТРА В ПРОГРАММЕ MICROWAVE OFFICE

Предварительные расчёты и оптимизацию геометрии проектируемого ППФ на индуктивных диафрагмах мы проведём в программе Microwave Office. Основные требования к частотным характеристикам фильтра были выбраны аналогичными рассмотренной [1] модели фильтра на сосредоточенных элементах, за исключением уровня загораживания в полосе затухания (ПЗ): центральная частота полосы пропускания (ПП) 10 ГГц; ширина ПП 1,2 ГГц; порядок фильтра 5; ослабление в ПП $L_p = 0,05$ дБ, что соответствует уровню коэффициента отражения около -19,5 дБ; граничная частота ПЗ 12 ГГц; уровень загораживания в полосе затухания -30 дБ. Зададимся прямоугольным волноводом сечением 23×10 мм и толщиной диафрагм 1,5 мм.

На рисунке 3 изображена схема волноводного ППФ, составленная из базовых элементов среды Microwave Office. Отметим, что с обоих концов схемы мы разместили «идеальные» ко-

аксиально-волноводные переходы (элементы COAXRWG_TE10). Это позволило избавиться от портов с частотно-зависимой величиной входного сопротивления (волновое сопротивление прямоугольного волновода является функцией частоты) и использовать для возбуждения порты с постоянным сопротивлением 50 Ом. Число высших типов волн, учитываемых при расчётах диафрагм (элементы RWGIRIS_TE10), задано равным 10. В процессе оптимизации мы ограничились рассмотрением структуры фильтра, симметричной относительно центрального резонатора.

Частотные характеристики итоговой модели фильтра, рассчитанные в диапазоне частот от 7 до 13 ГГц, изображены на рисунке 4, где для сравнения приведены также соответствующие зависимости прототипа такого ППФ, построенного на дискретных LC-элементах [1]. Обращает на себя вни-

мание расхождение зависимостей модуля коэффициента передачи в области ПЗ со стороны высоких частот. Данная особенность ППФ в волноводном исполнении связана с наличием частотной дисперсии, которая не учитывается в прототипе фильтра из дискретных элементов [3].

Далее мы используем полученные параметры геометрии для построения структуры такого ППФ в программе HFSS. При этом для построения самой модели напомним программу-сценарий на языке VBScript, которая позволит автоматизировать процесс создания модели в данной САПР.

ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО СО СЦЕНАРИЯМИ В HFSS

Программа HFSS позволяет пользователю составлять программы-сценарии на языках Visual Basic Scripting Edition или JavaScript. Мы ограничимся рассмотрением первого из них.

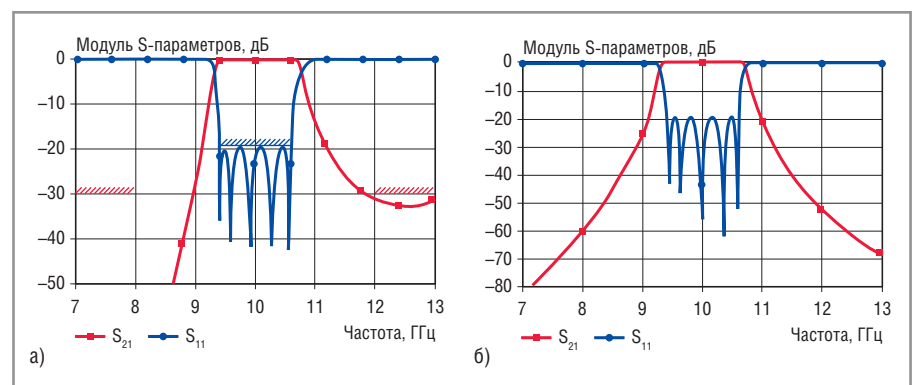


Рис. 4. Частотные характеристики ППФ в Microwave Office

а) для схемы волноводного фильтра; б) для фильтра-прототипа на сосредоточенных элементах [1]

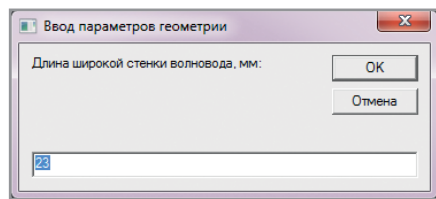


Рис. 5. Диалоговое окно для ввода параметра геометрии

Visual Basic Scripting Edition (VBScript) – это т.н. язык сценариев программирования, разработанный для записи последовательностей операций, которые пользователь может выполнить на компьютере. Данный язык был создан компанией Microsoft и достаточно широко используется при создании сценариев в операционных системах семейства Windows. В сценариях, написанных на VBScript, взаимодействие с пользователем может осуществляться с помощью функций MsgBox и InputBox, которые представляют собой простейшие диалоговые окна для вывода сообщений и ввода пользователем текста или числа.

Программный пакет HFSS способен самостоятельно генерировать файл сценария на языке VBScript из операций пользователя, выполненных в CAD-интерфейсе самой программы. Используя эту возможность, создадим в качестве примера простой сценарий.

Запустим программу HFSS и удалим в окне менеджера проектов пустой проект Project 1 (название по умолчанию). Запустим процесс записи действий пользователя в файл сценария *.vbs, выбрав в меню команду *Tools → Record Script To File* и указав в появившемся окне диалога название и местоположение создаваемого файла. Теперь последовательно выполним следующие операции:

- 1) создадим новый «глобальный» проект Project 1 (*File → New*);

- 2) введём в него проект для расчёта методом конечных элементов (*Project → Insert HFSS Design*);
- 3) зададим частоту (10 ГГц) и параметры адаптивного разбиения на ячейки (*Add Solution Setup*);
- 4) установим параметры частотной развёртки (*Add Frequency Sweep*) в диапазоне частот от 7 до 13 ГГц.

На этом завершим процесс записи сценария, выполнив команду *Stop Script Recording* в ветке меню *Tools*.

Содержание созданного файла сценария отображено в листинге 1 (этот и другие листинги см. на сайте журнала). Строки с комментариями начинаются с символа апострофа, при этом приведённые в листинге русскоязычные комментарии введены в этот код дополнительно. В начале сценария с помощью директивы *Dim* объявлены переменные, которым затем посредством директивы *Set* присвоены объекты программного кода среды HFSS. Характерным для языка VBScript является отсутствие необходимости принудительного задания типа переменной при её объявлении, т.к. всем переменным по умолчанию присваивается тип Variant.

Установка частоты и параметров адаптивного разбиения производится командой вида *oModule.InsertSetup «HfssDriven»*, вслед за которой проводится задание массива *Array(...)* значений параметров – атрибутов данной операции: названия, частоты разбиения, критериев сходимости и пр. В нашем случае этот массив содержит 22 атрибута за исключением названия. При задании параметров объектов в конструкции *Array(...)* допустимо не указывать некоторые из них, тогда соответствующим атрибутам будут присвоены значения по умолчанию. Следующая затем команда *InsertFrequencySweep* производит настройку

развёртки по частоте для созданного выше адаптивного разбиения Setup 1. Отметим, что для переноса текста команды на следующую строку следует использовать символ нижнего подчеркивания «_» в конце текущей строки.

Таким образом, синтаксис конкретной команды с полным набором атрибутов можно изучить, используя возможность HFSS самостоятельно генерировать код файла сценария.

Запуск программы-сценария в среде HFSS можно произвести командой меню *Tools → Run Script*. Запустить выполнение сценария можно также и непосредственно из окна файлового менеджера в ОС Windows, если соответствующий файл *.vbs будет открыт в программе-интерпретаторе Microsoft Windows Script Host. В этом случае нет необходимости заранее запускать пакет HFSS. Дополнительно имеется возможность добавления созданного пользователем сценария построения модели в библиотеку графических примитивов HFSS, доступную из меню *Draw → User Defined Primitive*. Для этого в редакторе VBScript на основе файла сценария *.vbs необходимо скомпилировать файл динамической библиотеки *.dll.

Заметим, что в пакете HFSS отсутствует встроенный редактор сценариев, вследствие чего просмотр и написание текста сценариев необходимо проводить с помощью внешних программ. Поскольку файлы сценариев на языке VBScript представляют собой текстовые файлы с командами, их можно просматривать и редактировать в обычной программе «Блокнот». Однако более удобным представляется использовать для этой цели специальные текстовые редакторы, «понимающие» синтаксис языков программирования и выделяющие их команды различным цветом. Примером такого редактора является свободно распространяемая программа Notepad++ [4].

НАПИСАНИЕ СЦЕНАРИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ВОЛНОВОДНОГО ФИЛЬТРА

Дополним созданный файл сценария кодом, осуществляющим построение модели волноводного ППФ на индуктивных диафрагмах. Структура создаваемого в HFSS фильтра будет аналогична изображённой на рисунке 1, за исключением использования диафрагм конечной толщины *t*. Для сокращения объёма задачи предусмот-

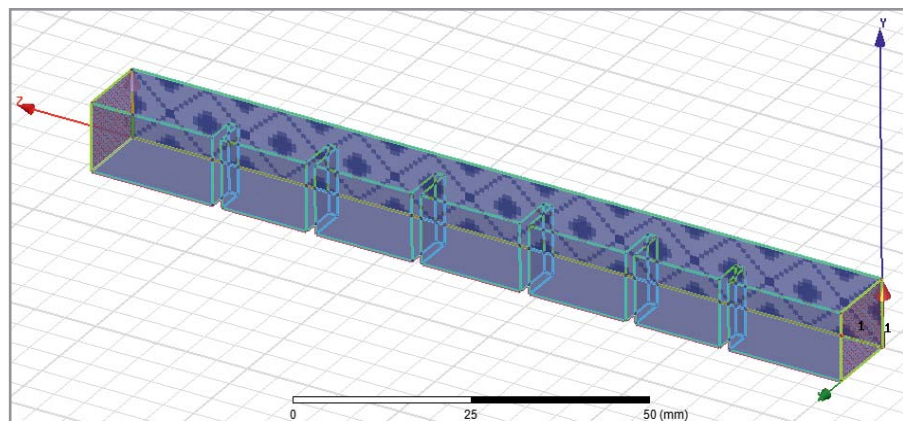


Рис. 6. Модель ППФ, построенная при помощи сценария

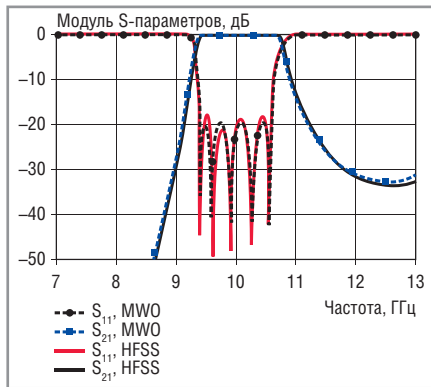


Рис. 7. Сопоставление частотных характеристик, полученных в HFSS и Microwave Office

рим введение идеальной магнитной стенки в плоскости симметрии. Порядок фильтра и его геометрические параметры будут вводиться пользователем в диалоговых окнах.

Сначала объявим переменные, описывающие геометрию модели ППФ, добавим диалоговые окна для ввода пользователем значений этих переменных и введём их в проект в качестве локальных переменных. Текст кода соответствующей части сценария приведён в листинге 2. Каждая переменная вводится в отдельном окне, вызываемом функцией *InputBox*. Последние три аргумента данной функции, задающие выводимое в текстовом окне значение по умолчанию и положение самого окна на экране, являются необязательными и могут быть опущены. Пример такого диалогового окна показан на рисунке 5. Заметим, что для корректного отображения русскоязычных символов автору пришлось сменить исходную кодировку файла сценария на ANSI, а корректный ввод дробных чисел удалось обеспечить благодаря смене в ОС Windows 7 формата языка и региональных стандартов на английский.

Далее создадим отрезок прямоугольного волновода длиной l_{full} , зададим плоскость Н-симметрии и множитель импеданса, установим волноводные порты (с заданными интегральными линиями) со стороны каждого из двух торцов, в цикле *For...Next* создадим необходимое число диафрагм с заданными параметрами, а затем «вырежем» из отрезка волновода эти диафрагмы посредством булевой операции вычитания (см. листинг 3). Отметим, что для команды создания прямоугольного параллелепипеда *CreateBox* требуется задавать два массива аргументов: первый содержит параметры геометрии, а второй задаёт такие атрибуты создаваемого

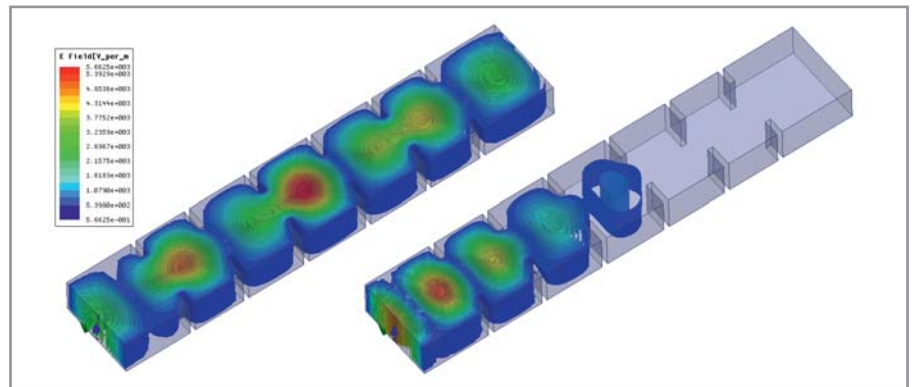


Рис. 8. Распределение модуля электрического поля внутри фильтра в ПП на частоте 10 ГГц (слева) и ПЗ на частоте 12 ГГц (справа)

элемента, как название, цвет, прозрачность, материал и др. Для примера в листинге 3 также показано использование команды *ChangeProperty* для изменения значения прозрачности созданного отрезка волновода.

Создаваемая таким сценарием модель фильтра является полностью параметризированной, что позволяет при необходимости проводить её оптимизацию.

В заключительной части кода сценария добавим в проект вывод результатов расчёта модулей коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} в логарифмическом масштабе, сохраним сам проект, проведём расчёт созданной модели ППФ, а по его окончании выведем на экран соответствующее сообщение. Текст данной части сценария приведён в листинге 4.

РАСЧЕТ ФИЛЬТРА В ПРОГРАММЕ HFSS

Полученные в программе Microwave Office параметры геометрии ППФ были использованы при создании модели фильтра сценарием, написанным в HFSS. Построенная сценарием модель изображена на рисунке 6. Частотные характеристики рассчитанной структуры фильтра представлены на рисунке 7, где для наглядности приведены также аналогичные зависимости, полученные в Microwave Office. Данные графики очень хорошо согласуются друг с другом, следовательно, использованные при моделировании в Microwave Office волноводные компоненты позволяют получать адекватные результаты.

На рисунке 8 отображено мгновенное распределение модуля электрического поля в полной модели фильтра на центральной частоте ПП и на границе ПЗ при подаче мощности на один из входов. Данная визуализация иллюстрирует процесс распространения и затухания волны в фильтре.

рирует процесс распространения и затухания волны в фильтре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена методика проектирования волноводного ППФ произвольного порядка в САПР Ansoft HFSS, включающая в себя проведение предварительных расчётов в программе Microwave Office. Создание трёхмерной модели фильтра осуществлено посредством сценария, написанного на языке VBScript. Синтаксис конкретных команд языка сценариев можно изучить, используя возможность HFSS самостоятельно генерировать код файла сценария.

Результаты расчёта волноводного ППФ на индуктивных диафрагмах, проведённые в обеих программах, хорошо согласуются друг с другом. Это позволяет рекомендовать пакет Microwave Office для проведения предварительной оптимизации фильтров подобной топологии, а пакет HFSS — для окончательных расчётов с учётом особенностей конкретного конструктивного исполнения, например, технологического скругления краёв резонаторов при фрезеровании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пластиков А. Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования. Часть 3. Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр на сосредоточенных элементах. Современная электроника. 2012. № 6. С. 54–59.
2. Uslu M.A., Sevgi L. A MATLAB-Based Filter-Design Program: From Lumped Elements to Microstrip Lines. IEEE AP Magazine. 2011. Vol. 53. № 1. P. 213–224.
3. Prigent G., Raveu N., Pigaglio O., Baudrand H. Design of Waveguide Bandpass Filter in the X-frequency Band. Microwave J. 2008. № 1.
4. <http://notepad-plus-plus.org>.

