

Опыт внедрения программного обеспечения MiCIAN μ Wave Wizard в учебном процессе в университете

В начале 2009 года Якутский государственный университет приобрел учебную лицензию на программное обеспечение MiCIAN μ Wave Wizard, которую начал использовать в учебном процессе по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны» для специальности 210301 «Радиофизика и электроника». В рамках обучения данной дисциплине студенты должны: изучить принципы функционирования устройств СВЧ и антенн, аналитические и численные методы их расчета, типовые узлы и элементы, их электрические модели и конструкции; понять сочетание методов электродинамики и теории цепей СВЧ; научиться выполнять экспериментальное исследование и автоматизированное проектирование устройств СВЧ и антенн; получить представление об общих проблемах электромагнитной совместимости и способах их решения.

За истекший год был разработан цикл лабораторных работ, некоторые из них мы хотели бы представить в данной статье.

Николай Дьяконов

sales@eurointech.ru

Моделирование ступенчатого перехода для соединения двух прямоугольных волноводов разного поперечного сечения

Переходы предназначены для соединения двух волноводов различных поперечных сечений с целью согласования их волновых сопротивлений. Переходы делятся на плавные и ступенчатые.

Плавный линейный переход между прямоугольными волноводами различных сечений (рис. 1) имеет простую конструкцию, высокую электрическую прочность, но значительную длину. Для получения минимальных отражений длина плавного перехода выбирается согласно формуле:

$$L = 0,5n\lambda_{\phi}$$

где λ_{ϕ} — длина волны в волноводе с учетом изменения размеров поперечного сечения; $n > 5$ — целое положительное число. К примеру, при одинаковых размерах узких стенок соединяемых волноводов

($b_1 = b_2$) и небольшом различии широких стенок a_1 и a_2 длина перехода:

$$L = 0,16(\lambda_{\phi 1} + \lambda_{\phi 2}) + 0,67\lambda_{\phi}$$

где $\lambda_{\phi \text{cp}}$ — длина волны в волноводе шириной $a_{\text{cp}} = 0,5(a_1 + a_2)$.

В плавном переходе сопротивление меняется непрерывно вдоль всей линии, то есть плавный переход, по существу, является нерегулярной линией, в которой волновое сопротивление является функцией продольной координаты [1, 2].

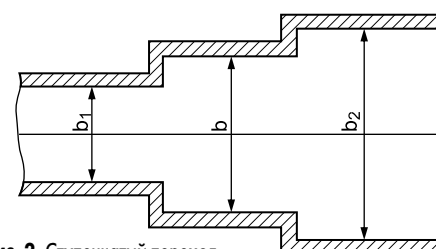


Рис. 2. Ступенчатый переход между прямоугольными волноводами

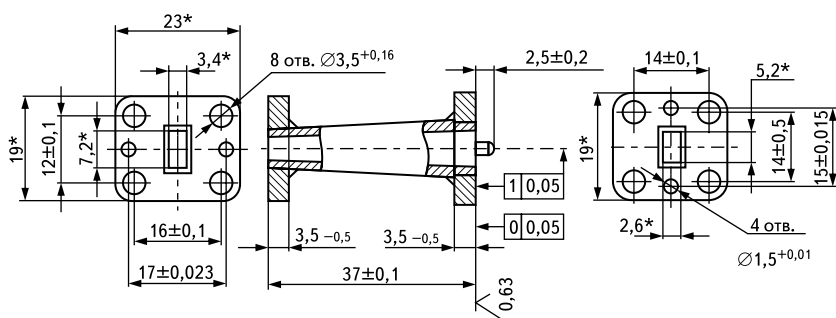


Рис. 1. Конструкция перехода между волноводами различных сечений

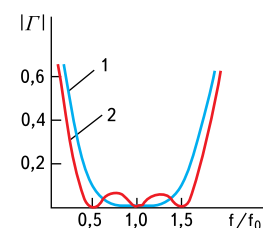


Рис. 3. Частотные характеристики биномиального (1) и чебышевского ступенчатого перехода (2)

При одинаковом перепаде волновых сопротивлений и заданных допусках на рассогласование длина ступенчатого перехода всегда меньше длины плавного перехода. С другой стороны, электрическая прочность плавного перехода выше, чем у ступенчатого.

Для решения задачи широкополосного согласования активных сопротивлений применяют ступенчатые переходы (трансформаторы), представляющие собой каскадное соединение четвертьволновых трансформаторов — ступенчатых изменений размеров поперечного сечения волноводной трубы с соответствующими скачкообразными изменениями волновых сопротивлений $Z_{\theta 1}, Z_{\theta 2}, \dots, Z_{\theta n+1}$.

При согласовании двух разных волноводов переменными могут быть один или оба размера поперечного сечения волноводной трубы трансформатора.

Для простейшего ступенчатого четвертьволнового перехода (рис. 2) размер узкой стенки определяется по формуле $b = (b_1 b_2)^{1/2}$.

Для улучшения характеристик ступенчатого перехода скачки волновых сопротивлений отдельных ступенек делаются различными. Среди множества известных типов переходов сравним переходы, у которых скачки волновых сопротивлений меняются пропорционально коэффициентам бинома Ньютона (биномиальные переходы) или пропорционально полиномам Чебышева (чебышевские переходы). В первом случае переход имеет максимально плоскую характеристику (кривая 1 на рис. 3), во втором случае характеристика носит колебательный характер в полосе пропускания перехода (2 на рис. 3) [1]. Сравнительный анализ характеристик показывает, что чебышевский переход имеет большую крутизну фронтов частотной характеристики затухания при такой же длине, однако уступает биномиальному переходу в линейности фазо-частотной характеристики.

Наибольшую широкополосность при наименьших размерах перехода обеспечивает так называемый чебышевский ступенчатый клин. В таком клине длина и высота отдельных ступенек рассчитываются по полиномам Чебышева.

Принята следующая классификация волноводных труб с переменным поперечным сечением:

- с одним переменным размером (переменной высотой или шириной);
- с двумя переменными размерами (переменной высотой и шириной);
- с переменной формой поперечного сечения.

Расчет ступенчатого перехода прямоугольного волновода с одним переменным размером (переменной высотой или шириной)

Предлагаем рассмотреть переход с одним переменным размером — переменной высотой. Сечения перехода, соответственно, равны 72×10 мм и 72×44 мм. Требуется обеспечить в полосе пропускания 8–13,04 см максимальный модуль коэффициента отражения $|\Gamma|_{\max} \leq 0,15$.

Для начала определяем $f_{cp} = (f_{\max} - f_{\min})/2 + f_{\min}$. Наименьшей длине волны $\lambda_{\min} = 8$ см соответствует частота $f_{\max} = 3,75$ ГГц, а наибольшей $\lambda_{\max} = 13,04$ см соответствует $f_{\min} = 2,3006$ ГГц. Средняя частота полосы пропускания $f_{cp} = 3,0253$ ГГц.

1. Находим перепад волновых сопротивлений R . Поскольку известно, что отношение волновых сопротивлений прямоугольных волноводов одинаковой ширины и разной высоты равно отношению высот, то $R = 44/10 = 4,4$.

2. Далее по методике, описанной в [1], определяем волны в волноводе, соответствующие граничным волнам полосы пропускания:

$$\Lambda_1 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_{kp}}\right)^2}} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_1}{2a}\right)^2}} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{8}{2 \times 7,2}\right)^2}} = 9,3 \text{ см.}$$

3. Длина ступеньки:

$$\Lambda_2 = \frac{\lambda_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_{kp}}\right)^2}} = \frac{\lambda_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_2}{2a}\right)^2}} = \frac{\lambda_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{13,04}{2 \times 7,2}\right)^2}} = 30,754 \text{ см.}$$

4. Амплитудный множитель:

$$l = \frac{1}{2} \times \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2} = \frac{1}{2} \times \frac{9,3 \times 30,754}{9,3 + 30,754} = 3,57 \text{ см.}$$

5. Масштабный множитель S (определяет ширину полосы пропускания по заданному уровню h чебышевской кривой):

$$h = \frac{|\Gamma|_{\max}}{\sqrt{1 - |\Gamma|_{\max}^2}} = \frac{0,15}{\sqrt{1 - 0,15^2}} = 0,154.$$

6. Расчет параметра C :

$$S = \cos \theta_{M2} = \cos \frac{2\pi l}{\Lambda_2} = \cos \frac{2\pi \times 3,57}{30,754} = 0,746.$$

7. Число ступенек:

$$n = \frac{\text{arch } C}{\text{arch } \frac{1}{S}} = \frac{\text{arch } 5,255}{\text{arch } \frac{1}{0,746}} = 2,918.$$

Выбираем число ступенек $n = 3$.

Теперь мы полностью готовы к проектированию рассчитанного перехода с переменной высотой в программе MiCIAN μ Wave Wizard с помощью инструмента *Taper assistant*.

Запустим программу MiCIAN μ Wave Wizard и создадим новый проект. В появившемся окне перейдем на вкладку **Frequency ranges**, введем начальные и конечные частоты, а также шаг частоты анализа (рис. 4).

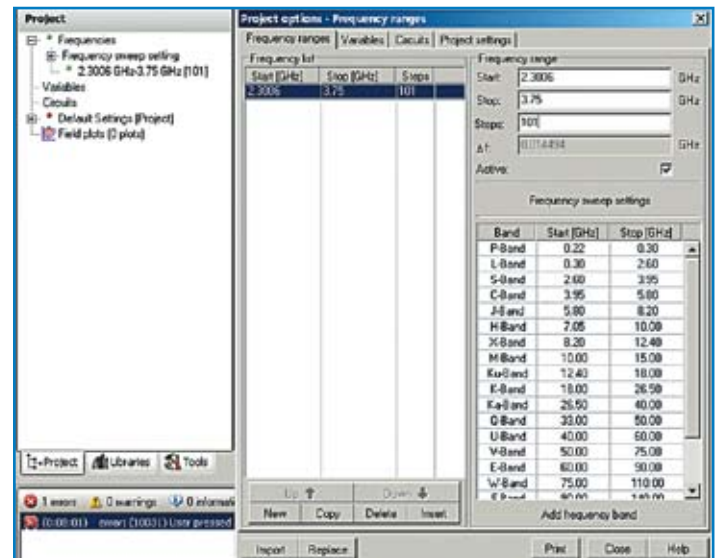


Рис. 4. Задание частотного диапазона проекта

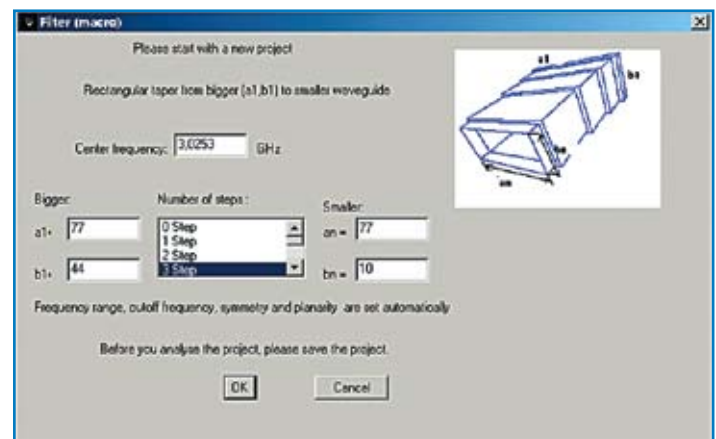



Рис. 5. Задание параметров инструмента Taper assistant




Рис. 6. Результат синтеза ступенчатого перехода

Сохраним проект и запустим инструмент *Taper assistant*, расположенный в разделе меню *Tools*. В появившемся окне (рис. 5) введем центральную частоту, большие и малые размеры волноводов, число ступенек перехода (*Number of steps*).

После нажатия кнопки ОК будет синтезирована эквивалентная схема проектируемого перехода (рис. 6).

Специальный инструмент, вызываемый нажатием кнопки  или комбинации горячих клавиш Ctrl+q, позволяет получить и просмотреть трехмерную модель проектируемого перехода (рис. 7).

Для запуска процесса моделирования нажмем кнопку , после чего на экране отобразится график зависимости S-параметров от частоты (рис. 8).

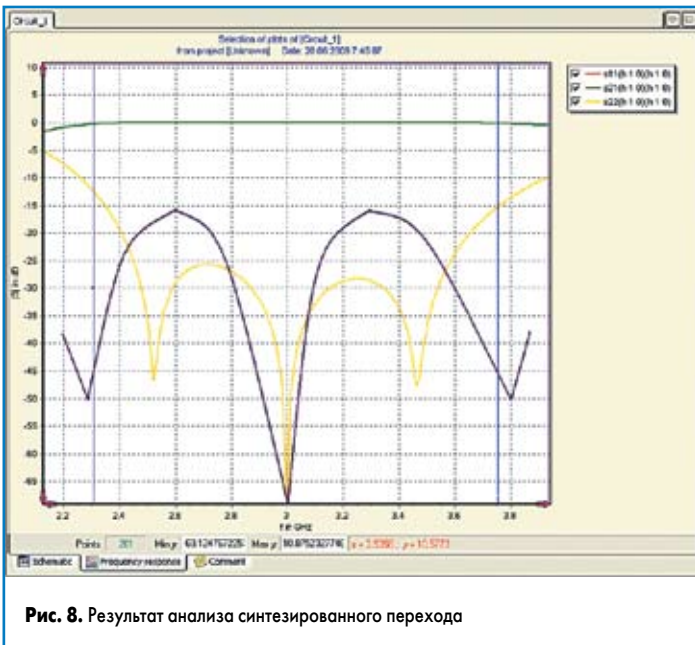


Рис. 8. Результат анализа синтезированного перехода

На графике, представленном на рис. 8, видно, что в полосе частот от $f_{\min} = 2,3006$ ГГц до $f_{\max} = 3,75$ ГГц (выделены синими вертикальными линиями) максимальное значение коэффициента отражения $S_{22} \leq -13$ дБ. По теоретическим данным оно должно было быть $|\Gamma_{\max}| \leq 0,15$, что соответствует $S_{22} \leq -16,4$ дБ. Погрешности в основном в округлениях при расчете. Коэффициент прямой передачи, как и должно было быть, равен 0 дБ.

Моделирование ступенчатого перехода прямоугольного волновода с двумя переменными размерами (переменной высотой и шириной)

Задача состоит в расчете ступенчатого перехода между двумя прямоугольными волноводами с сечениями $a_0 \times b_0 = 72 \times 10$ мм и $a_n \times b_n = 90 \times 45$ мм. Переход должен работать в диапазоне длин волн от 9,1 до 10,9 см с КСВ не хуже 1,087.

При $\lambda_{\min} = 9,1$ см и $\lambda_{\max} = 10,9$ см граничные частоты, соответственно, равны $f_{\max} = 3,29$ ГГц и $f_{\min} = 2,752$ ГГц.

1. Средняя частота и средняя длина волны рабочего диапазона будут равны:

$$f_{cp} = (f_{\max} + f_{\min})/2 = 3,021 \text{ ГГц и } \lambda_{cp} = 100 \text{ мм.}$$

По методике, представленной в [1], выполним расчеты.



Рис. 7. Трехмерный вид синтезированного перехода



Рис. 10. Трехмерная модель перехода с двумя переменными размерами

2. Длины волн в выходных волноводах на средней волне λ_{cp} :

$$\Lambda_{0cp} = \frac{\lambda_{cp}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{cp}}{\lambda_{0cp}}\right)^2}} = \frac{\lambda_{cp}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{cp}}{2a_0}\right)^2}} = \frac{100}{\sqrt{1 - \left(\frac{100}{2 \times 72}\right)^2}} = 138,9 \text{ см,}$$

где a_0 и a_n — размеры входного и выходного волноводов: $a_0 < a_n$.

3. Находим перепад волновых сопротивлений R :

$$b_n \Lambda_n = 5409, b_0 \Lambda_0 = 1389, R = (b_n \Lambda_n) / (b_0 \Lambda_0) = 3,89.$$

4. Диапазон перекрытия $\Lambda_{\max} / \Lambda_{\min}$ находим с запасом:

$$\Lambda_{\max} = \frac{\lambda_{\max}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\max}}{2a_0}\right)^2}} = 218 \text{ мм, } \Lambda_{\min} = \frac{\lambda_{\min}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{2a_0}\right)^2}} = 89,5 \text{ мм.}$$

Получим $\Lambda_{\max} / \Lambda_{\min} = 2,44$.

5. Выбираем переход с чебышевской частотной характеристикой.

6. Число ступеней перехода n выбираем по таблице 4–6 «Перекрытие диапазона Λ_2 / Λ_1 » из [1], при условии, что $S_{22} = 0,02$, что соответствует КБВ = 0,96 (требуемая величина — 0,92). Исходя из рассчитанных $\Lambda_{\max} / \Lambda_{\min} = 2,44$ и $R = 3,89$, по ближайшим табличным значениям находим, что количество ступеней $n = 4$ при $|\Gamma_{\max}| = 0,02$.

Выполним проектирование рассчитанного перехода в MiCIAN μ Wave Wizard. Запустим программу MiCIAN μ Wave Wizard и создадим новый проект. В появившемся окне перейдем на вкладку *Frequency ranges*, введем начальные и конечные частоты, а также шаг частоты анализа.

Сохраним проект и запустим инструмент *Taper assistant*, расположенный в разделе меню *Tools*. В появившемся окне (рис. 9) введем центральную частоту, большие и малые размеры волноводов, число ступенек перехода (*Number of steps*).

Система синтезирует эквивалентную схему перехода, также можно просмотреть (Ctrl+q) трехмерный вид (рис. 10). Ясно, что, в отличие от первого случая, здесь изменяются оба размера волновода.

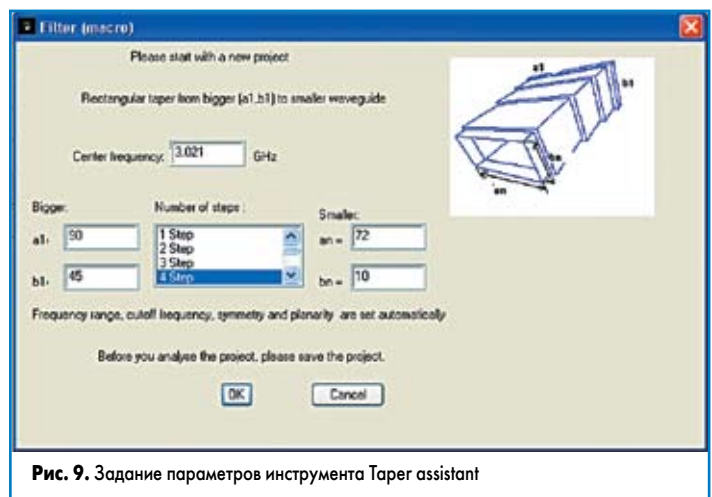


Рис. 9. Задание параметров инструмента Taper assistant

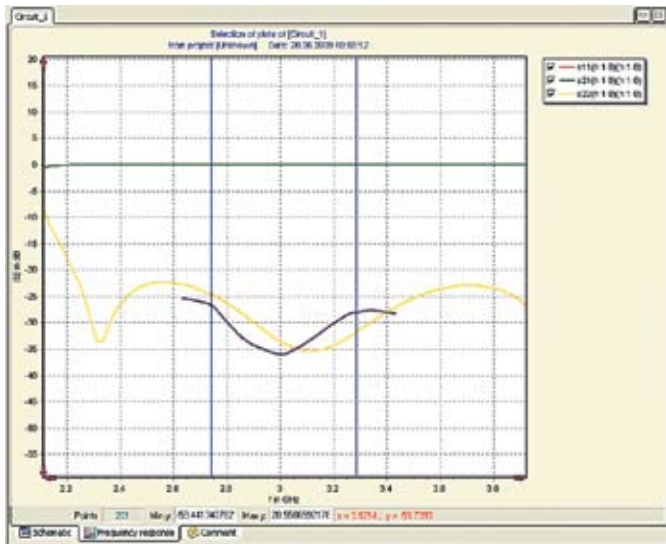


Рис. 11. Результат анализа синтезированного перехода с двумя переменными размерами

Запустим процесс моделирования и получим зависимости S -параметров перехода от частоты (рис. 11).

В условии сказано, что КБВ в диапазоне от 2,752 до 3,29 ГГц должно быть не меньше 92%, это соответствует величине $K_{СВ} = 1/K_{ВВ} = 1,086$. Величина коэффициента отражения $|\Gamma| = 0,0412$, что соответствует $S_{22} \leq -27,6$ дБ. На графике видно, что в полосе частот, ограниченных $f_{\min} = 2,752$ ГГц и $f_{\max} = 3,29$ ГГц (выделены вертикальными синими линиями), $S_{22} \leq -25$ дБ.

Литература

1. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Чернушенко А. М., Петров Б. В., Мало-рацкий Л. Г. и др. Конструирование экранов и СВЧ-устройств / Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1990.