

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Методические указания к расчетно-графической работе  
для студентов IV курса факультета радиотехники и электроники  
(направление 210200 и специальность 210404)  
дневного и заочного отделений

УДК 621.372.632.018.424(07)  
П 791

Расчетно-графическая работа предназначена для закрепления знаний по изучаемым дисциплинам и получения практических навыков проектирования функциональных узлов с использованием современных профессиональных программных продуктов.

Составил д-р техн. наук, проф. *Г.Н. Девятков*

Рецензент доц. *Н.И. Коржавин*

Работа выполнена на кафедре  
конструирования и технологии радиоэлектронных средств

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

**Методические указания**

Редактор *Л.Н. Ветчакова*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Корректор *Л.Н. Кишит*  
Компьютерная верстка *В.Ф. Ноздрева*

---

Подписано в печать 24.12.2010. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Тираж 50 экз. Уч.-изд. л. 1,16. Печ. л. 1,25. Изд. № 332. Заказ №  
Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2010

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ

## Задание

Спроектировать и промоделировать топологию широкополосного трансформатора сопротивлений на четвертьволновых отрезках линии передачи в микрополосковом исполнении.

Топология – это вид физического представления схемы, в которой каждый ее компонент имеет свои геометрические размеры.

## Исходные данные

Необходимые для решения задачи исходные данные выбираются из таблицы в соответствии с двумя последними цифрами студенческого шифра.

### Исходные данные для вариантов расчетно-графической работы

| Наименование<br>исходных данных | Цифры студенческого шифра    |      |     |     |      |     |      |      |     |     |
|---------------------------------|------------------------------|------|-----|-----|------|-----|------|------|-----|-----|
|                                 | 0                            | 1    | 2   | 3   | 4    | 5   | 6    | 7    | 8   | 9   |
|                                 | По последней цифре шифра     |      |     |     |      |     |      |      |     |     |
| $R_T$ (Ом)                      | 10                           | 25   | 45  | 40  | 50   | 60  | 75   | 15   | 20  | 12  |
| $R_H$ (Ом)                      | 50                           | 75   | 9   | 8   | 10   | 10  | 15   | 60   | 80  | 60  |
|                                 | По предпоследней цифре шифра |      |     |     |      |     |      |      |     |     |
| $f_H$ (ГГц)                     | 0.5                          | 1    | 1   | 0.7 | 1.5  | 1.2 | 0.8  | 0.6  | 0.9 | 2   |
| $f_B$ (ГГц)                     | 1.5                          | 2.5  | 2   | 1.9 | 3.5  | 2.8 | 2.2  | 1.8  | 2.3 | 5   |
| $K_{сгУ}$                       | 1.35                         | 1.25 | 1.2 | 1.4 | 1.45 | 1.5 | 1.45 | 1.35 | 1.3 | 1.4 |

**Примечание:**

$R_{\Gamma}$  – внутреннее сопротивление источника сигнала;

$R_{\text{H}}$  – сопротивление нагрузки;

$f_{\text{H}} - f_{\text{B}}$  – полоса рабочих частот;

$K_{\text{CTU}}$  – коэффициент стоячей волны напряжения на входных зажимах трансформатора.

Характеристика затухания – Чебышевская.

**Методические указания**

Прежде чем приступить к выполнению задания, изучите по источникам: [1, с. 217–243] – метод синтеза однородных четвертьволновых трансформаторов; [2, с. 16–23, 58–77] – неорганические диэлектрики, проводниковые материалы, несимметричную полосковую линию; [3, с. 109–133, 243–246] – конструирование полосковых плат; [4] – проектирование микросборок СВЧ-диапазона; [5] – назначение, возможности, создание схем и графиков, настройку и оптимизацию схем в Microwave Office.

Расчетно-графическое задание должно содержать следующие разделы: исходные данные; синтез и моделирование трансформатора сопротивлений в распределенном электрическом элементном базисе; разработка и моделирование топологии трансформатора сопротивлений в геометрическом элементном базисе; заключение; список использованных литературных источников; приложение (чертеж топологии).

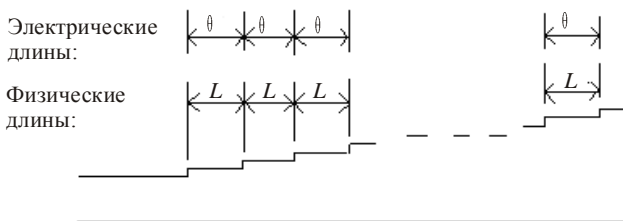
**Синтез трансформатора сопротивлений в распределенном электрическом элементном базисе**

Синтез трансформатора сопротивлений проводим в данной расчетно-графической работе с использованием табл. П1.1, П1.2 а–г. Для этого сначала определите общий перепад сопротивлений четвертьволнового трансформатора (см. рисунок), используя формулу

$$R = \frac{R_{\text{H}}}{R_{\Gamma}} \quad \text{или} \quad R = \frac{R_{\Gamma}}{R_{\text{H}}}, \quad (1)$$

и найдите его относительную полосу пропускания  $w$  по формуле

$$w = 2 \frac{f_{\text{B}} - f_{\text{H}}}{f_{\text{B}} + f_{\text{H}}}. \quad (2)$$



Нормированные сопротивления:

$$Z_0 = 1 \quad Z_1 \quad Z_2 \quad Z_3 \quad Z_4 \quad \dots \quad Z_n \quad Z_{n+1} = R$$

Схематический вид четвертьволнового трансформатора

При проведении дальнейших расчетов найденное значение  $w$  необходимо взять больше на 10 %, чтобы обеспечить некоторый запас по полосе пропускания.

Из табл. П1.1 определите число секций трансформатора  $n$ , учитывая, что максимальное значение  $K_{стU}$  из таблицы не должно превышать заданного.

Из табл. П1.2а–г найдите волновые сопротивления этих секций.

### Моделирование трансформатора сопротивлений в распределенном электрическом элементном базисе

Моделирование трансформатора сопротивлений проведите с использованием программного продукта Microwave Office [5]. Для этого, используя полученные на предыдущем этапе данные (число секций и их волновые сопротивления), составьте структурную схему трансформатора сопротивлений, где в качестве секций (отрезков длинных линий передачи без потерь) используйте базовые элементы TLIN (библиотека Transmission Lines – Phase). Физическую длину  $L$  четвертьволновых отрезков линий передачи определите по формуле

$$L = \frac{c}{4f_0\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света;  $f_0 = (f_B + f_H) / 2$  – центральная частота полосы пропускания;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Для полученной схемы постройте графики зависимости  $K_{стU}$  и коэффициента передачи по напряжению от источника сигнала в нагрузку  $|S_{21}|$  от частоты.

Если в результате моделирования будут получены характеристики, которые удовлетворяют условиям задачи ( $K_{стU}$  в заданной полосе частот на графике не должен превышать исходного значения), то можно перейти к проектированию трансформатора сопротивлений в геометрическом элементном базисе.

### **Разработка топологии трансформатора сопротивлений в геометрическом элементном базисе**

Учитывая, что тенденцией развития современных полупроводниковых приемопередающих систем является непрерывное продвижение в верхнюю часть СВЧ-диапазона, повышение требований к ширине полосы рабочих частот, надежности и технологичности при одновременном уменьшении веса и габаритов, в данной расчетно-графической работе необходимо разработать топологию широкополосного трансформатора сопротивлений в микрополосковом исполнении, которая может быть реализована с использованием тонкопленочной технологии на основе вакуумного напыления с последующим гальваническим наращиванием. Разработка топологии устройства включает в себя: выбор материала и геометрических размеров подложки, выбор материала, толщины, расчет длины и ширины микрополосковых линий (МПЛ), укладку МПЛ на подложке с минимизацией площади и окончательным определением геометрических размеров подложки.

### **Выбор подложки**

Подложка является элементом конструкции, позволяющим реализовать электрическую схему с МПЛ, и в значительной мере определяет среду для распространения СВЧ-энергии. При выборе подложки, табл. П.3, учтите следующие факторы: значение относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$ , определяющим является степень миниатюризации узла и вид используемой линии передачи; тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ , что нередко существенно ограничивает выбор материала подложки; устойчивость материала подложки к климатическим и технологическим воздействиям в процессе изготовления

схемы, механическую прочность и стабильность материала в процессе эксплуатации.

Алюмооксидная керамика (поликор, сапфирит, 22ХС, ВГ – IV и др.) характеризуется высокой механической прочностью, стабильностью параметров в широком интервале температуры. Ситаллы (СТ32-1, СТ38-1 и др.) обладают высокой плотностью и однородностью во всем объеме, высокой твердостью и термостойкостью. Возможны ситуации, когда предъявляемым требованиям удовлетворяют сразу несколько материалов. В этом случае для принятия окончательного решения следует учесть дополнительные факторы, например стоимость.

После выбора материала подложки определитесь с ее геометрическими размерами. Геометрические размеры подложек из неорганического материала приведены в табл. П1.5. Наиболее типичный размер подложки 60×48 мм выбран исходя из стандартов на подложки для низкочастотных микросхем. При необходимости подложка разрезается на части меньшего размера. Рекомендуется предварительно выбрать размер подложки 60×48×1 мм. Окончательные размеры подложки уточнятся после определения длины и ширины МПЛ и их укладки на подложке с минимизацией занимаемой площади в соответствии с требованиями [4]. При необходимости, варьируя толщиной подложки, табл. П1.5, можно изменять ширину МПЛ.

### **Выбор материала и определение геометрических параметров микрополосковых линий передачи**

Для того чтобы обеспечить хорошую адгезию к подложке, малые потери и высокую устойчивость к коррозии МПЛ представляют собой трехслойную структуру. Первый слой, толщиной 0.01...0.5 мкм, – высокоомный материал, обладающий хорошей адгезией (хром, нихром, тантал и др., табл. П1.4), второй слой (основной проводник) – металл с высокой проводимостью (медь, золото и др., табл. П1.4) и третий слой, толщиной 1...10 мкм, – обеспечивает защиту от воздействий внешней среды и возможность подпайки разъемов или радиоэлементов (по меди – золото, серебро, олово и др., табл. П1.4). Толщина второго слоя выбирается в зависимости от частоты (в 2–5 раз больше толщины скин-слоя): в диапазоне частот до 0.3 ГГц – не менее 15 мкм; до 2 ГГц – не менее 10 мкм; до 8 ГГц – не менее 6 мкм.

Остальные геометрические параметры (длины и ширины) МПЛ определяются с помощью ПО Microwave Office (Window-TX Line...). Для этого сначала денормируйте найденные волновые сопротивления секций трансформатора:

$$Z_{(i)}^{\Delta} = Z_{(i)} R_{\Gamma}, \quad \text{или} \quad Z_{(i)}^{\Delta} = Z_{(i)} R_{\Pi}, \quad (4)$$

где  $i = 1, \dots, n$ .

Используя информацию об электрических параметрах выбранного материала подложки  $\epsilon_r$ ,  $\text{tg} \delta$  и ее толщине, материала основного проводника МПЛ  $\sigma$  и его толщине, электрических параметрах МПЛ  $Z$  и  $\theta$ , центральной частоте рабочей полосы частот  $f_0$ , с помощью ПО Microwave Office (Window-TX Line...) найдите длину  $L_i$  и ширину  $W_i$  МПЛ. Если ширина хотя бы одной МПЛ  $W_i \leq 0.1$  мм, то нужно увеличить толщину подложки, табл. П1.5, или выбрать подложку с меньшим значением  $\epsilon_r$ , а если  $W_i \geq 10$  мм, то нужно уменьшить толщину подложки или выбрать подложку с большим значением  $\epsilon_r$  и снова с помощью ПО Microwave Office (Window-TX Line...) рассчитать ширину МПЛ. В приложении 2 приведено окно ПО TX Line – Microstrip.

### **Укладка микрополосковых линий на подложке**

После определения длины  $L_i$  и ширины  $W_i$  МПЛ необходимо произвести их укладку (размещение) на подложке. При укладке МПЛ необходимо минимизировать занимаемую площадь подложки и одновременно удовлетворить требованиям ОСТ на микросборки СВЧ-диапазона [4]: «входы и выходы МПЛ должны оканчиваться на расстоянии не менее 0.2 мм и не более 0.5 мм от края платы (подложки)». Расстояние от МПЛ до краев подложки должно быть не менее трех толщин подложки, а между МПЛ – не менее шести толщин. Для уменьшения площади, занимаемой МПЛ, их рекомендуется изгибать под прямым углом, используя так называемый «согласованный изгиб». При минимизации площади необходимо ориентироваться на геометрические размеры подложек, табл. П1.5.



## Моделирование трансформатора сопротивлений в распределенном геометрическом элементном базисе

Спроектированную топологию широкополосного трансформатора сопротивлений промоделируйте с использованием программного продукта Microwave Office. Для этого, используя полученные на предыдущих этапах данные (электрические параметры и толщину выбранной подложки, электрические параметры материала основного проводника и его толщину, геометрические размеры отрезков МПЛ окончательного рисунка топологии), составьте структурную схему трансформатора сопротивлений, используя базовые элементы библиотеки Microstrip (Lines, Junctions, Bends): «отрезок линии передачи ( ЛП)», неоднородности, «скачок ширины ЛП», «согласованный изгиб ЛП» [5]. Для полученной схемы постройте графики зависимости  $K_{сгU}$  и коэффициента передачи по напряжению от источника сигнала в нагрузку  $|S_{21}|$  от частоты.

Если значение  $K_{сгU}$  в рабочей полосе частот превышает заданное, то проведите оптимизацию параметров трансформатора средствами Microwave Office (можно попробовать сделать это вручную в режиме «отвертка») [5].

Изобразите топологию полученного широкополосного трансформатора сопротивлений (соединение МПЛ программным обеспечением осуществляется вручную).

Пример моделирования топологии широкополосного трансформатора сопротивлений в пакете Microwave Office приведен в приложении 3.

Чертеж разработанной топологии широкополосного трансформатора сопротивлений в соответствии с требованиями [3, 4] выполните в программном продукте AutoCAD.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маттей Д.Л.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1 / Д.Л. Матей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
2. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольмана, Ю.Н. Либ и др. / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
3. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление / Е.П. Котов, В.Д. Каплун, А.А. Тер-Маркарян и др. / под ред. Е.П. Котова, В.Д. Каплуна. – М.: Сов. радио, 1979. – 248 с.
4. Отраслевой стандарт. Микроскобки СВЧ-диапазона. Конструирование. ОСТ 4 ГО.010.202 / Отв. ред. Э.К. Вилькс. Нормоконтроллер Я.И. Бирэгал. – Редакция 1-75. – 1978.
5. Учебные материалы кафедры КТПС в электронном виде [S:\ **Korjavin**\ **LR\_ACAD**] MicroWave Office 2001.ppt. (Назначение, возможности, создание схем и графиков, настройка и оптимизация схем).

# Приложение 1

## Справочные материалы

Т а б л и ц а П1.1

**Максимальные значения КСВН для четвертьволновых трансформаторов с Чебышевской характеристикой**

| Перепад сопротивлений $R$ | Ширина полосы пропускания $w_g$ |      |      |      |      |      |                      |      |      |      |       |      |                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|----------------------|------|------|------|-------|------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                           | 0,2                             | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 0,2                  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0   | 1,2  | 0,2                  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,2  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                           | Число секций $n = 2$            |      |      |      |      |      | Число секций $n = 3$ |      |      |      |       |      | Число секций $n = 4$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                           | 1,25                            | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 4,00                 | 5,00 | 6,00 | 8,00 | 10,00 | 1,00 | 1,00                 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,06 | 1,11 | 1,22 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,06 | 1,11 | 1,22 | 1,32 | 1,41 | 1,58 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |      |      |      |      |
| 1,25                      | 1,00                            | 1,01 | 1,03 | 1,05 | 1,08 | 1,11 | 1,00                 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,03  | 1,06 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,06 | 1,11 | 1,22 | 1,32 | 1,41 | 1,58 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |
| 1,50                      | 1,01                            | 1,02 | 1,05 | 1,09 | 1,15 | 1,22 | 1,00                 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,06  | 1,11 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,04 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,04 | 1,06 | 1,10 | 1,17 | 1,27 | 1,47 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |
| 1,75                      | 1,01                            | 1,03 | 1,07 | 1,13 | 1,21 | 1,32 | 1,00                 | 1,00 | 1,02 | 1,04 | 1,08  | 1,16 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,08 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,04 | 1,06 | 1,14 | 1,28 | 1,58 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |
| 2,00                      | 1,01                            | 1,04 | 1,08 | 1,16 | 1,27 | 1,41 | 1,00                 | 1,01 | 1,02 | 1,05 | 1,11  | 1,20 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,04 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,04 | 1,10 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,06 | 1,14 | 1,28 | 1,58 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |
| 2,50                      | 1,01                            | 1,05 | 1,12 | 1,22 | 1,37 | 1,58 | 1,00                 | 1,01 | 1,03 | 1,07 | 1,14  | 1,28 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,06 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,06 | 1,14 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | 1,06 | 1,14 | 1,28 | 1,58 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |
| 3,00                      | 1,01                            | 1,06 | 1,14 | 1,27 | 1,47 | 1,74 | 1,00                 | 1,01 | 1,03 | 1,08 | 1,18  | 1,35 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,07 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,03 | 1,07 | 1,17 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,09 | 1,22 | 1,47 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |      |
| 4,00                      | 1,02                            | 1,08 | 1,19 | 1,37 | 1,64 | 2,04 | 1,00                 | 1,01 | 1,04 | 1,11 | 1,24  | 1,47 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,03 | 1,09 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,04 | 1,11 | 1,27 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,04 | 1,11 | 1,27 | 1,47 | 1,74 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |      |
| 5,00                      | 1,02                            | 1,09 | 1,23 | 1,45 | 1,80 | 2,33 | 1,00                 | 1,01 | 1,05 | 1,13 | 1,29  | 1,59 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,04 | 1,11 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,04 | 1,11 | 1,27 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,05 | 1,13 | 1,31 | 1,69 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |      |      |
| 6,00                      | 1,03                            | 1,11 | 1,26 | 1,53 | 1,95 | 2,60 | 1,00                 | 1,02 | 1,06 | 1,15 | 1,33  | 1,69 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,05 | 1,13 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,05 | 1,13 | 1,31 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,05 | 1,13 | 1,31 | 1,69 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |      |      |
| 8,00                      | 1,03                            | 1,13 | 1,33 | 1,67 | 2,23 | 3,13 | 1,00                 | 1,02 | 1,07 | 1,18 | 1,42  | 1,88 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,06 | 1,16 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,06 | 1,16 | 1,39 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,06 | 1,16 | 1,39 | 1,69 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |      |      |
| 10,00                     | 1,04                            | 1,15 | 1,38 | 1,80 | 2,50 | 3,64 | 1,00                 | 1,02 | 1,08 | 1,21 | 1,49  | 2,06 | 1,00                 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,07 | 1,18 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,07 | 1,18 | 1,46 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,07 | 1,18 | 1,46 | 1,69 | 2,04 | 2,33 | 2,60 | 3,13 | 3,64 |      |      |      |      |

Т а б л и ц а П л .2а

**Значения  $Z_1$  для двухсекционных четвертьволновых трансформаторов с Чебышевской характеристикой<sup>1)</sup> (для  $w_q = 2, 0; Z_1 = Z_2 = \sqrt{R}$  )**

| Перепад сопротивлений $R$ | Ширина полосы пропускания $w_q$ |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           | 0,0                             | 0,2     | 0,4     | 0,6     | 0,8     | 1,0     | 1,2     |
| 1,00                      | 1,00000                         | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 1,25                      | 1,05737                         | 1,05810 | 1,06034 | 1,06418 | 1,06979 | 1,07725 | 1,08650 |
| 1,50                      | 1,10668                         | 1,10808 | 1,11236 | 1,11973 | 1,13051 | 1,14495 | 1,16292 |
| 1,75                      | 1,15016                         | 1,15218 | 1,15837 | 1,16904 | 1,18469 | 1,20572 | 1,23199 |
| 2,00                      | 1,18921                         | 1,19181 | 1,19979 | 1,21360 | 1,23388 | 1,26122 | 1,29545 |
| 2,50                      | 1,25743                         | 1,26113 | 1,27247 | 1,29215 | 1,32117 | 1,36043 | 1,40979 |
| 3,00                      | 1,31607                         | 1,32079 | 1,33526 | 1,36042 | 1,39764 | 1,44816 | 1,51179 |
| 4,00                      | 1,41421                         | 1,42080 | 1,44105 | 1,47640 | 1,52892 | 1,60049 | 1,69074 |
| 5,00                      | 1,49535                         | 1,50366 | 1,52925 | 1,57405 | 1,64084 | 1,73205 | 1,84701 |
| 6,00                      | 1,56508                         | 1,57501 | 1,60563 | 1,65937 | 1,73970 | 1,84951 | 1,98768 |
| 8,00                      | 1,68179                         | 1,69473 | 1,73475 | 1,80527 | 1,91107 | 2,05579 | 2,23693 |
| 10,00                     | 1,77828                         | 1,79402 | 1,84281 | 1,92906 | 2,05879 | 2,23607 | 2,45663 |

<sup>1)</sup>  $Z_2$  определяется из выражения:  $Z_2 = R / Z_1$

Т а б л и ц а П л .2б

**Значения  $Z_1$  для трехсекционных четвертьволновых трансформаторов с Чебышевской характеристикой<sup>1)</sup> (для  $w_q = 2, 0; Z_1 = Z_2 = Z_3 = \sqrt{R}$  )**

| Перепад сопротивлений $R$ | Ширина полосы пропускания $w_q$ |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           | 0,0                             | 0,2     | 0,4     | 0,6     | 0,8     | 1,0     | 1,2     |
| 1,00                      | 1,00000                         | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 1,25                      | 1,02829                         | 1,02883 | 1,03051 | 1,03356 | 1,03839 | 1,04567 | 1,05636 |
| 1,50                      | 1,05202                         | 1,05303 | 1,05616 | 1,06186 | 1,07092 | 1,08465 | 1,10495 |
| 1,75                      | 1,07255                         | 1,07396 | 1,07839 | 1,08646 | 1,09933 | 1,11892 | 1,14805 |
| 2,00                      | 1,09068                         | 1,09247 | 1,09808 | 1,10830 | 1,12466 | 1,14966 | 1,18702 |
| 2,50                      | 1,12177                         | 1,12422 | 1,13192 | 1,14600 | 1,16862 | 1,20344 | 1,25594 |
| 3,00                      | 1,14793                         | 1,15096 | 1,16050 | 1,17799 | 1,20621 | 1,24988 | 1,31621 |
| 4,00                      | 1,19071                         | 1,19474 | 1,20746 | 1,23087 | 1,26891 | 1,32837 | 1,41972 |
| 5,00                      | 1,22524                         | 1,23013 | 1,24557 | 1,27412 | 1,32078 | 1,39428 | 1,50824 |
| 6,00                      | 1,25439                         | 1,26003 | 1,27790 | 1,31105 | 1,36551 | 1,45187 | 1,58676 |
| 8,00                      | 1,30219                         | 1,30916 | 1,33128 | 1,37253 | 1,44091 | 1,55057 | 1,72383 |
| 10,00                     | 1,34089                         | 1,34900 | 1,37482 | 1,42320 | 1,50397 | 1,63471 | 1,84304 |

<sup>1)</sup>  $Z_2$  и  $Z_3$  определяются из выражений:  $Z_2 = \sqrt{R}$ ;  $Z_3 = R / Z_1$

Т а б л и ц а П I.2в

**Значения  $Z_1$  для четырехсекционных четвертьволновых трансформаторов с Чебышевской характеристикой<sup>1)</sup>**

(для  $w_q = 2, 0; Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = \sqrt{R}$ )

| Перепад сопротивлений $R$ | Ширина полосы пропускания $w_q$ |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           | 0,0                             | 0,2     | 0,4     | 0,6     | 0,8     | 1,0     | 1,2     |
| 1,00                      | 1,00000                         | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 1,25                      | 1,01405                         | 1,01440 | 1,01553 | 1,01761 | 1,02106 | 1,02662 | 1,03560 |
| 1,50                      | 1,02570                         | 1,02635 | 1,02842 | 1,03227 | 1,03866 | 1,04898 | 1,06576 |
| 1,75                      | 1,03568                         | 1,03659 | 1,03949 | 1,04488 | 1,05385 | 1,06838 | 1,09214 |
| 2,00                      | 1,04444                         | 1,04558 | 1,04921 | 1,05598 | 1,06726 | 1,08559 | 1,11571 |
| 2,50                      | 1,05933                         | 1,06088 | 1,06577 | 1,07494 | 1,09026 | 1,11531 | 1,15681 |
| 3,00                      | 1,07176                         | 1,07364 | 1,07963 | 1,09086 | 1,10967 | 1,14059 | 1,19218 |
| 4,00                      | 1,09190                         | 1,09435 | 1,10216 | 1,11685 | 1,14159 | 1,18259 | 1,25182 |
| 5,00                      | 1,10801                         | 1,11093 | 1,12026 | 1,13784 | 1,16759 | 1,21721 | 1,30184 |
| 6,00                      | 1,12153                         | 1,12486 | 1,13549 | 1,15559 | 1,18974 | 1,24702 | 1,34555 |
| 8,00                      | 1,14356                         | 1,14758 | 1,16043 | 1,18482 | 1,22654 | 1,29722 | 1,42054 |
| 10,00                     | 1,16129                         | 1,16588 | 1,18060 | 1,20863 | 1,25683 | 1,33920 | 1,48458 |

<sup>1)</sup> См. табл. П I.2г и примечание к ней.

Т а б л и ц а П I.2г

**Значения  $Z_2$  для четырехсекционных четвертьволновых трансформаторов с Чебышевской характеристикой<sup>1)</sup>**

(для  $w_q = 2, 0; Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = \sqrt{R}$ )

| Перепад сопротивлений $R$ | Ширина полосы пропускания $w_q$ |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           | 0,0                             | 0,2     | 0,4     | 0,6     | 0,8     | 1,0     | 1,2     |
| 1,00                      | 1,00000                         | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 1,25                      | 1,07223                         | 1,07260 | 1,07371 | 1,07559 | 1,07830 | 1,08195 | 1,08683 |
| 1,50                      | 1,13512                         | 1,13584 | 1,13799 | 1,14162 | 1,14685 | 1,15394 | 1,16342 |
| 1,75                      | 1,19120                         | 1,19224 | 1,19537 | 1,20065 | 1,20827 | 1,21861 | 1,23248 |
| 2,00                      | 1,24206                         | 1,24340 | 1,24745 | 1,25431 | 1,26420 | 1,27764 | 1,29572 |
| 2,50                      | 1,33204                         | 1,33396 | 1,33974 | 1,34954 | 1,36370 | 1,38300 | 1,40907 |
| 3,00                      | 1,41051                         | 1,41296 | 1,42036 | 1,43290 | 1,45105 | 1,47583 | 1,50943 |
| 4,00                      | 1,54417                         | 1,54760 | 1,55795 | 1,57553 | 1,60102 | 1,63596 | 1,68360 |
| 5,00                      | 1,65686                         | 1,66118 | 1,67423 | 1,69642 | 1,72864 | 1,77292 | 1,83358 |
| 6,00                      | 1,75529                         | 1,76043 | 1,77600 | 1,80248 | 1,84098 | 1,89401 | 1,96694 |
| 8,00                      | 1,92323                         | 1,92990 | 1,95009 | 1,98446 | 2,03453 | 2,10376 | 2,19954 |
| 10,00                     | 2,06509                         | 2,07315 | 2,09756 | 2,13915 | 2,19984 | 2,28397 | 2,40096 |

<sup>1)</sup> Значения  $Z_1$  приведены в табл. П I.2в, а значения  $Z_3$  и  $Z_4$  определяются из выражений  $Z_3 = R/Z_2; Z_4 = R/Z_1$ .

Т а б л и ц а П л 3

**Характеристики неорганических диэлектриков**

| Марка диэлектрика | $\epsilon_r$ | $\text{tg } \delta \cdot 10^{-4}$ | Марка диэлектрика    | $\epsilon_r$ | $\text{tg } \delta \cdot 10^{-4}$ |
|-------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------|
| Поликор           | 9,6±0,2      | 1                                 | П-68                 | 9,5±1        | 1                                 |
| Сапфирит          | 9,5±0,2      | 1                                 | МА-12                | 12±1         | 1                                 |
| ГМ                | 9,5±0,2      | 1                                 | ТМ-15                | 15±1         | 1                                 |
| Сапфир            | 9,4...11,7   | 1                                 | СТ38-1               | 7,25±0,15    | 4                                 |
| А-995             | 9,7          | 1                                 | СТ50-1               | 8,0...9,0    | 35                                |
| КМ-1              | 7,0...7,5    | 16                                | ЦМ-4                 | 6,5±0,5      | 6                                 |
| 22ХС              | 9,3±0,3      | 15                                | С5-1                 | 3,82±0,1     | 1                                 |
| ВГ-IV             | 9,3          | 10                                | Окись бериллия       | 6,6          | 4                                 |
| ГБ-7              | 9,05         | 3                                 | Кремний высококомный | 11,7         | 150                               |
| Миналунд-7        | 9,05         | 3                                 | Арсенид галлия       | 13,3         | 16                                |
| УФ-61             | 9,05±0,01    | 8                                 |                      |              |                                   |

Т а б л и ц а П л 4

**Основные характеристики металлов**

| Металл      | Относительное удельное сопротивление $q$ (по отношению к меди) | $\rho$ , Ом·м·10 <sup>6</sup> (на постоянном токе при 20 °С) | $\sigma \cdot 10^7$ , См/м (удельная проводимость) |
|-------------|--|--|--|
| Серебро Ag  | 0,941  | 0,0162   | 6,6  |
| Медь Cu     | 1,0  | 0,0172   | 5,9  |
| Золото Au   | 1,41   | 0,0244   | 4,4  |
| Алюминий Al | 1,52   | 0,0262   | 3,81   |
| Бериллий Be | 2,38   | 0,041  | 2,43   |
| Вольфрам W  | 3,19   | 0,055  | 1,81   |
| Олово Sn    | 6,62   | 0,114  | 0,90   |
| Хром Cr     | 7,6  | 0,13   | 0,77   |

Т а б л и ц а П л 5

**Размеры подложки**

| $B$ [мм] | $L$ [мм] | $H$ [мм]                |
|----------|----------|-------------------------|
| 48       | 60       | 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 |
| 24       | 60       |                         |
| 30       | 48       |                         |
| 24       | 30       |                         |
| 15       | 24       |                         |
| 12       | 15       |                         |

### Расчет геометрических размеров МПЛ

Чтобы рассчитать длину и ширину четвертьволнового отрезка МПЛ, необходимо вызвать команду меню Windows TXLine. На экране монитора появится окно для расчета параметров линий. Выберем окно Microstrip и введем данные для расчета МПЛ.

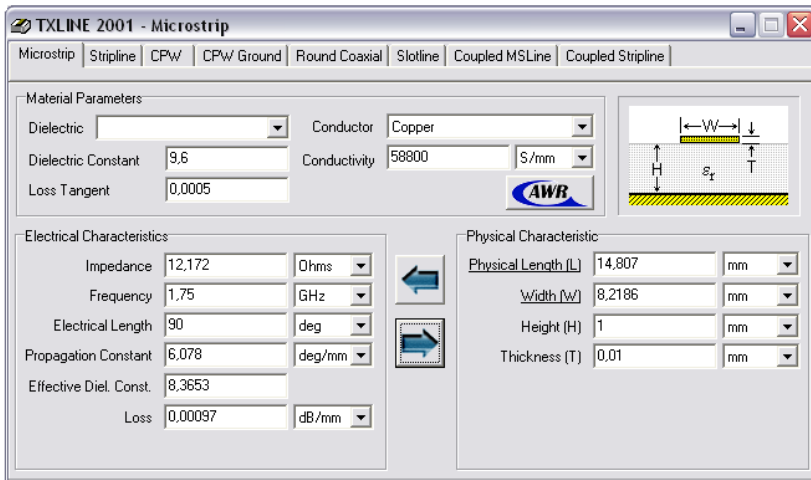


Рис. П.2.1. Рабочее окно TXLine

Параметры материалов (Materials Parameters): относительная диэлектрическая проницаемость (Dielectric Constant), 9,6; тангенс угла потерь (Loss Tangent), 0,0005; удельная проводимость (Conductivity), 58800 См/мм.

Электрические характеристики (Electrical Characteristics): волновое сопротивление МПЛ (Impedance), 12,172 Ом; электрическая длина МПЛ (Electrical Length), 90°; центральная частота полосы пропускания, 1,75 ГГц.

Физические характеристики (Physical Characteristics): толщина подложки (Height), 1 мм; толщина МПЛ (Thickness), 0,01 мм.

После введения данных нажимается кнопка «←→». В соответствующих окнах экрана, как это показано на рис. П2.1, появятся рассчитанные величины: длина  $L$ , 14,807 мм, и ширина  $W$  отрезка МПЛ, 8,2186 мм.

**Пример моделирования топологии широкополосного трансформатора сопротивлений на четвертьволновых отрезках линии передачи в пакете Microwave Office**

На предыдущем этапе был синтезирован широкополосный трансформатор сопротивлений на четвертьволновых отрезках линии передачи в электрическом элементном базисе в полосе рабочих частот  $f_{\text{н}} - f_{\text{в}} = 0.5 \dots 1.5$  ГГц, согласующий внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_{\text{Г}} = 45$  Ом с сопротивлением нагрузки  $R_{\text{Н}} = 9$  Ом с  $K_{\text{ст}U}$  – не хуже 1.2. Полученные значения волновых сопротивлений секций трансформатора с чебышевской характеристикой затухания приведены в табл. ПЗ.1.

Т а б л и ц а ПЗ.1

**Значения волновых сопротивлений секций трансформатора**

| Секция   | 1      | 2      | 3     | 4      |
|----------|--------|--------|-------|--------|
| $Z$ , Ом | 10.955 | 15.956 | 25.38 | 36.972 |

В качестве материалов выбраны: подложки – Alumina (окись алюминия с  $\epsilon_r = 9.8$  и  $\text{tg} \delta = 0.0005$ ), толщина подложки 1 мм, МПЛ – медь толщиной 0.01 мм. Центральная частота  $f_0 = 1$  ГГц.

С помощью ПО Microwave Office (Windows-TX Line...) получены длины и ширины МПЛ в соответствии с их электрическими параметрами, табл. ПЗ.2.

Т а б л и ц а ПЗ.2

**Геометрические параметры МПЛ секций трансформатора**

| Секция   | 1      | 2      | 3      | 4      |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| $W$ , мм | 9.1172 | 5.7634 | 3.0855 | 1.7118 |
| $L$ , мм | 25.705 | 26.38  | 27.384 | 28.323 |



После укладки МПЛ на подложку с минимизацией занимаемой площади и в соответствии с ОСТ 4 Г0.010.202 [4] геометрические размеры подложки составили 60×24×1 мм.

Моделирование топологии трансформатора сопротивлений проведено с использованием программного продукта Microwave Office.

На основе анализа рабочей характеристики широкополосного трансформатора сопротивлений  $K_{CTU}$  в заданной полосе частот было принято решение оптимизировать  $K_{CTU}$ , используя в качестве варьируемых параметров длины отрезков МПЛ. Оптимизированная структурная схема топологии широкополосного трансформатора сопротивлений приведена на рис. ПЗ.1.

Частотные характеристики трансформатора в заданной полосе рабочих частот после оптимизации приведены:  $K_{CTU}$  на рис. ПЗ.2,  $|S_{21}|$  на рис. ПЗ.3.

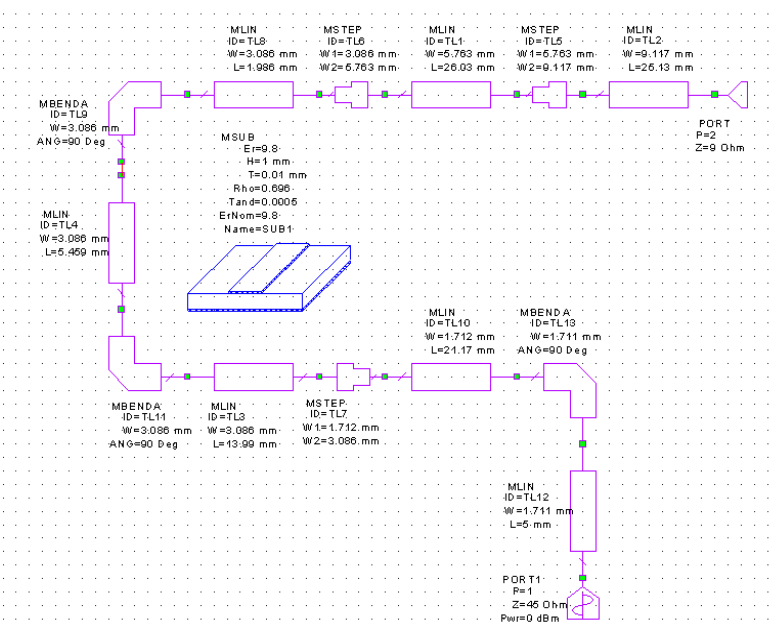


Рис. ПЗ.1. Структурная схема топологии трансформатора сопротивлений

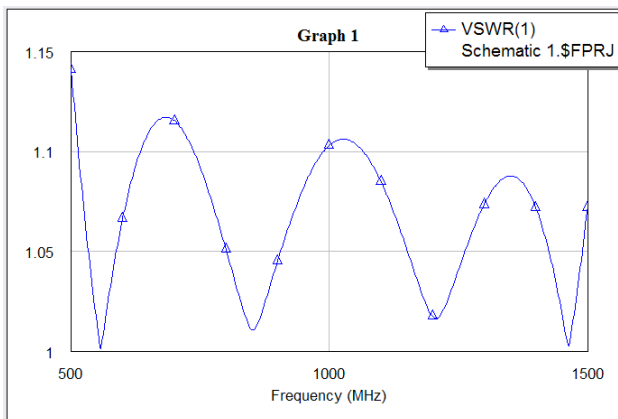


Рис. ПЗ.2. Частотная характеристика  $K_{\text{CTU}}$  трансформатора после оптимизации

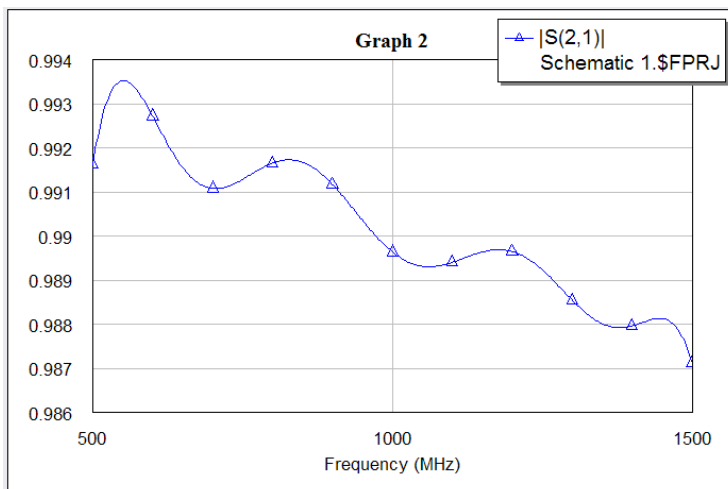
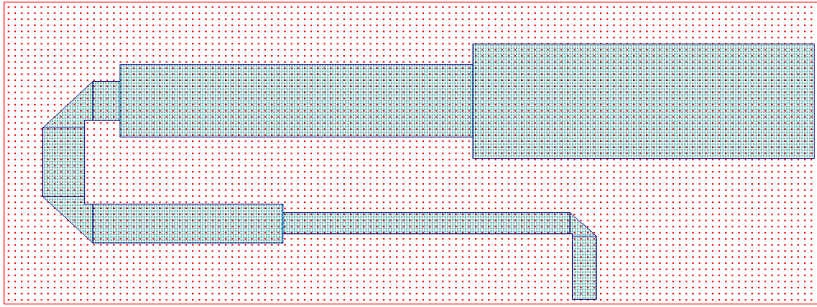


Рис. ПЗ.3. Частотная характеристика  $|S_{21}|$  трансформатора после оптимизации



*Рис. ПЗ.4.* Топология трансформатора сопротивлений

Полученная топология трансформатора сопротивлений на подложке размером  $60 \times 24 \times 1$  мм приведена на рис. ПЗ.4.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Задание.....  | 3  |
| Исходные данные.....  | 3  |
| Методические указания.....  | 4  |
| Синтез трансформатора сопротивлений в распределенном электрическом элементном базисе.....   | 4  |
| Моделирование трансформатора сопротивлений в распределенном электрическом элементном базисе.....  | 5  |
| Разработка топологии трансформатора сопротивлений в геометрическом элементном базисе .....  | 6  |
| Выбор подложки .....  | 6  |
| Выбор материала и определение геометрических параметров микрополосковых линий передачи.....   | 7  |
| Укладка микрополосковых линий на подложке.....  | 8  |
| Моделирование трансформатора сопротивлений в распределенном геометрическом элементном базисе .....  | 9  |
| Список литературы.....  | 10 |
| Приложение 1. Справочные материалы.....   | 11 |
| Приложение 2. Расчет геометрических размеров МПЛ .....  | 15 |
| Приложение 3. Пример моделирования топологии широкополосного трансформатора сопротивлений на четвертьволновых отрезках линии передачи в пакете Microwave Office ..... | 16 |

**№ 3937**

**621.37  
П 791**

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

**Методические указания**

**НОВОСИБИРСК  
2010**