

## РАСЧЕТ ТРЕУГОЛЬНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ШЛЕЙФОВ

Разработана модель и методика расчета характеристик треугольного шлейфа в микроисполнении, определена область ее применения. Приведены результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

Зачастую в СВЧ фильтрах низкой частоты (ФНЧ), смесителях, переключателях и других системах в качестве емкостных элементов и четвертьволновых отрезков линии, подключенных параллельно основной линии передачи энергии, используются низкоомные микрополосковые шлейфы с равномерной по длине шириной (рис. 1, а).

Однако область применения таких шлейфов ограничена рядом факторов. Так, на высших частотах сантиметрового диапазона ширина подключения шлейфа к основной линии составляет значительную часть длины рабочей волны и точка подключения становится неопределенной, что затрудняет качественные расчеты, например СВЧ ФНЧ, а в низкочастотной части дециметрового диапазона область применения ограничена слишком большой их длиной.

При комплексной миниатюризации РЗА рекомендуется использовать треугольные микрополосковые шлейфы (рис. 1, б) с переменным по длине волновым сопротивлением, в которых с достаточной для инженерных расчетов схем степенью точности определена точка подключения к основной линии, а полный импеданс в точке подключения может быть достаточно низким в широкой полосе СВЧ диапазона. Расчет такого шлейфа может быть произведен следующим образом.

---

290060, г. Львов, ул. Наукова, 7, Львовский научно-исследовательский радиотехнический институт, тел. 63-10-66

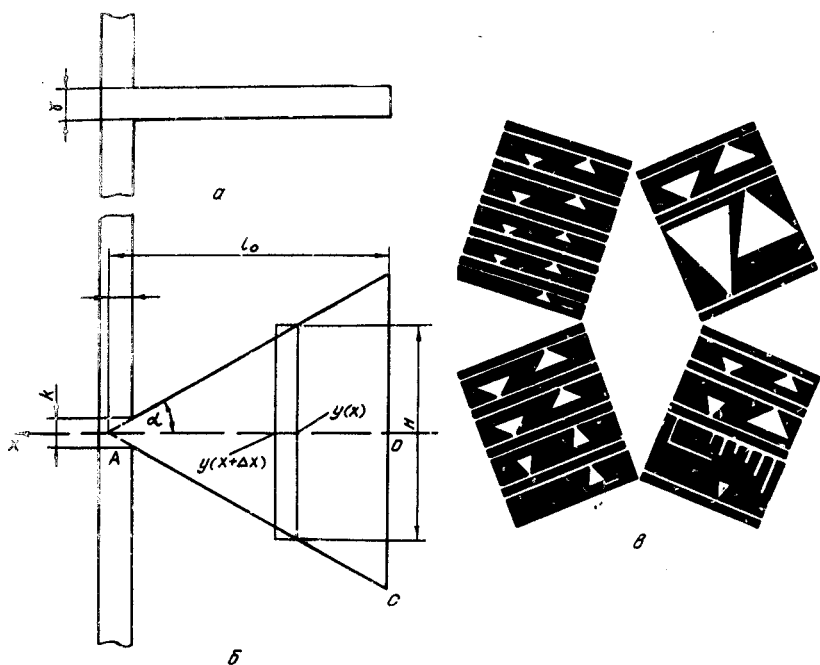


Рис. 1. Конструкции шлейфов: а - обычный, б - треугольный, в - практические образцы

Расположим в  $\triangle ABC$  ось  $Ox$ , как показано на рис. 1, б, и найдем зависимость проводимости шлейфа  $y(x)$  при  $x \in (0, l_0)$ .

Расчленим  $\triangle ABC$  линиями, перпендикулярными оси  $Ox$ , на полоски длиной  $\Delta x$ . При достаточно малой длине этих полосок допускаем волновое сопротивление на участке  $x, x+\Delta x$  постоянным и равным волновому сопротивлению в сечении  $\Delta x$ . В соответствии с [1], без учета омических потерь в шлейфе записываем

$$y(x+\Delta x) = \frac{1}{\rho(x)} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\rho(x)} + j \cdot y(x) \operatorname{tg} \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}}, \quad (1)$$

где  $y(x)$ ,  $y(x+\Delta x)$  - входная проводимость в сечении  $x$  и  $x+\Delta x$

$$\text{соответственно; } \rho(x) = \frac{100 \pi}{(1+N/d)\sqrt{\epsilon}} - \text{волновое сопротивление}$$

в сечении  $x$  [2];  $N = 2(l_0 - x) \operatorname{tg} \alpha$  - ширина шлейфа в сечении  $x$ ;  $d$  - толщина подложки;  $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon}$  - длина волны в диэлектрике;  $\lambda_0$  - длина волны в свободном пространстве;  $\sqrt{\epsilon}$  - коэффициент укорочения длины волны в диэлектрике;  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Находим приращение функции  $y(x)$  при изменении аргумента на  $\Delta x$

$$y(x+\Delta x) - y(x) = j \frac{1}{\rho(x)} \operatorname{tg} \frac{2\pi \Delta x}{\lambda} \cdot \frac{\frac{1}{\rho(x)} - y(x)}{\frac{1}{\rho(x)} + jy(x) \operatorname{tg} \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}} \quad (2)$$

Разделив равенство (2) на  $\Delta x$  и вычислив пределы соответственно правой и левой части равенства при  $\Delta x \rightarrow 0$ , получаем общее уравнение Риккати вида

$$y'(x) = j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{\rho(x)} \cdot [1 - \rho^2(x) y^2(x)]. \quad (3)$$

$$\text{Преобразованием } y(x) = \frac{\lambda}{2\pi j \rho(x)} \cdot \frac{U'(x)}{U(x)} \quad (4)$$

приводим уравнение (3) к виду:

$$-j \frac{2\pi}{\lambda} \rho(x) U''(x) + j \frac{2\pi}{\lambda} \rho'(x) U'(x) - \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \rho^2(x) U(x) - j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{\rho(x)} U(x) = 0.$$

$$\text{Учитывая зависимость } \rho'(x) = \rho(x) \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{d + 2(1_0 - x) \operatorname{tg} \alpha}$$

получаем уравнение

$$U'' - \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{d + 2(1_0 - x) \operatorname{tg} \alpha} U' + \frac{4 \pi^2}{\lambda^2} U = 0. \quad (5)$$

Преобразованием [3]

$$t = \left( \frac{d + 2l_0 \operatorname{tg} \alpha}{2 \operatorname{tg} \alpha} - x \right) \frac{2 \pi}{\lambda} \quad (6)$$

приводим уравнение (5) к уравнению Бесселя

$$t U'' + t U' + t U = 0. \quad (7)$$

Решением уравнения (7) является функция

$$U(t) = J_0(t) + C * N_0(t). \quad (8)$$

Проведя цепь обратных преобразований (6), (4) [3] получаем решение исходного уравнения (3)

$$y(x) = \frac{1}{\rho(x)} \frac{J_1 \left[ \frac{2 \pi}{\lambda} (a-x) \right] + C N_1 \left[ \frac{2 \pi}{\lambda} (a-x) \right]}{J_0 \left[ \frac{2 \pi}{\lambda} (a-x) \right] + C N_0 \left[ \frac{2 \pi}{\lambda} (a-x) \right]}, \quad (9)$$

где  $a = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \alpha} + l_0$ ;  $J_0, J_1$  - функции Бесселя;  $N_0, N_1$  - функции Неймана.

Постоянную  $C$  находим из условия  $y(0) = 0$ , откуда

$$C = -J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda} a\right) / N_1\left(\frac{2\pi}{\lambda} a\right). \quad (10)$$

При расчете в качестве исходных параметров использовались величина полуугла раскрыва  $\alpha$  и ширина подключения  $K$  треугольного шлейфа. Учитывая, что  $r = K/2\text{tg } \alpha$  и  $l_0 = r+x$ , можно записать

$$a = \frac{d+K}{2\text{tg } \alpha} + x. \quad (11)$$

Зависимости (9), (10) и (11) были программно реализованы на языке FORTRAN IV, что позволило вычислить ряд характеристик микростриповых треугольных шлейфов, выполненных на керамике "поликор" толщиной 1 мм, и провести их анализ.

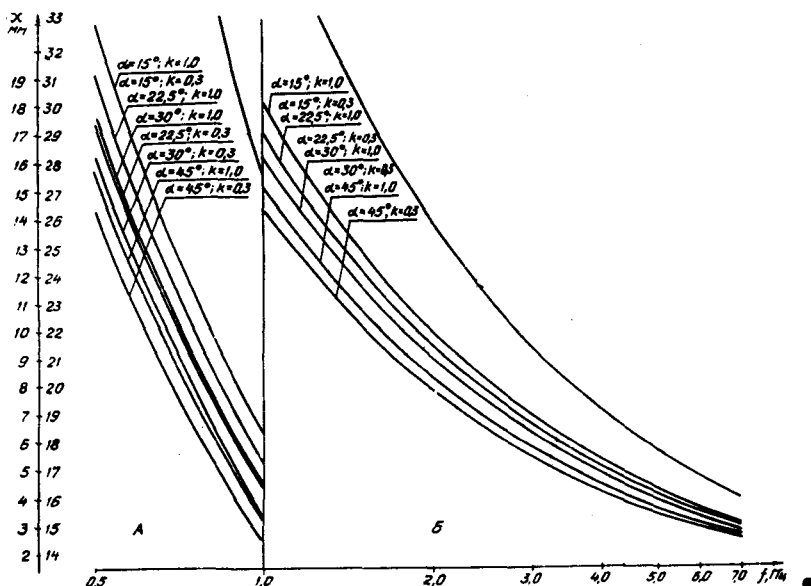


Рис. 2. Расчетные длины треугольных шлейфов

На рис. 2 представлены значения длин волн треугольного шлейфа  $x$  в зависимости от частоты, при которых входной импеданс его равен первому нулю. Полууглы раскрыва  $\alpha$  равны 45, 30, 22, 5, 15° и ширины подключения  $K$  - 1, 0 и 0, 3 мм. Аналогичные кривые при ширине подключения  $K$ , равной 0, 7 и 0, 5 мм, расположены примерно пропорционально между граничными значениями  $K$ , равными 0, 3 и 1, 0 мм, при тех же значениях  $\alpha$  (на рис. 2 не приведены). Численные значения  $x$  для областей А и Б приведены с правой и левой стороны ординаты соответственно. Некоторые кривые ввиду близких значений параметров на рис. 2 совпали.

Для сравнения приведена также кривая I, I' зависимости от частоты длин четвертьволнового холостого на конце шлейфа с постоянным по длине волновым сопротивлением (далее по тексту - обычный шлейф), равным 50 Ом, который представлен на рис. 1, а. Из графиков видно, что в низкочастотной части дециметрового диапазона волн длина четвертьволнового треугольного шлейфа по сравнению с обычным короче примерно в два раза.

В зависимости от указанных выше значений параметра  $K$  длина  $x$  треугольного шлейфа, при котором входной импеданс равен нулю, может изменяться в довольно ощутимых для практического применения пределах 5 - 10% (рис. 2), что необходимо учитывать при расчете схем.

Практически было изготовлено ряд треугольных шлейфов на разные частоты (рис. 1, в). Результаты практических исследований подтвердили правильность методики расчета.

При этом усредненный коэффициент укорочения длины  $\sqrt{\epsilon}$  (по аналогии с  $\sqrt{\epsilon_{эфф}}[2]$ ) в микрополосковом треугольном шлейфе с учетом краевых эффектов и других факторов при определении длины волны в диэлектрике в зависимости от частоты принимался равным обобщенным усредненным расчетным значениям, приведенным на рис. 3.

Следует отметить, что совпадение экспериментальных и расчетных данных длин четвертьволнового треугольного шлейфа в дециметровом диапазоне длин волн вполне допустимое для практических расчетов, а в сантиметровом диапазоне частот несколько хуже и погрешность составляет 2-3%, что объясняется дисперсией диэлектрической проницаемости и технологическими допусками.

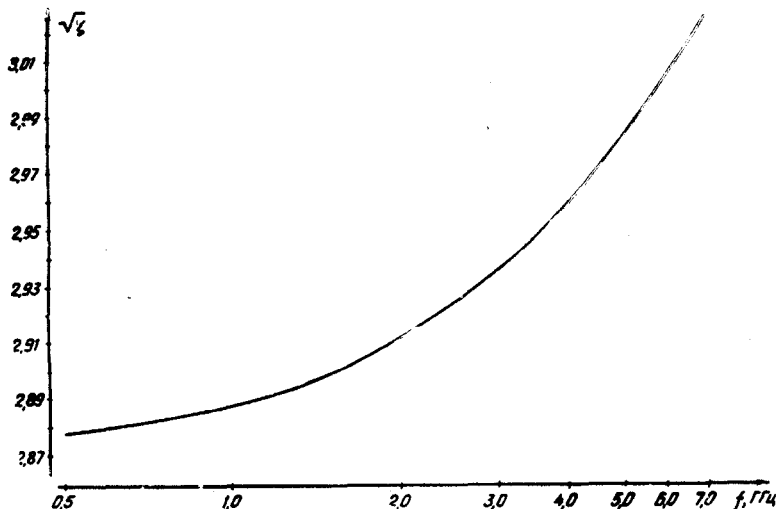


Рис. 3. Усредненный коэффициент укорочения длины волны треугольного шлейфа

По результатам расчета (9), (10), (11) на ЭВМ и экспериментальным данным, используя приближенные методы решения [4, 5], для инженерных расчетов длины микрополоскового треугольного шлейфа в отношении  $x/\lambda$  при первом нулевом значении его входного импеданса и для вышеприведенных значений параметров  $\alpha$ ,  $K$ ,  $f$ ,  $a$  также толщины подложки составлено следующее выражение:

$$\frac{x}{\lambda} = (5,0177 \cdot 10^{-2} + 4,8914 \cdot 10^{-3} K^2) \cdot \alpha^{0,796} \cdot f^{0,1613} \cdot a^{0,1357}, \quad (12)$$

где  $K$  - в мм;  $\alpha$  - в радианах;  $f$  - в МГц.

Погрешность определения относительной длины  $x/\lambda$  по формуле (12), по сравнению с вычислениями на ЭВМ, не превышает

- для  $\alpha = 0,785398$  P ( $45^\circ$ ) - 1%,
- $\alpha = 0,523599$  P ( $30^\circ$ ) - 1,5%,
- $\alpha = 0,392699$  P ( $22,5^\circ$ ) - 1,2%,
- $\alpha = 0,261799$  P ( $15^\circ$ ) - 2,5%.

Анализ формулы (9) показывает, что первый максимум и второй минимум входного импеданса треугольного шлейфа значительно отодвинуты в сторону высших частот, существенно зависят от величины полуугла раскрыва  $\alpha$ , почти не зависят от указанных выше значений параметров  $K$  и находятся в пределах  $4 - 5 f_0$  ( $f_0$  - частота, соответствующая первому минимуму входного импеданса шлейфа) для низкочастотной части дециметрового диапазона частот, а с повышением частоты - в пределах  $2,5 - 4 f_0$ . Это несомненные практические преимущества треугольного шлейфа при построении схем с отдаленными паразитными полосами по сравнению с обычным шлейфом, первый максимум входного импеданса которого находится на частоте  $2 f_0$ , а второй минимум -  $3 f_0$ .

На рис. 4 показаны приведенные к  $f_0$  расчетные зависимости первых максимумов  $f_{max}/f_0$  и вторых минимумов  $f_{min2}/f_0$  входного импеданса треугольного шлейфа в зависимости от частоты  $f_0$  при различных значениях параметра  $\alpha$  и  $K = 0,3$ . По мере возрастания параметра  $K \rightarrow 1,0$  мм характеристики смещаются ниже на 10% от своего значения при  $K = 0,3$  мм.

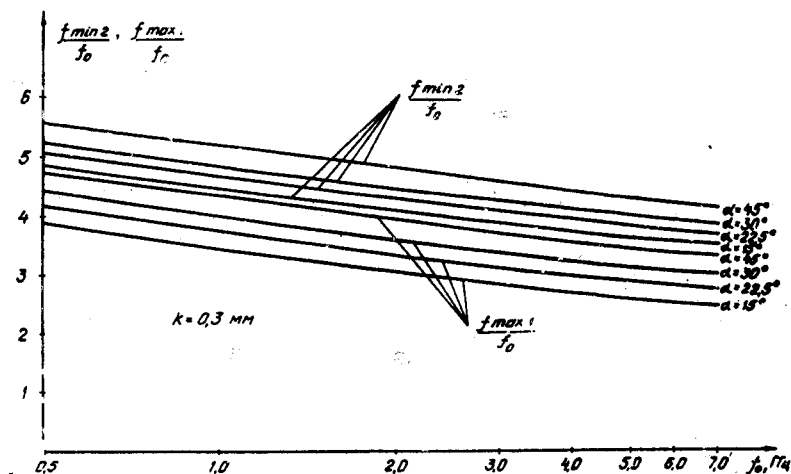


Рис. 4. Расчетные значения паразитных полос треугольного шлейфа



Практические исследования четвертьволновых треугольных шлейфов в дециметровом диапазоне длин волн показали хорошие совпадения параметров  $f_{max}/f_0$  и  $f_{min}/f_0$  с расчетными данными, в сантиметровом же диапазоне частот отклонения составляют 20 - 30%, что объясняется возникновением других типов волн в подложке толщиной 1 мм на частотах свыше 7 - 10 ГГц. Следовательно, в целях уменьшения указанных выше отклонений толщину подложки на высоких частотах необходимо уменьшать.

Результаты анализа зависимости входного импеданса треугольного шлейфа вблизи его первого нулевого значения от изменения частоты относительно  $f_0$ , равной 3,0 ГГц (рис. 5), показали, что ширина полосы режекции его значительно больше, чем обычного шлейфа (пунктирная линия). Это особенно важно при использовании треугольных шлейфов в качестве "заземляющих" элементов в широкополосных СВЧ узлах.

В подтверждение результатов анализа на рис. 6 приведена экспериментальная зависимость затухания одиночного режекторного треугольного (1-1) и обычного (2-2) шлейфов на частоте  $f_0 = 3,0$  ГГц, включенных параллельно в микрополосковую линию с волновым сопротивлением, равным 50 Ом. Как видно из рис. 6, полоса режекции треугольного шлейфа по сравнению с обычным по уровню 20 дБ более, чем в 3 раза шире и зависит от параметров  $K$  и  $\alpha$ .

Благодаря малым размерам и дальнему расположению первого максимума и второго минимума входного импеданса треугольного шлейфа, он может широко применяться в качестве емкостных элементов СВЧ схем, в частности в ФНЧ.

В связи с тем, что существуют производственные допуски при изготовлении шлейфов, представляет интерес определение изменения величины емкостного сопротивления шлейфа на единицу допуска.

С этой целью проведен анализ изменения крутизны входного импеданса треугольных шлейфов в диапазоне частот 500-7000 МГц при указанных значениях  $\alpha$  и  $K$ .

Крутизна определялась при значении входного импеданса 50 Ом, так как для практических целей в подавляющем большинстве случаев расчетная величина модуля сопротивления емкостных элементов составляет менее 50 Ом и, в соответствии с (9), крутизна в этом случае будет меньше вычисленного значения.

Результаты анализа показали, что при указанных выше

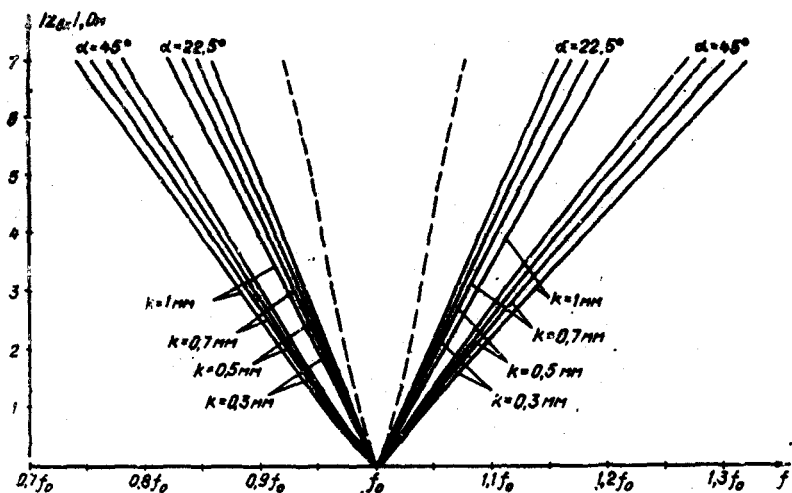


Рис. 5. Расчетные значения ширины первой полосы режекции треугольного шлейфа

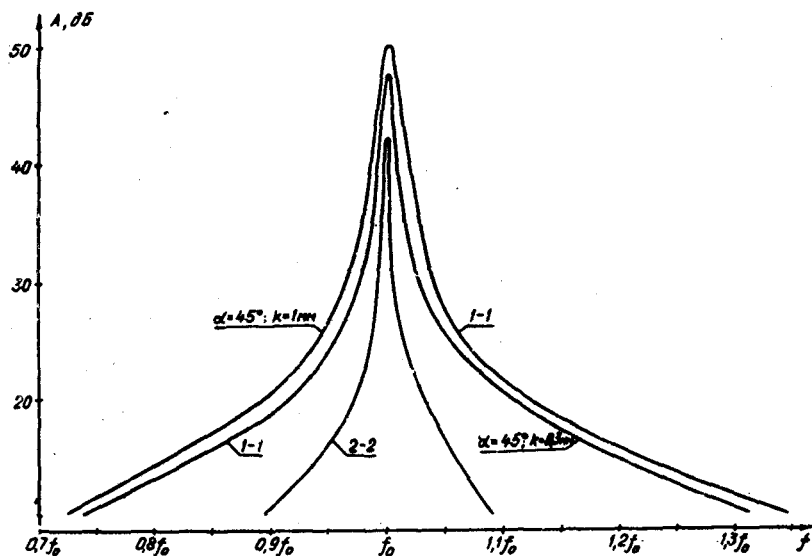


Рис. 6. Экспериментальные значения ширины полосы режекции треугольного 1-1 и обычного 2-2 шлейфов

значениях параметров  $\alpha$  и  $K$  максимальное значение входного импеданса шлейфа на частоте 3000 МГц не превышает 1 Ом на 20 мкм его длины, что является вполне допустимым при проектировании СВЧ схем с емкостными элементами в современных технологических условиях.

К преимуществам треугольного шлейфа следует также отнести и простоту реализации его фотооригинала по сравнению со шлейфами другой конфигурации, где требуется определенная кривизна линий.

Таким образом, в настоящее время нет альтернативной схемы треугольному шлейфу по совокупности преимуществ в части широкополосности, малогабаритности, дальнему расположению паразитных полос и простоте реализации его конструкции.

#### Список литературы

1. Лэнди Р., Девис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
2. Конструирование и расчет полосковых устройств. /Под ред. И. С. Ковалева. /-М.: Сов. радио, 1974.
3. Камке Э. Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. - М.: Наука, 1977.
4. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. - М.: Наука, 1977.
5. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1973.