

Ю. Н. ПОЛУХИН

УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПОЛЯ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В КРЕСТООБРАЗНОМ СОЧЛЕНЕНИИ ДВУХСВЯЗНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

В последние годы широкое распространение получили ферритовые СВЧ-устройства (вентили, фильтры и др.), основанные на использовании эффекта резонансного поглощения электромагнитной энергии ферритовым образцом. Как известно, этот эффект достигает наибольшей интенсивности в случае, когда воздействующее на феррит СВЧ магнитное поле имеет круговую поляризацию. Основной волной в двухсвязных линиях передачи электромагнитной энергии является волна ТЕМ, имеющая линейно поляризованное поле. Для создания в двухсвязной системе поля круговой поляризации необходимо возбудить дополнительное поле, сдвинутое во времени и в пространстве на $\frac{\pi}{2}$ относительно исходного поля однородной линии. Это можно осуществить подключением перпендикулярно основной линии реактивного шлейфа. Однако конструкция с одним шлейфом не обеспечивает удовлетворительного согласования тракта, поэтому применение получили только двухшлейфные устройства [1—4] с крестообразным сочленением линий. Тем не менее при разработке и анализе таких устройств (см. например, [3, 4]) в качестве исходного необоснованно использовалось условие равенства модулей входных проводимостей шлейфов и волновой проводимости основной линии, являющееся условием существования поля круговой поляризации только в конструкции с одним шлейфом и непригодное для двухшлейфных устройств.

Условие существования поля круговой поляризации в крестообразном сочленении линий (рис. 1, а) вытекает из рассмотрения его эквивалентной схемы. Неоднородность, вносимая в тракт таким сочленением, обусловлена реакцией входных сопротивлений шлейфов и изменением поперечных размеров линии в области сочленения, вызывающим возбуждение колебаний высших

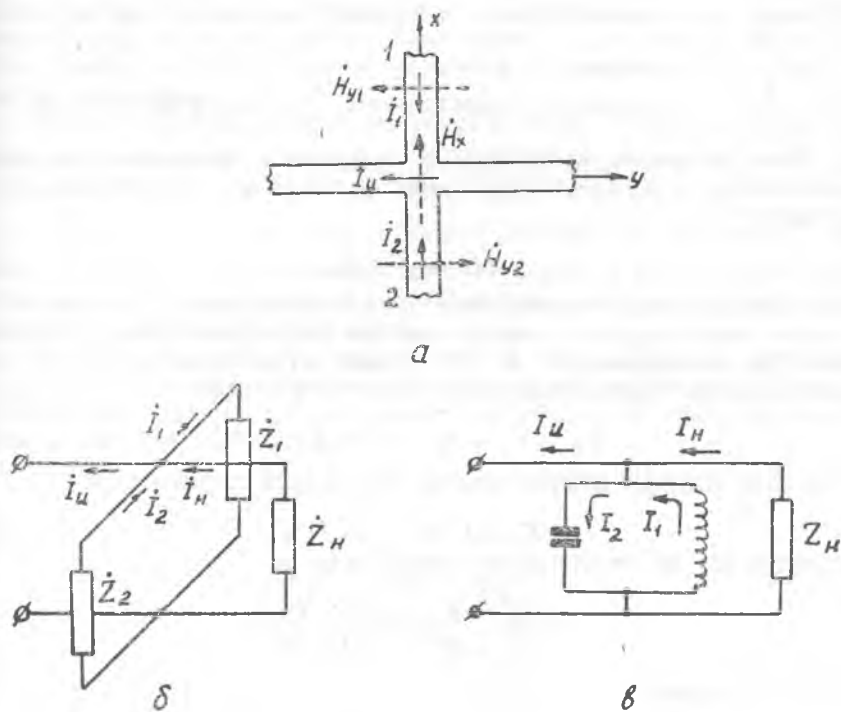


Рис. 1. Схематическая конструкция сочленения (а) и его эквивалентные схемы (б, в).

типов. Как показывают численные оценки, выполненные с использованием результатов [5], влияние последнего фактора ослабевает с уменьшением частоты и в дециметровом диапазоне волн может не учитываться. В этом случае эквивалентную схему сочленения можно представить в виде параллельного соединения входных сопротивлений шлейфов \dot{Z}_1 и \dot{Z}_2 и сопротивления нагрузки \dot{Z}_H , пересчитанного к сочленению (рис. 1, б). Указанные на рис. 1, а поля \dot{H}_{y1} и \dot{H}_{y2} создаются токами шлейфов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , а поле \dot{H}_x — током источника $\dot{I}_u = \dot{I}_H + \dot{I}_1 + \dot{I}_2$. Комплексные амплитуды составляющих поля запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_x &= k\dot{I}_H = k(\dot{I}_H + \dot{I}_1 + \dot{I}_2) = kU(\dot{Y}_H + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2); \\ \dot{H}_y &= \dot{H}_{y2} - \dot{H}_{y1} = k(\dot{I}_2 - \dot{I}_1) = kU(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где k — коэффициент, зависящий от конструкции линии и координат точки, в которой определяется поле;
 U — разность потенциалов между проводниками линии;

$\dot{Y}_n = \frac{1}{Z}$ — проводимость нагрузки, пересчитанная к сочленению;

$\dot{Y}_i = \frac{1}{Z_i}$ — входная проводимость i -го шлейфа ($i=1,2$).

Как известно, комплексные амплитуды составляющих поля, имеющего круговую поляризацию в плоскости xy , связаны соотношением

$$\dot{H}_y = \mp j \dot{H}_x, \quad (2)$$

где верхний знак соответствует поляризации правого, а нижний — левого относительно положительного направления оси z вращения. На основании (1) и (2) условие существования в сочленении поля круговой поляризации запишется в виде

$$\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1 = \mp j (\dot{Y}_n + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2). \quad (3)$$

Так как шлейфы имеют реактивные входные проводимости

$$\dot{Y}_i = j \Gamma m \dot{Y}_i = j Y_i,$$

условие (3) сводится к двум равенствам:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 - Y_2 &= \pm \operatorname{Re} \dot{Y}_n, \\ Y_1 + Y_2 &= -\operatorname{Im} \dot{Y}_n, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

откуда следует:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= \pm \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{Y}_n \cdot (1 \mp \operatorname{tg} \varphi_n), \\ Y_2 &= \mp \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{Y}_n \cdot (1 \pm \operatorname{tg} \varphi_n), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\varphi_n = \operatorname{Ar} \dot{Y}_n$. В случае согласованной нагрузки условия (4) и (5) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} y_1 - y_2 &= \pm 1, \\ y_1 + y_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

$$y_1 = -y_2 = \pm \frac{1}{2}, \quad (5a)$$

где $y_i = \frac{Y_i}{Y_0}$ — входная проводимость i -го шлейфа, нормированная к волновой проводимости основной линии;

Y_0 — волновая проводимость основной линии.

Согласно (5a) условие существования в двухшлейфном сочленении поля круговой поляризации обеспечивается при равенстве реактивных входных проводимостей шлейфов половине волновой проводимости основной линии, взятой со знаком «+» для одного шлейфа и знаком «-» — для другого. Второе из условий (4a) при $\dot{Y}_n = Y_0$ является условием согласования сочленения. Следовательно, условие согласования автоматически обеспечивается при

выполнении условия существования в сочленении поля круговой поляризации. В то же время согласование сочленения является необходимым, но недостаточным условием для создания поля круговой поляризации.

При выполнении второго из условий (4а), т. е. условия согласования, токи I_1 и I_2 равны по модулю и противофазны, так что представляют собой как бы один ток, замыкающийся в цепи $Z_1 - Z_2$ (рис. 1, в). В случае, если это условие не выполняется, модули токов I_1 и I_2 отличаются друг от друга, и их разность представляет собой реактивный ток источника, возбуждающий в основной линии отраженную волну.

Рассмотрим условие существования поля круговой поляризации в конкретном конструктивном варианте сочленения. Возьмем сочленение с двумя разомкнутыми шлейфами. В этом случае условие (5а) запишется в виде

$$\frac{Y_{01}}{Y_0} \operatorname{tg} \gamma l_1 = -\frac{Y_{02}}{Y_0} \operatorname{tg} \gamma l_2 = \frac{1}{2}$$

или

$$\begin{aligned} \gamma l_1 &= \frac{2\pi}{v} f l_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{Z_{01}}{2Z_0} \right), \\ \gamma l_2 &= \frac{2\pi}{v} f l_2 = \operatorname{arctg} \left(-\frac{Z_{02}}{2Z_0} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $Y_{0i} = \frac{1}{Z_{0i}}$ — волновая проводимость i -го шлейфа;
 Z_{0i} — его волновое сопротивление;
 l_i — длина i -го шлейфа;
 $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{v} f$ — постоянная распространения;
 v и λ — фазовая скорость и длина волны в линии;
 f — рабочая частота.

В частном случае, когда $Z_{01} = Z_{02} = 2Z_0$, круговая поляризация поля на частоте $f = \frac{v}{\lambda}$ имеет место при длинах шлейфов:

$$l_1 = \frac{\lambda}{8}, 5 \frac{\lambda}{8}, \dots, (4m + 1) \frac{\lambda}{8}, (m = 0, 1, 2, \dots),$$

$$l_2 = 3 \frac{\lambda}{8}, 7 \frac{\lambda}{8}, \dots, (4n + 3) \frac{\lambda}{8}, (n = 0, 1, 2, \dots).$$

Минимальные длины шлейфов при $Z_{01} = Z_{02} = 2Z_0$ связаны соотношением

$$l_2 = 3l_1 = \frac{3}{8} \lambda.$$

На рис. 2 представлены частотные зависимости входных проводимостей разомкнутых шлейфов при $l_2 = 3l_1 = \text{const}$ и вариации Z_{0i}/Z_0 , определяемые выражениями:

$$y_1 = \frac{Y_{01}}{Y_{01}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} \frac{f}{f_l} \right),$$

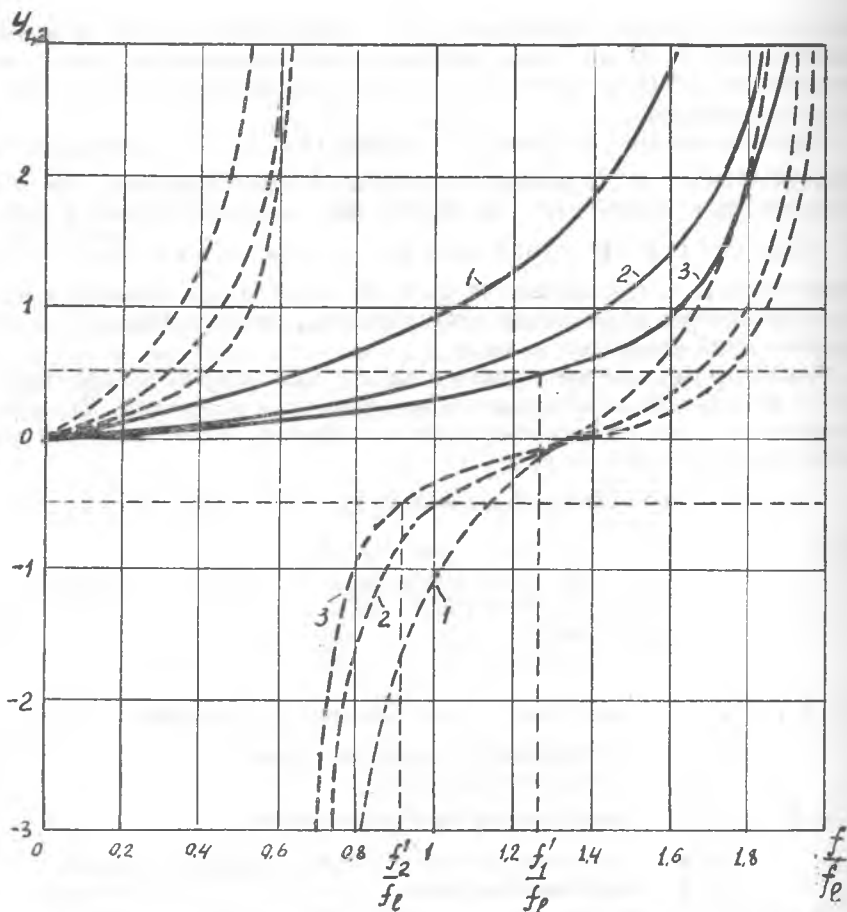


Рис. 2. Частотные зависимости входных проводимостей разомкнутых шлейфов при $l_2 = 3l_1 = \text{const}$:

1 — $Z_{01}/Z_0=1$, 2 — $Z_{01}/Z_0=2$, 3 — $Z_{01}/Z_0=3$.

$$y_2 = \frac{Y_{02}}{Y_0} \operatorname{tg} \left(\frac{3}{4} \pi \frac{f}{f_1} \right),$$

где

$$f_1 = \frac{v}{8l_1} = \frac{3}{8} \frac{v}{l_2}.$$

При отклонении Z_{01}/Z_0 от 2 и неизменных длин шлейфов частоты, удовлетворяющие соответственно первому и второму из равенств (6), определяются выражениями:

$$f_1 = f_l \frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{Z_{01}}{2Z_0} \right),$$

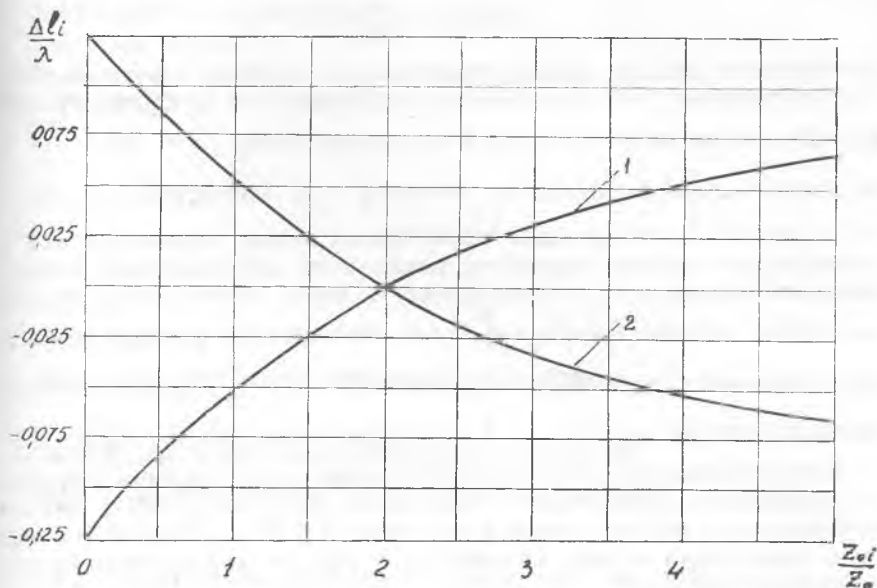


Рис. 3. Зависимости требуемых изменений длин разомкнутых шлейфов от $Z_{01}|Z_0$: 1 — $\frac{\Delta l_1}{\lambda}$, 2 — $\frac{\Delta l_2}{\lambda}$.

$$f_2 = f_1 \frac{4}{3\pi} \operatorname{arctg} \left(-\frac{Z_{02}}{2Z_0} \right).$$

Поле имеет круговую поляризацию только на частоте

$$f_k = f_1 = f_2$$

и, следовательно, только в случае выполнения последнего равенства. Это возможно не при любых отклонениях Z_{01}/Z_0 от 2, а только при волновых сопротивлениях, удовлетворяющих соотношению

$$3 \operatorname{arctg} \left(\frac{Z_{01}}{2Z_0} \right) = \operatorname{arctg} \left(-\frac{Z_{02}}{2Z_0} \right). \quad (7)$$

Так, при $Z_{01}=Z_{02}=3Z_0$ соотношение (7) не выполняется ($f_1=1,25f_2$, $f_2=0,92f_1$) и, следовательно, поле не имеет круговой поляризации ни на одной частоте. В случае $Z_{01}=3Z_0$ круговая поляризация поля возможна только при $Z_{02}=0,39Z_0$, а в случае $Z_{02}=3Z_0$ — при $Z_{01}=1,75Z_0$.

Для того, чтобы при отклонении Z_{01}/Z_0 от 2 поле сохраняло круговую поляризацию на заданной частоте $f = \frac{v}{\lambda}$, необходимо взять другую длину соответствующего шлейфа $l'_1 = l_1 + \Delta l_1$. Требуемые изменения длин шлейфов определяются выражениями:

$$\frac{\Delta l_1}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{Z_{01}}{2Z_0} \right) - \frac{\pi}{4} \right],$$

$$\frac{\Delta l_2}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(-\frac{Z_{02}}{2Z_0} \right) + \frac{\pi}{4} \right].$$

Зависимости $\Delta l_1/\lambda$ от Z_{01}/Z_0 представлены графически на рис. 3.

При выборе длин разомкнутых шлейфов по привычному для разработчиков подобных устройств соотношению $l_2 = 3l_1 = \frac{3}{8} \lambda$ круговая поляризация поля на частоте $f = \frac{v}{\lambda}$ обеспечивается только в случае $Z_{01} = Z_{02} = 2Z_0$. Аналогичный вывод можно сделать и относительно других вариантов сочленения, используемых в ферритовых устройствах: в сочленении с двумя короткозамкнутыми шлейфами длиной $l_1 = 3l_2 = \frac{3}{8} \lambda$ и в сочленении с разомкнутым и короткозамкнутым шлейфами длиной $l_1 = l_2 = \frac{\lambda}{8}$ круговая поляризация поля на частоте $f = \frac{v}{\lambda}$ возможна только при $Z_{01} = Z_{02} = 2Z_0$.

Следует отметить, что установка ферритового образца вызывает перераспределение поля в сочленении. Однако в случае малого эффективного объема образца его реакцией на распределение поля в сочленении можно пренебречь и считать справедливыми изложенные выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lewin L. A resonance absorption isolator in microstrip for 4 G/S, «Proc. IEE», vol 104, Part. B, Supplement, n. 6, pp. 364—365, 1957.
2. Лебедь Б. М., Коптева Л. О., Крамущенко Э. Д. Малогабаритный коаксиальный резонансный вентиль дециметрового диапазона. «ВРЭ», серия III, вып. 1, стр. 140, 1961.
3. Ершов И. В. К вопросу о широкополосности одного типа вентиля дециметрового диапазона. «ВРЭ», серия V, вып. 1, стр. 94, 1965.
4. Иошпе Д. М. Принцип уменьшения габаритов ферритового вентиля со шлейфами. Ученые записки КГПИ им. В. В. Куйбышева, вып. 67, Куйбышев, 1969.
5. Печатные схемы сантиметрового диапазона. Сб. под ред. В. И. Сушкевича, ИЛ, 1956.