

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАССОГЛАСОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ

Н. К. Гордиенко, В. Д. Кукуш

Харьков

Применение направленных ответвителей для контроля мощности в рассогласованных трактах позволяет одновременно измерить проходящую мощность с помощью измерителей поглощающего типа; мощность, отдаваемую генератором при работе его на несогласованную нагрузку (падающую мощность), и коэффициент отражения.

Результурующая величина во всех этих задачах функционально связана с показанием индикатора, включенного во вторичную цепь направленного ответвителя, и коэффициентами связи боковых плеч вторичного тракта с первичным.

В том случае, когда ответвитель является неидеальным, а нагрузки, подключенные к его боковым плечам, несогласованными, коэффициенты связи становятся зависимыми от направленности и комплексных коэффициентов отражения боковых плеч, а следовательно, в общем случае отличаются от значений, полученных при калибровке. Возникающая при этом систематическая погрешность рассогласования в реальных условиях может достигать значительной величины.

В литературе частично рассматривался вопрос определения погрешности рассогласования при измерении падающей мощности [1] и коэффициента отражения [2]. Однако решение его нельзя считать полным, так как рассмотрение проведено только для одного вида ответвителя: однонаправленного в первом случае и двунаправленного во втором.

Строгое теоретическое выражение получено для погрешности рассогласования, имеющей место при измерении падающей мощности; оно представлено в виде, неудобном для интерпретации.

В работе [3] вопрос о погрешности измерения проходящей мощности решен численно для одного типа двунаправленного ответвителя.

В настоящей работе выражение для погрешности рассогласования выводится в общем виде по всем трем видам измерений, использующим направленный ответвитель (измерение коэффициента отражения, падающей и проходящей мощности).

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ В ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ НАПРАВЛЕНИЯХ НЕИДЕАЛЬНОГО РАССОГЛАСОВАННОГО ДВУНАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ

В соответствии с принятым определением относительное значение систематической погрешности, обусловленной неидеальной направленностью и рассогласованием боковых плеч ответвителя:

$$\delta_p = \frac{\Delta K}{K_{ид}} = \frac{K_{изм} - K_{ид}}{K_{ид}}, \quad (1)$$

где $K_{изм}$ — значение искомого параметра для ответвителя с неидеальной направленностью и рассогласованными боковыми плечами;

$K_{ид}$ — значение искомого параметра для идеального согласованного ответвителя.

Входящие в уравнение (1) составляющие $K_{изм}$ и $K_{ид}$ могут быть определены через коэффициенты передачи ответвителя в прямом и обратном направлениях.

Анализ работы сложных устройств и систем СВЧ, к которым относится и направленный ответвитель, в настоящее время производится специальными методами, основные из которых — матричный и метод ориентированных графов [1,4].

Топологический метод ориентированных графов тесно связан с матричным, используется при решении тех же задач, однако является более наглядным и позволяет представить результат в виде, удобном для анализа и численных расчетов с помощью вычислительной машины.

На рис. 1 схематично представлены основные типы двунаправленных ответвителей с подключенными к боковым плечам рассогласованными нагрузками и их ориентированные графы.

Согласно этому рисунку, связь между первичным и вторичным трактами ответвителя характеризуется комплексными коэффициентами передачи в прямом ($\dot{T}_{13} = \dot{T}_{24}$) и обратном ($\dot{T}_{14} = \dot{T}_{23}$) направлениях.

Выражения для них определим, пользуясь правилом некасающегося контура [1]:

$$\dot{T}_{ba} = \frac{\sum_{\mu} \left\{ \dot{P}_{\mu} \left[1 \nabla \sum_{v,r} (-1)^n \sum L_{v,r}^{(n)} \right] \right\}}{1 \nabla \sum_a \left[(-1)^n \sum_v L_v^{(n)} \right]}. \quad (2)$$

Здесь \dot{T}_{ba} — комплексный коэффициент передачи между плечами a и b ;

\dot{P}_μ — передача μ -го пути;

$\dot{L}_\nu^{(n)}$ — передача ν -го контура n -го порядка.

В знаменателе выражения (2) суммирование производится по всем контурам, в числителе — по контурам, не касающимся пути,

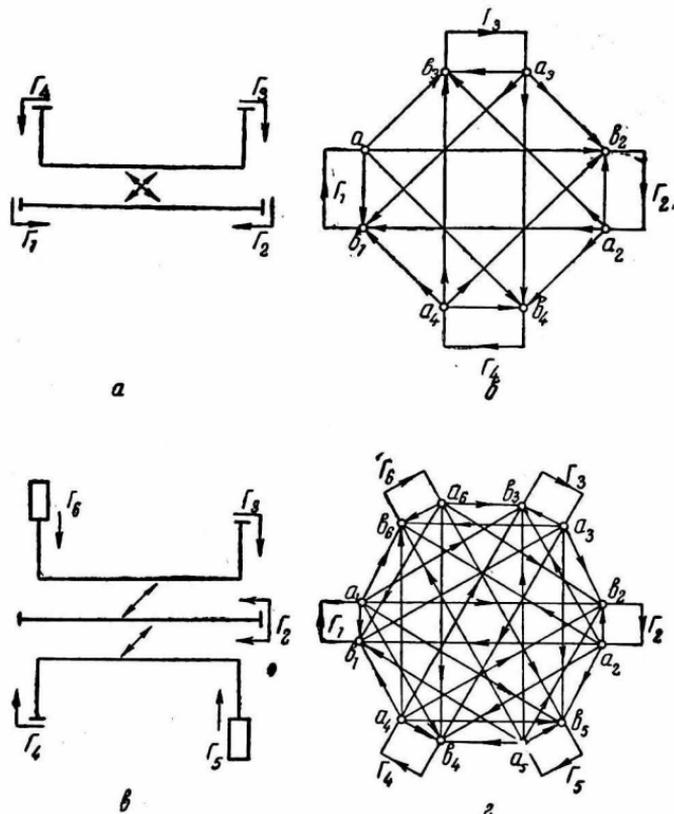


Рис. 1. Схематическое изображение двунаправленных ответвителей (а, в) и их ориентированных графов (б, г).

передача которого стоит перед квадратной скобкой, на что указывает индекс r при передачах контуров.

Полагая, что ответвитель подсоединен плечом 1 к согласованному генератору ($S_{11} = 0$), запишем для ориентированного графа, изображенного на рис. 1, б, выражения для \dot{T}_{13} и \dot{T}_{14} :

$$\dot{T}_{13} = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad \dot{T}_{14} = \frac{\Delta_4}{\Delta}. \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= \dot{S}_{13} (1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4 - \dot{S}_{24}^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4) + \\ &+ \dot{S}_{12}\dot{S}_{23}\dot{\Gamma}_2 (1 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4) + \dot{S}_{14}\dot{S}_{34}\dot{\Gamma}_4 (1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2) + \\ &+ \dot{S}_{12}\dot{S}_{34}\dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{12}\dot{S}_{23}\dot{S}_{34}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4; \\ \Delta_4 &= \dot{S}_{14} (1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \dot{S}_{23}^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3) + \\ &+ \dot{S}_{12}\dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_2 (1 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3) + \dot{S}_{13}\dot{S}_{34}\dot{\Gamma}_3 (1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2) + \\ &+ \dot{S}_{13}\dot{S}_{23}\dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + \dot{S}_{12}\dot{S}_{23}\dot{S}_{34}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3; \\ \Delta &= 1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4 - \dot{S}_{23}^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 - \dot{S}_{24}^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 - \\ &- \dot{S}_{34}^2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{23}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 - 2\dot{S}_{23}\dot{S}_{24}\dot{S}_{34}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \\ &+ \dot{S}_{33}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{34}^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{33}\dot{S}_{24}^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \\ &+ \dot{S}_{44}\dot{S}_{23}^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 - \dot{S}_{22}\dot{S}_{33}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4; \end{aligned}$$

\dot{S}_{ik} — комплексные коэффициенты передачи между плечами согласованного направленного ответвителя;

\dot{S}_{kk} — коэффициенты отражения на k -х зажимах согласованного ответвителя (собственные коэффициенты отражения ответвителя);

$\dot{\Gamma}_2, \dot{\Gamma}_3, \dot{\Gamma}_4$ — коэффициенты отражения нагрузок, подсоединенных к плечам 2, 3, 4.

Коэффициенты \dot{S}_{ik} , входящие в выражения для $\Delta, \Delta_3, \Delta_4$, можно определить из матрицы рассеяния ответвителя [3]:

$$[\dot{S}]_1 = \begin{vmatrix} 0 & \sqrt{1-c^2} & -jc & \frac{c}{d} \\ \sqrt{1-c^2} & \dot{S}_{22} & \frac{c}{d} & -jc \\ -jc & \frac{c}{d} & \dot{S}_{33} & \sqrt{1-c^2} \\ \frac{c}{d} & -jc & \sqrt{1-c^2} & \dot{S}_{44} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Здесь c, d — коэффициенты переходного ослабления и направленности ответвителя.

С учетом (4) выражения для $\Delta_3, \Delta_4, \Delta$ запишутся в виде

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= -jc (1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4 + c^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \\ &+ \dot{S}_{22}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4) + \frac{c}{d} \sqrt{1-c^2} \dot{\Gamma}_2 (1 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4) + \\ &+ \frac{c}{d} \sqrt{1-c^2} \dot{\Gamma}_4 (1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2) - j \frac{c^2}{a^2} \dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 - jc (1 - c^2) \dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4; \\ \Delta_4 &= \frac{c}{d} (1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \frac{c^2}{a^2} \dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3) - \end{aligned}$$

$$-jc\sqrt{1-c^2}\dot{\Gamma}_2(1-\dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3) - jc\sqrt{1-c^2}\dot{\Gamma}_3(1-\dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2) - \frac{c}{d}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + \\ + (1-c^2)\frac{c}{d}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3; \quad (5)$$

$$\Delta = 1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4 + c^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 - \frac{c^2}{d^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 - \\ - (1-c^2)\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \frac{c}{d}\dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + 2j\frac{c^2}{d}\sqrt{1-c^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \\ + \dot{S}_{22}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{33}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + (1-c^2)\dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 - c^2\dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \\ + \frac{c^2}{d^2}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 - \dot{S}_{22}\dot{S}_{33}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4.$$

Чтобы определить искомые коэффициенты передачи для ответвителя, изображенного на рис. 1, а, также обратимся к его ориентированному графу. Не нарушая строгости решения, его можно упростить, положив $\dot{S}_{11} = \dot{S}_{35} = \dot{S}_{46} = \dot{\Gamma}_5 = \dot{\Gamma}_6 = 0$ и считая, что центры области связи верхнего и нижнего ответвителей совпадают. При невыполнении последнего условия между волнами, ответвляющимися в боковые плечи, появляется дополнительный фазовый сдвиг, усложняющий искомые выражения. Сделанное упрощение является оправданным с практической точки зрения, поскольку именно такую конструкцию имеют выпускаемые промышленностью ответвители, и небольшой фазовый сдвиг $\Delta\theta$ может быть обусловлен только неточностью при изготовлении:

$$\Delta\theta = \beta\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda_B}\Delta l,$$

где λ_B — длина волны в волноводе;

Δl — смещение центров области связи, вызванное неточностью при изготовлении.

Для $\lambda_B = 4$ см и $\Delta l = 0,2$ мм фазовый сдвиг $= 2^\circ$ и уменьшается с уменьшением частоты.

С учетом указанных выше предположений ориентированный граф рассматриваемого ответвителя примет вид, аналогичный виду ориентированного графа, представленного на рис. 1, б. Тогда искомые коэффициенты передачи для него могут быть определены из (3), а коэффициенты \dot{S}_{ik} — из матрицы рассеяния:

$$[\dot{S}]_2 = \begin{vmatrix} 0 & \sqrt{1-2c^2} & -jc & \frac{c}{d} \\ \sqrt{1-2c^2} & \dot{S}_{22} & \frac{c}{d} & -jc \\ -jc & \frac{c}{d} & \dot{S}_{33} & -c^2 \\ \frac{c}{d} & -jc & -c^2 & \dot{S}_{44} \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta 3 = -jc(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4 + c^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \frac{c}{d}\sqrt{1-2c^2}\dot{\Gamma}_2(1 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4) - \frac{c^3}{d}\dot{\Gamma}_4(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2) + jc^3\sqrt{1-2c^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 - j\frac{c^3}{d^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4; \quad (7)$$

$$\Delta 4 = \frac{c}{d}(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \frac{c^2}{d^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 - \frac{c^3}{d}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 - jc\sqrt{1-2c^2}\dot{\Gamma}_2(1 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3) + jc^3\dot{\Gamma}_3(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2) - \frac{c^3}{d}\sqrt{1-2c^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3;$$

$$\Delta = 1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4 - \frac{c^2}{d^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + c^2\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 - c^4\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 - 2j\frac{c^4}{d}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \frac{c}{d}\dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + \dot{S}_{22}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_4 + \dot{S}_{33}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + c^4\dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 - c^2\dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 + \frac{c^2}{d^2}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4 - \dot{S}_{22}\dot{S}_{33}\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3\dot{\Gamma}_4.$$

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАССОГЛАСОВАНИЯ

1. Определение погрешности рассогласования при измерении проходящей мощности

Схема включения направленного ответвителя при измерении проходящей мощности представлена на рис. 2.

Положив в (1) $K_{изм} = |\dot{E}_3|^2 - |\dot{E}_4|^2$ и $K_{ид} = [|\dot{E}_3|^2 - |\dot{E}_4|^2]_{\Gamma_s=\Gamma_a=S_{kk}=0, d=\infty}$, получаем выражение для искомой погрешности:

$$\delta_p = \frac{E_3^2 - E_4^2}{[E_3^2 - E_4^2]_{\Gamma_s=\Gamma_a=S_{kk}=0, d=\infty}} - 1. \quad (8)$$

Здесь E_3, E_4 — модули напряженности поля волн, ответвляющихся в плечи 3 и 4 неидеального рассогласованного ответвителя.

Значения для E_3 и E_4 определим из (2):

$$E_3 = |\dot{T}_{13}|E_1; \quad (\dot{E}_3)_{ид} = \dot{S}_{13}; \\ E_4 = |\dot{T}_{14}|E_1; \quad (\dot{E}_4)_{ид} = \dot{S}_{12}\dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_2, \quad (9)$$

где E_1 — модуль напряженности поля волны, поступающей от генератора в плечо 1 ответвителя.

Подставляя (3), (9) в (8), получим

$$\delta_p = \frac{\left|\frac{\Delta 3}{\Delta}\right|^2 - \left|\frac{\Delta 4}{\Delta}\right|^2}{|\dot{S}_{13}|^2 - |\dot{S}_{12}\dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_2|^2} - 1. \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет определить погрешность измерения проходящей мощности в наиболее общем виде, однако является сложным и поэтому трудно анализируемым.

В частном случае, когда нагрузки плеч 3 и 4 одинаковы ($\dot{\Gamma}_3 = \dot{\Gamma}_4 = \dot{\Gamma}$), а собственные отражения ответвителя малы и ими можно пренебречь, равным образом как и слагаемыми, содержащими множитель c^4 , выражение (10) записывается в более удобном виде:

$$(\delta_p)_1 = \frac{1}{1 - \Gamma_2^2 (1 - c^2)} \times \left(\left| \frac{\dot{\alpha}_1}{\dot{\beta}_1} \right|^2 - \left| \frac{\dot{\gamma}_1}{\dot{\beta}_1} \right|^2 \right) - 1; \quad (11)$$

$$(\delta_p)_2 = \frac{1}{1 - \Gamma_2^2 (1 - 2c^2)} \times \left(\left| \frac{\dot{\alpha}_2}{\dot{\beta}_2} \right|^2 - \left| \frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\beta}_2} \right|^2 \right) - 1.$$

Здесь $(\delta_p)_1$, $(\delta_p)_2$ — погрешности рассогласования при измерении проходящей мощности для ответвителей, изображенных соответственно на рис. 1, а, 1, в; Γ_2 — модуль коэффициента отражения от нагрузки плеча 2 ответвителя;

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1 &= 1 + \dot{\Gamma}\dot{\Gamma}_2 + j \frac{\sqrt{1-c^2}}{d} (\dot{\Gamma} + \dot{\Gamma}_2); \\ \dot{\beta}_1 &= 1 + c^2 \dot{\Gamma}\dot{\Gamma}_2 - (1-c^2) \dot{\Gamma}^2; \\ \dot{\gamma}_1 &= \frac{1}{d} - j \sqrt{1-c^2} (\dot{\Gamma} + \dot{\Gamma}_2) + \frac{1-c^2}{d} \dot{\Gamma}\dot{\Gamma}_2; \\ \dot{\alpha}_2 &= 1 + j \frac{\sqrt{1-2c^2}}{d} \dot{\Gamma}_2; \\ \dot{\beta}_2 &= 1 + c^2 \dot{\Gamma}\dot{\Gamma}_2; \\ \dot{\gamma}_2 &= \frac{1}{d} - j \sqrt{1-2c^2} \dot{\Gamma}_2 + j c^2 \dot{\Gamma}. \end{aligned} \quad (12)$$

Расчеты показывают, что пренебрежение собственными отражениями ответвителя и членами с коэффициентом пропорциональности $\approx c^4$ делают сомнительной четвертую после запятой значительную цифру погрешности, т. е. приводят к неточности в определении сотой доли погрешности, выраженной в процентах.

Применение в измерителе проходящей мощности двух однонаправленных ответвителей (см. рис. 1, в) вместо одного двухнаправленного (см. рис. 1, а) несколько снижает знакопостоянную составляющую погрешности рассогласования, практически не влияя на добавку с переменным знаком. Это влияние проявляется тем

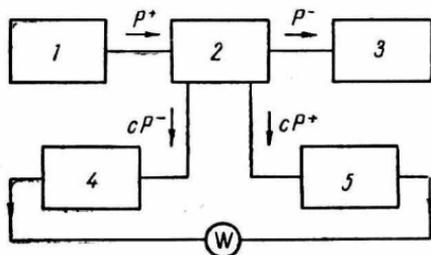


Рис. 2. Схема включения направленного ответвителя при измерении проходящей мощности:

1 — генератор СВЧ; 2 — направленный ответвитель; 3 — нагрузка; 4, 5 — измерители мощности поглощающего типа.

сильнее, чем больше коэффициент отражения от плеч 3 и 4. Например, при направленности в 30 дБ, переходном ослаблении в 20 дБ и $\Gamma_2 = 0,2$ погрешность, выраженная в процентах, рассогласования имеет значения

$$\begin{aligned} (\delta_p)_1 &= +4,3 \pm 2,8 \\ (\delta_p)_2 &= +2,0 \pm 2,7 \end{aligned} \left| \Gamma_3 = \Gamma_4 = 0,15; \right.$$

$$\begin{aligned} (\delta_p)_1 &= +0,9 \pm 2,6 \\ (\delta_p)_2 &= +0,6 \pm 2,6 \end{aligned} \left| \Gamma_3 = \Gamma_4 = 0,05. \right.$$

2. Определение погрешности рассогласования при измерении падающей мощности

Схема включения направленного ответвителя при измерении мощности, отдаваемой генератором, нагруженным на произвольную на-

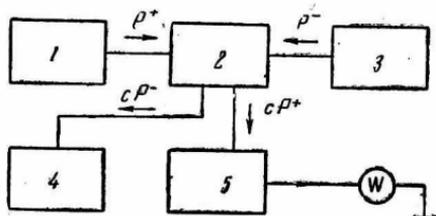


Рис. 3. Схема включения направленного ответвителя при измерении мощности, отдаваемой рассогласованным генератором:

1 — генератор СВЧ; 2 — направленный ответвитель; 3 — нагрузка основного тракта; 4 — согласованная нагрузка; 5 — ваттметр поглощающего типа.

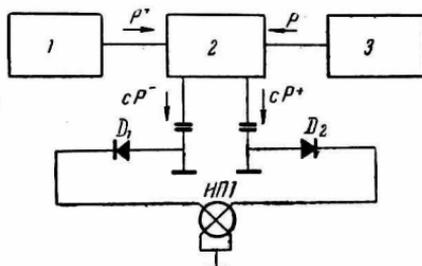


Рис. 4. Схема включения направленного ответвителя при измерении модуля коэффициента отражения: 1 — генератор СВЧ; 2 — направленный ответвитель; 3 — СВЧ нагрузка; D_1 , D_2 — линейные детекторы; ИП — логометр магнитоэлектрической системы.

грузку, представлена на рис. 3. Согласно этому рисунку, значение погрешности рассогласования δ_p примерно одинаково для обоих типов ответвителей и может быть найдено из (1), (5) или (7) при условии, что $\Gamma_4 = 0$, а $K_{изм} = E_3^2$,

$$K_{ид} = [E_3^2]_{\Gamma_3=S_{kk}=0, d=\infty}$$

$$\delta_p = \frac{\left| \frac{\dot{\alpha}}{\dot{\beta}} \right|^2}{|\dot{S}_{13}|^2 - |\dot{S}_{12}\dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_2|^2} - 1.$$

Здесь

$$\dot{\alpha} = -jc(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2) + \frac{c}{d}\sqrt{1 - c^2}\dot{\Gamma}_2;$$

$$\dot{\beta} = 1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \frac{c^2}{a^2}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3 + \frac{c}{a}\dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_2\dot{\Gamma}_3.$$

3. Определение погрешности рассогласования при измерении коэффициента отражения

Схема включения датчиков напряженности поля во вторичную цепь направленного ответвителя при измерении коэффициента отражения приведена на рис. 4.

Согласно (1), (8), погрешность измерения коэффициента отражения

$$(\delta_p) = \frac{|\frac{\Delta 4}{\Delta 3}|^2}{\Gamma_2} - 1. \quad (13)$$

Без учета собственных отражений ответвителя и пренебрежимо малых составляющих выражение (13) преобразуется к виду

$$(\delta_p)_1 = \frac{1}{\Gamma_2} \frac{\left| \frac{\alpha_1}{\beta_1} \right|}{\left| \frac{\gamma_1}{\beta_1} \right|} - 1; \quad (14)$$

$$(\delta_p)_2 = \frac{1}{\Gamma_2} \frac{\left| \frac{\alpha_2}{\beta_2} \right|}{\left| \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right|} - 1.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Силаев, С. Ф. Брянцев. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. Изд-во «Советское радио», 1970.
2. R. W. Beatty, A. C. Macpherson. Mismatch Errors in Microwave Power Measurement. Proc. IRE, 1953, v. 41, № 9.
3. В. Д. Кукуш, Н. К. Соболев, И. В. Явников, Г. П. Щербинин. Измеритель проходящей мощности на основе направленного ответвителя. «Самолетостроение и техника воздушного флота», вып. 17, 1968.
4. Б. М. Машковцев. Формула неидеализированного направленного ответвителя. «Радиотехника», № 4, 1960, т. 15.