

### О ПОГРЕШНОСТИ ЗОНДОВЫХ ВАТТМЕТРОВ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ОТРАЖЕНИЯМИ ОТ ДАТЧИКОВ

Для измерения проходящей мощности СВЧ больших уровней перспективен зондовый метод, основанный на изучении распределения электромагнитного поля вдоль линии передачи при помощи пяти датчиков, расположенных на расстоянии  $\lambda_b/8$  друг от друга [1]. При отсутствии отражений от датчиков на центральной частоте диапазона погрешность измерения проходящей мощности СВЧ не зависит от модуля и фазы коэффициента отражения нагрузки и определяется лишь погрешностью индикаторной схемы, реализующей алгоритм

$$P_{\text{прох}}^2 = 2(U_1 + U_5)U_3 - (U_2 - U_4)^2 \quad (1)$$

для квадратичных датчиков, для которых

$$U_i = kE_i^2 = kP + (1 + |\Gamma|^2 - 2|\Gamma| \cos \gamma), \quad (2)$$

и для линейных датчиков

$$P_{\text{прох}} = (U_1 + U_5)U_3 - (U_2 - U_4)^2, \quad (3)$$

$$U_i = kE_i.$$

Здесь  $E_i$  — напряженность поля в точке линии передачи;  
 $P_{\text{прох}}$  — проходящая мощность;  
 $U_i$  — напряжения от датчиков;  
 $|\Gamma|$ ,  $\gamma$  — модуль и фаза коэффициента отражения нагрузки;  
 $k$  — коэффициент пропорциональности.

Увеличение рабочей полосы частот, а также применение датчиков, вносящих неоднородности в передающий тракт и имеющих разброс по чувствительности и показателю степени при  $E$ , вносит определенную дополнительную погрешность. Взаимные отражения от датчиков могут привести к искажению огибающей стоячей волны, вызванной отражениями от нагрузки, а фазовые сдвиги за счет введения датчиков в волновод могут изменить электрическую длину линии между датчиками.

Для анализа этой задачи применяются следующие методы решения: электродинамический с решением волновых уравнений при конкретных граничных условиях и методы теории цепей (методы падающих амплитуд и «скрещенных» диаграмм, матричный метод, метод ориентированных графов).

Способ, основанный на применении ориентированных графов, является более наглядным и позволяет в ряде случаев получать конечный результат с меньшей затратой труда и времени [2, 3]. При этом результат имеет вид, удобный для его интерпретации и численных расчетов с помощью электронновычислительных машин.

### Вывод основных соотношений

Рассмотрим эквивалентную схему включения высокочастотного узла пятизондового ваттметра в передающий тракт. Расстояния между датчиками  $l_{ik}/8$ , коэффициенты отражения генератора и нагрузки  $\Gamma_r$  и  $\Gamma_n$ , датчиков  $\rho_i$ ; расстояние от ближайшего датчика до нагрузки  $l_n$ , а от генератора до ближайше-

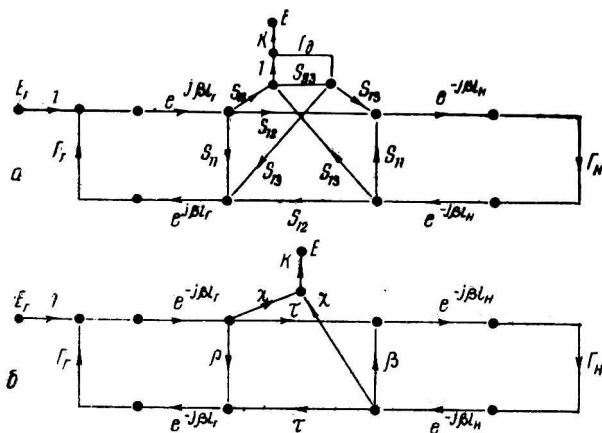


Рис. 1. Ориентировочный граф одиночного симметричного зонда в тракте с рассогласованными генераторами и нагрузкой.

го к нему датчика  $l_r$ ; фазы коэффициентов отражения нагрузки и генератора определяются величинами  $l_n$  и  $l_r$ ;  $E_i$  — комплексные величины напряженностей датчиков;  $l_{ik}$  — расстояние между  $i$ -м и  $k$ -м датчиками.

Каждый из пяти датчиков представляет собой неоднородность, включенную в рассогласованный волноводный тракт. Ориентированный граф одиночного отражающего симметричного зонда с рассогласованным детектором, включенного между рас-

согласованным генератором и нагрузкой, представлен на рис. 1, а. Для определения зависимости напряжения, снимаемого с детектора зонда, от его собственного коэффициента отражения  $\Gamma_\partial$ , коэффициентов отражения нагрузки  $\Gamma_n$  и генератора  $\Gamma_r$ , от электрических длин линий между зондами, генератором и нагрузкой, а также от собственных параметров зондов, характеризующих отражения от него ( $S_{11}$ ), потери в зонде ( $S_{12}$ ) и степень связи его с основной линией ( $S_{13}$ ), целесообразно перейти от параметров, характеризующих зонд и детектор в отдельности, к параметрам  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\chi$ , характеризующих их совместно. Зависимости между этими величинами могут быть найдены с помощью графов (рис. 1, б)

$$\tau = S_{12} + \frac{S_{13}^2 \Gamma_\partial}{1 - S_{33} \Gamma_\partial}; \quad (4)$$

$$\rho = S_{11} + \frac{S_{13}^2 \Gamma_\partial}{1 - S_{33} \Gamma_\partial}; \quad (5)$$

$$\chi = \frac{S_{13}}{1 - S_{33} \Gamma_\partial}. \quad (6)$$

Несмотря на сложность решения задачи об определении напряжений для прибора с пятью детекторными датчиками, целесообразно найти такое решение, так как в большинстве случаев чаще применяются датчики, не ответвляющие во вторичный канал СВЧ сигнал, а преобразующие его непосредственно в волноводе (дигадекторы, объемные и пленочные термопреобразователи и др.). Будем находить напряженности в сечениях волновода, соответствующих местам установки датчиков мощности СВЧ или напряженности поля.

Для рассматриваемой измерительной системы с пятью датчиками составим ориентированный граф (рис. 2). При решении задачи примем следующие допущения:

1) размеры регулярных участков в направлении оси волновода настолько велики, что волны высших порядков, возникающие вблизи неоднородностей, практически полностью затухают на длине этих участков; при этом амплитуды волн высших порядков, вызванных одной неоднородностью, исчезающе малы вблизи другой неоднородности;

2) в каждом регулярном участке может распространяться волна только одного типа;

3) регулярные участки волновода представляют собой идеальную линию без потерь;

4) частота генератора постоянная;

5) датчики являются симметричными, точечными;

6) ввиду того что отражения от датчиков малы ( $\rho = 0,005 - 0,1$ ), третьей степенью  $\rho$  будем пренебрегать.

Воспользовавшись правилом некасающихся контуров Мэсона [3, 4] и принимая во внимание то обстоятельство, что датчики в пятизондовом ваттметре должны быть идентичными ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = \rho_5 = \rho$ ), датчики расположены на расстоянии  $\lambda_b/8$  друг от друга, связь зонда с основной линией слабая, т. е.  $\rho = S_{11}$ ,

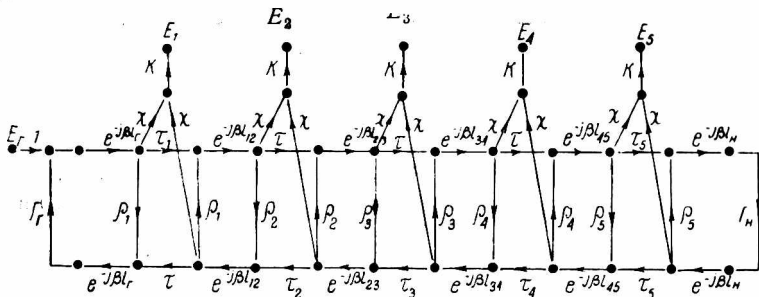


Рис. 2. Ориентированный граф измерительной системы с пятью датчиками.

а коэффициент передачи  $\tau = S_{12}$  ( $|\tau| = \sqrt{1 - |\rho|^2}$ ), запишем выражения для нормированных напряженностей поля в местах расположения датчиков:

$$\frac{E_n}{E_r} = \frac{1}{\tau} e^{j\beta l_n} [1 + \Gamma_n e^{-j2\beta l_n} (\tau - \rho)]; \quad (7)$$

$$\frac{E_4}{E_n} = \frac{1}{\tau^2} \frac{1+j}{\sqrt{2}} e^{j\beta l_n} [(1 - \Gamma_n \rho e^{-j2\beta l_n}) (1 - j\tau\rho) - j e^{-j2\beta l_n} \times \\ \times \Gamma_n \tau^2 (\tau - \rho) + j\rho^2]; \quad (8)$$

$$\frac{E_3}{E_n} = \frac{1}{\tau^3} j e^{j\beta l_n} \{(1 - \Gamma_n \rho e^{-j2\beta l_n}) (1 - j\tau\rho - \tau^3\rho) - e^{-j2\beta l_n} \Gamma_n \tau^3 \times \\ \times [\tau(\tau - \rho) - \rho^2] + j\Gamma_n \rho \tau^2 e^{-j2\beta l_n} + \rho^2 \tau^2 + 2j\rho^2\}; \quad (9)$$

$$\frac{E_2}{E_n} = \frac{1}{\tau^4} \frac{j-1}{\sqrt{2}} e^{j\beta l_n} \{[1 - \Gamma_n \rho e^{-j2\beta l_n}) (1 - j\tau\rho - \tau^3\rho + j\tau^4\rho) + \\ + j e^{-j2\beta l_n} \tau^5 \Gamma_n [\tau(\tau - \rho) - 2\rho^2] + j e^{-j2\beta l_n} \tau^2 \Gamma_n (\rho - j\rho\tau^2) - j\tau\rho^2 + \\ + \tau^2 \rho^2 (2 - j\tau^2) + 3j\rho^2\}; \quad (10)$$

$$\frac{E_1}{E_n} = \frac{1}{\tau^5} e^{j\beta l_n} \{(1 - \Gamma_n \rho e^{-j2\beta l_n}) (1 - j\tau\rho - \tau^3\rho + j\tau^5\rho + \tau^4\rho) + \\ + e^{-j2\beta l_n} \tau^7 \Gamma_n [\tau(\tau - \rho) - 3\rho^2] + j e^{-j2\beta l_n} \tau^2 \Gamma_n (\rho - j\rho\tau^2 - \tau^4\rho - \\ - j\tau\rho^2 - 2\tau^3\rho^2) - j\tau^4\rho^2 (2 - j\tau^2) + 4j\rho^2 + 3\tau^2\rho^2\}. \quad (11)$$

## Анализ решения и выводы

Выражения для нормированных напряженностей поля (7) — (11) анализировались на ЭЦВМ «Мир-1». По результатам полученных напряженностей поля вычислялась погрешность измерения проходящей мощности СВЧ для ваттметров с применением квадратичных и линейных датчиков:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P_{\text{расч}} - P_0}{P_0}, \quad (12)$$

где  $P_{\text{расч}}$  — проходящая мощность, полученная из расчета при реализации соответствующего алгоритма (1) или (3);  
 $P_0 = kP + (1 - |\Gamma_n|^2)$ ;

$P$  — падающая мощность;

$k$  — коэффициент пропорциональности.

Вычисление (7) — (11) и (12) производилось для датчиков с коэффициентом отражения  $\rho$ , изменяющимся в пределах 0,005—0,1. Погрешность получена для самого неблагоприятного значения  $l_n$ , величина которого изменялась дискретно:

$$n \frac{\lambda_b}{2} \cdot (2n - 1) \frac{\lambda_b}{4},$$

$$(2n - 1) \frac{\lambda_b}{8} \quad (n = 1, 2, 3 \dots).$$

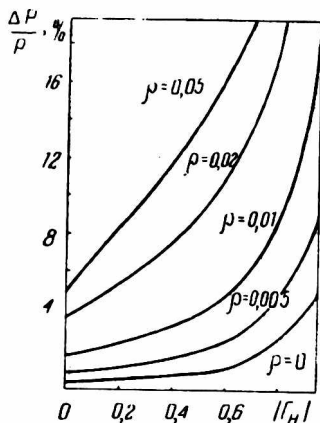


Рис. 3. Погрешность измерения проходящей мощности пятизондовым ваттметром, обусловленная взаимными отражениями от датчиков и нагрузки.

На рис. 3 приведена зависимость погрешности измерения проходящей мощности ваттметром с пятью квадратичными датчиками от модуля коэффициента отражения нагрузки  $\Gamma_n$  при неблагоприятной его фазе для различных значений  $|\rho|$ . В радиотехнических системах коэффициент отражения нагрузки может достигать значения 0,5 при произвольной его фазе. Очевидно, значения  $|\rho|$  не должны превышать 0,01—0,02 для того, чтобы погрешность измерений не превысила нескольких процентов.

Результаты исследований показывают, что при значительных отражениях от датчиков погрешность ваттметров может быть недопустимо большой. На практике минимальный коэффициент отражения датчиков, применяемых в пятизондовых ваттметрах больших уровней проходящей мощности СВЧ, не превышает 0,02 в коротковолновой части сантиметрового диапазона, что под-

тверждается экспериментальными исследованиями, проведенными с датчиками-дигадекторами, пленочными болометрами и термомпарами. Данное значение коэффициента отражения датчика следует считать предельным. При этом погрешность лятизондового ваттметра не превышает  $\pm 5\%$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кукуш В. Д., Волков В. М., Овчинников И. К. Измеритель проходящей мощности. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1972, № 27, с. 224—225.
2. Альтман Дж. Устройства СВЧ. М., «Мир», 1968, 487 с.
3. Силаев М. А., Брянцев С. Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств. М., «Советское радио», 1970, 248 с.
4. Абрахамс Дж., Каверли Дж. Анализ электрических цепей методом графов. М., «Мир», 1967. 175 с.