

УДК 621.317

*Ю. И. ЦАРИК, Ю. Б. ГИМПЕЛЕВИЧ, И. Л. ВЕТРОВ*

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МНОГОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ НА ПОГРЕШНОСТЬ  
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ УСТРОЙСТВ**

---

При создании сложных СВЧ-трактов автономных радиотехнических систем ставится задача разработки и изготовления встроенной аппаратуры контроля их параметров. Встраиваемые датчики целесообразно применять не только для контроля параметров системы в автономном режиме работы, но и для ее настройки на этапе изготовления.

Малые габаритные размеры и масса, простота конструкции многозондовых датчиков обусловили их использование в аппаратуре встроенного контроля. Во время эксплуатации СВЧ-трактов контроль их параметров, как правило, осуществляется в узкой полосе частот (5—10 %), а обработка сигналов датчика проводится аналоговыми устройствами, основанными на спектральном методе определения параметров СВЧ-трактов [1]. Однако многозондовые датчики характеризуются частотной зависимостью фазовых расстояний между зондами, которая не учитывается аналоговыми методами обработки и в широкой полосе частот вызывает значительную погрешность измерений. К неустранимым погрешностям

относится также погрешность, обусловленная неточностью установки зондов на требуемых расстояниях.

Применение вычислительной техники, усложнение алгоритмов обработки информации, а также калибровка измерительных систем по нескольким мерам позволяют уменьшить эти погрешности. Настройку и стендовые испытания СВЧ-трактов можно проводить в широкой полосе частот (20—40 %). Процесс измерения и обработка измерительной информации управляется ЭВМ, которая и учитывает изменение фазовых расстояний в полосе частот. В работах [2; 3] приведены алгоритмы цифровой обработки информации, предполагающие хорошее согласование генератора зондирующего сигнала. Для реализации указанных алгоритмов в измерителях, встраиваемых в автономные радиотехнические системы, необходимы дополнительные развязывающие устройства, что ограничивает возможности их применения.

В статье рассматривается алгоритм цифровой обработки сигналов многозондовых коаксиальных датчиков (трехзондовых и четырехзондовых), позволяющий решить поставленную задачу. Проводится оценка влияния технологических погрешностей изготовления датчиков на погрешность измерения, устанавливаются допуски на конструктивные параметры датчиков.

На рис. 1 представлена структурная схема блока первичного преобразования СВЧ-сигнала, включающего: многозондовый СВЧ-датчик (МД); СВЧ-коммутатор (К); схему управления коммутатором (СУ); квадратичный детектор (Д); предварительный усилитель (У). Исследуем трехзондовый датчик с расстояниями между зондами, равными  $\lambda_0/6$ , и четырехзондовый датчик с расстояниями порядка  $\lambda_0/8$ , где  $\lambda_0$  — длина волны на центральной частоте диапазона. Такой выбор расстояний между элементами связи дает возможность применять указанные датчики как в цифровых измерительных системах, так и во встраиваемых аналоговых устройствах для контроля параметров СВЧ-трактов.

Выходное напряжение квадратичного детектора, подключенного СВЧ-коммутатором к  $i$ -му зонду, представим следующим выражением:

$$U_i = k_i E^2 |1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\varphi - 2\theta_i)|/D, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $U_i$  — выходное напряжение детектора;  $k_i$  — коэффициент передачи включенного канала;  $E$  — напряженность электрического поля на входе датчика;  $|\Gamma|$ ,  $\varphi$  — модуль и фаза коэффициента отражения нагрузки (контролируемого устройства);  $\theta_i$  — фазовые расстояния между плоскостью подключения нагрузки и плоскостью размещения  $i$ -го зонда, рассчитываемые по геометрическим разме-

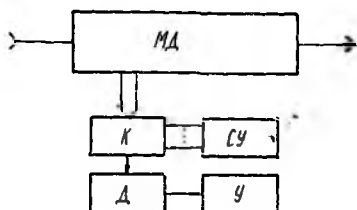


Рис. 1

рам датчика;  $D$  — коэффициент, зависящий от согласования генератора, параметров контролируемой нагрузки и параметров датчика;  $n$  — число зондов в датчике.

В зависимости от количества зондов система уравнений (1) содержит ряд неизвестных, отражающих конструктивные особенности датчика ( $k_1, \dots, k_n$ ), которые определяются при калибровке по нагрузке с известными параметрами. Это позволяет уменьшить число неизвестных системы (1) и разрешить ее относительно измеряемых параметров исследуемой нагрузки. Наиболее удобно проводить калибровку по согласованной нагрузке, позволяющей определить относительные чувствительности  $T_i$  каналов. Полагая  $|\Gamma| = 0$ , из выражения (1) находим

$$U_i = k_i E^2 / D; T_i = U_i / U_1 = k_i / k_1, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

С учетом соотношения (2) система уравнений (1) примет вид

$$u_i = U_i / T_i = Q [1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\varphi - 2\theta_i)], \quad Q = k_1 E^2 / D, \\ Q > 0. \quad (3)$$

Вычитаем из первого уравнения системы (3) третье, а из второго —  $n$ -е, где  $n = 3$  или  $n = 4$ ,

$$u_1 - u_3 = 2Q|\Gamma| [\cos\varphi (\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_3) + \sin\varphi (\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_3)]; \\ u_2 - u_n = 2Q|\Gamma| [\cos\varphi (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_n) + \sin\varphi (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_n)]. \quad (4)$$

В результате решения (4) получим квадратурные составляющие комплексного коэффициента отражения и  $\operatorname{tg}\varphi$ :

$$X = 2Q|\Gamma| \cos\varphi; Y = 2Q|\Gamma| \sin\varphi; \operatorname{tg}\varphi = Y/X. \quad (5)$$

Поскольку  $|\Gamma| > 0$ , то по знакам  $X$  и  $Y$  определяем квадрант, которому принадлежит  $\varphi$ .

Разделив любое  $m$ -е уравнение на любое  $j$ -е уравнение системы (3) и сгруппировав члены при неизвестном  $|\Gamma|$  с одинаковыми степенями, запишем

$$|\Gamma|^2 - |\Gamma| 2 \frac{u_m \cos(\varphi - 2\theta_j) - u_j \cos(\varphi - 2\theta_m)}{u_j - u_m} + 1 = 0. \quad (6)$$

Номера уравнений ( $m, j$ ) выбираются таким образом, чтобы разность  $u_j - u_m$  как можно больше отличалась от нуля, что позволяет уменьшить погрешность обработки на ЭВМ.

Решение уравнения (6) относительно  $|\Gamma|$  при условии  $|\Gamma| \ll 1$  дает

$$|\Gamma| = \frac{u_m \cos(\varphi - 2\theta_j) - u_j \cos(\varphi - 2\theta_m)}{u_j - u_m} - \\ - \sqrt{\left[ \frac{u_m \cos(\varphi - 2\theta_j) - u_j \cos(\varphi - 2\theta_m)}{u_j - u_m} \right]^2 - 1}. \quad (7)$$

В выражениях (5), (7) устранена зависимость параметров  $(\Gamma, |\Gamma|)$  от уровня мощности СВЧ-генератора и его рассогласования, учитываемого коэффициентом  $D$ . Из формул (5), (7) следует, что у рассматриваемых типов многозондовых датчиков погрешность измерения модуля и фазы коэффициента отражения обусловлена следующими факторами: погрешностью измерения напряжения на выходе квадратичного детектора; погрешностью установки зондов; погрешностью установки частоты генератора СВЧ.

Погрешность измерения модуля или фазы коэффициента отражения опишем выражением

$$\Delta = \sqrt{S_u^2 \Delta U^2 + S_\theta^2 \Delta \theta^2 + S_f^2 \Delta f^2}, \quad (8)$$

где  $S_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial/\partial U_i)^2}$ ;  $S_\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial/\partial \theta_i)^2}$ ;  $S_f = \partial/\partial f$  — коэф-

фициенты чувствительности модуля или фазы по параметрам  $U_i, \theta_i, f$ ;  $\Delta U$  — абсолютная погрешность измерения напряжения на выходе квадратичного детектора;  $\Delta \theta$  — абсолютная погрешность установки фазовых расстояний между плоскостью подключения нагрузки и плоскостями размещения зондов;  $\Delta f$  — абсолютная погрешность установки частоты генератора СВЧ;  $i = 1, 2, \dots, n$ . Параметр  $\Delta \theta$  рассчитывается по погрешности установки геометрических расстояний  $\Delta l$  между зондами:  $\Delta \theta = 360 \Delta l / \lambda$ . Ввиду сложности аналитических выражений частных производных, дифференцирование проводилось численными методами с применением ЭВМ.

Частотные зависимости коэффициентов чувствительности для трехзондового датчика с межзондовым расстоянием  $\lambda_0/6$  показаны на рис. 2; для четырехзондового датчика с межзондовым расстоянием  $\lambda_0/8$  — на рис. 3 ( $a, б$  — по направлению на выходе  $D$ ;  $в, г$  — по фазовому расстоянию между зондами;  $д, е$  — по частоте). Графики представлены для 25 % полосы частот при  $|\Gamma| = 0,3$  и различных значений фазы коэффициента отражения ( $1 - \varphi = 45^\circ$ ;  $2 - 90^\circ$ ;  $3 - 135^\circ$ ;  $4 - 180^\circ$ ). Результаты расчета позволяют при заданной погрешности измерения модуля и фазы коэффициента отражения установить допустимые погрешности измерения напряжения на выходе квадратичного детектора, установки зондов, установки частоты генератора СВЧ.

Анализ зависимостей показывает, что при  $\Delta U = 4 \text{ мВ}$  ( $U_{\text{макс}} = 4 \text{ В}$ ),  $\Delta l = 0,1 \text{ мм}$ ,  $\Delta f = 1 \text{ МГц}$ , погрешность измерения модуля и фазы коэффициента отражения для трехзондового датчика не превышает: в дециметровом диапазоне ( $\lambda = 30 \text{ см}$ )  $\delta_\Gamma = 0,9 \%$ ,  $\Delta \varphi = 0,5^\circ$ ; в сантиметровом диапазоне ( $\lambda = 3 \text{ см}$ )  $\delta_\Gamma = 3 \%$ ,  $\Delta \varphi = 1,2^\circ$ ; в миллиметровом диапазоне ( $\lambda = 0,3 \text{ см}$ )  $\delta_\Gamma = 23 \%$ ,  $\Delta \varphi = 10^\circ$ . Для четырехзондового датчика: в дециметровом диапазоне  $\delta_\Gamma = 1,5 \%$ ,  $\Delta \varphi = 0,5^\circ$ ; в сантиметровом диапазоне  $\delta_\Gamma = 5 \%$ ,  $\Delta \varphi = 1^\circ$ ; в миллиметровом диапазоне  $\delta_\Gamma = 43 \%$ ,  $\Delta \varphi = 9^\circ$ .

Согласно результатам моделирования работы измерительной системы значения параметров исследуемых нагрузок, рассчитанные по алгоритму (5) — (7), не зависят от уровня мощности генератора СВЧ при условии неизменности этого уровня за период измерения напряжений на всех зондах.

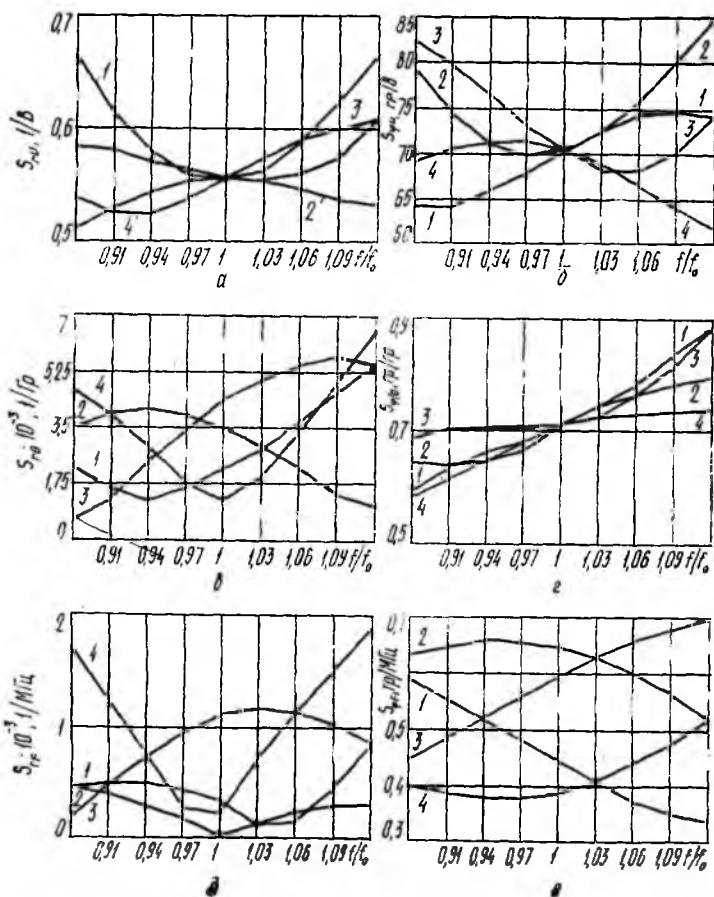


Рис. 2

Сравнение частотных характеристик коэффициентов чувствительности по параметрам  $U$ ,  $\Theta$ ,  $f$  показало, что независимо от типа датчика наибольший вклад в погрешность измерения в дециметровом диапазоне вносит погрешность измерения напряжения на выходе квадратичного детектора, в сантиметровом и миллиметровом диапазонах — погрешность установки расстояний между плоскостями размещения зондов и плоскостью подключения нагрузки. Таким образом, в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов для достижения приемлемых погрешностей

измерения точность установки зондов должны быть порядка сотых долей миллиметра.

Из результатов расчетов следует, что в случае применения трехзондового датчика погрешность измерения модуля коэффициента отражения примерно в два раза меньше погрешности измерения

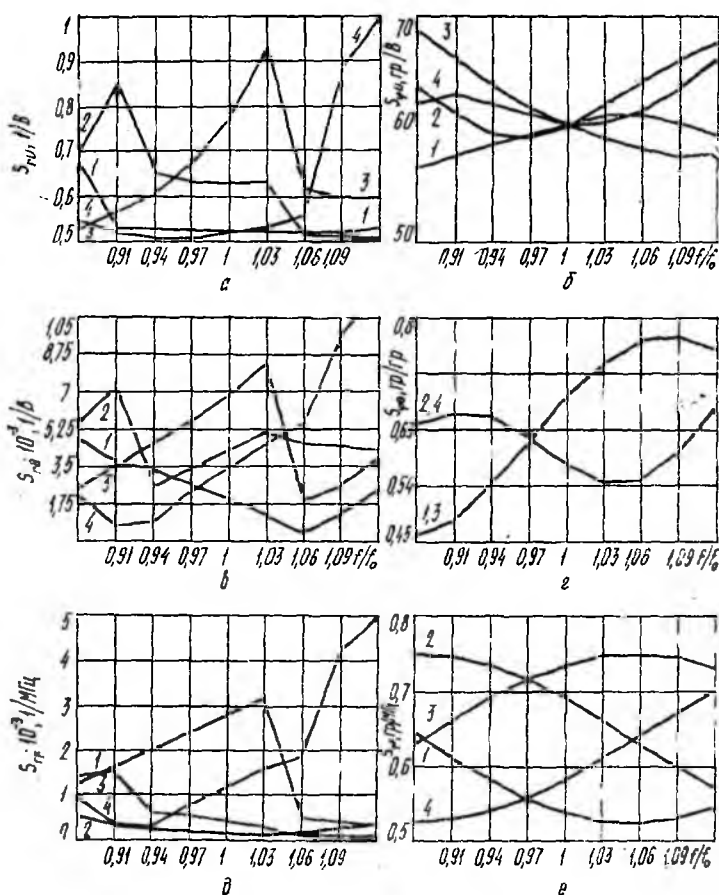


Рис. 3

при использовании четырехзондового датчика. Погрешность измерения фазы коэффициента отражения в случае применения трехзондового датчика примерно в 1,1 раза больше по сравнению с погрешностью измерения при использовании четырехзондового датчика.

Список литературы: 1. Бондаренко И. К., Гимпилевич Ю. Б., Зиборов С. Р., Применение спектрального анализа для идентификации S-параметров СВЧ устройств // Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии: Тез. докл. III Всесоюз. симп. Новосибирск, 1982. С. 238—240. 2. Бондаренко И. К., Гимпилевич Ю. Б., Выходцев В. М., Царик Ю. И. Автоматическая система для измерения полных сопротивлений

в коаксиальных трактах на основе микро-ЭВМ // Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии: Тез. докл. III Всесоюз. симп. Новосибирск, 1982. С. 235—237. 3. Бондаречко И. К., Гимпелевич Ю. Б., Царик Ю. И. Микропроцессорный измеритель параметров СВЧ устройств // Радиоизмерения: Материалы X науч.-техн. конф. Каунас, 1985. Т. 1. С. 89—93.

*Поступила в редколлегию 20.04.87*