

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕВЗАИМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

Освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн, развитие элементной базы на основе диэлектрических и металлодиэлектрических волноводных структур в последние годы делают возможным переход от разработки отдельных устройств волноводного тракта к созданию законченных узлов и систем в интегральном исполнении на этих волноводах. Одна из перспективных линий для интегральных схем миллиметрового диапазона волн — полосковый металлодиэлектрический волновод (ПМДВ), обладающий поляризационной устойчивостью [1], хорошими электродинамическими параметрами и сравнительной простотой изготовления. В настоящее время актуальны задачи разработки невзаимных элементов (НЭ) на базе этого волновода — ферритовых циркуляторов и вентилях, а также измерения их параметров на этапе лабораторных исследований и в процессе промышленного изготовления.

В большинстве известных измерителей невзаимных параметров осуществлен принцип последовательного измерения параметров НЭ. Вначале измеряются характеристики в одном направлении, а затем — в противоположном с обязательным изменением направления запитки исследуемого НЭ перестыковкой СВЧ-части измерителя, что увеличивает погрешность и делает невозможной автоматизацию измерений. Впервые [2] сформулированы принципы построения автоматизированных измерений НЭ, исходя из которых сделан вывод о том, что практически возможной схемной реализацией является один вариант — использование кольцевого измерительного тракта.

Проще и качественнее можно реализовать известные принципы в линейном измерительном тракте, где одновременная запитка НЭ в противоположных направлениях осуществляется включением после НЭ калиброванной нагрузки, например короткозамыкателя, которая обеспечивает обратное направление распространения сигнала в сторону генератора. При этом выполняется принцип одновременности распространения сигнала через НЭ в противоположных направлениях [2], что исключает необходимость перестыковки СВЧ-части измерителя, а задача измерения сводится к извлечению информации о каждой волне, прошедшей через НЭ, например, с помощью направленных ответвителей. Схема измерителя упрощается, уменьшаются число ее элементов и, соответственно, габариты, что особенно важно в интегральном исполнении.

Кроме того, большой недостаток кольцевого измерительного тракта — необходимость использования пары НЭ вентилях, без которых измерительный тракт может превратиться в кольцевой резонатор бегущей волны. Такие вентили, как правило, самые

узкополосные элементы схемы, причем выход за пределы рабочего диапазона вентиля увеличивает погрешность измерения в несколько раз, а отсутствие вентиля с удовлетворительными характеристиками на данном типе волновода — одна из причин неприемлемости кольцевого тракта.

От указанного недостатка свободен линейный тракт, где используемый развязывающий элемент (вентиль или аттенуатор), который включают между генератором и измерительным трактом, уменьшает влияние отраженной волны на работу генератора, поэтому требования к нему по развязке в широком диапазоне частот не столь велики.

На рис. 1 представлена схема измерителя, предназначенного для измерения прямых и обратных потерь, модулей коэффициентов передачи, НЭ или вентиляльного отношения, а также КСВ входа НЭ в линейном тракте без изменения направления его запитки.

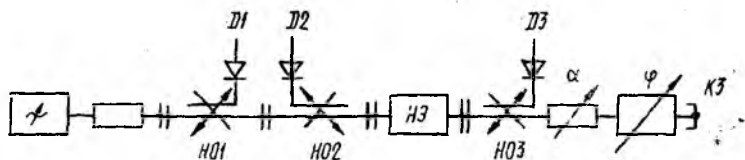


Рис. 1

В состав СВЧ-части измерителя входят генератор, развязывающий аттенуатор, три направленных ответвителя НО1—НО3 с детекторными головками Д1—Д3 во вторичных плечах, переменный аттенуатор и фазовращатель, а также короткозамыкатель. Все элементы СВЧ-тракта, за исключением генератора, выполнены на базе ПМДВ. Переходное ослабление направленных ответвителей составляет 15...20 дБ в диапазоне частот $f = 25,86...36,5$ ГГц. Коэффициент отражения детекторных головок $\Gamma_d = 0,23$. Коэффициент отражения переменных аттенуатора и фазовращателя $\Gamma_a \leq 0,07$ и $\Gamma_\varphi \leq 0,024$ соответственно.

Переменный аттенуатор работает в двух режимах: когда введено максимальное ослабление и благодаря небольшому коэффициенту отражения он представляет собой эквивалент согласованной нагрузки; когда ослабление полностью выведено, а падающая волна беспрепятственно проходит к нагрузке и затем отражается от нее. Переменный фазовращатель обеспечивает непрерывное периодическое изменение вносимого фазового сдвига в пределах не менее $\pm \pi/2$.

В измерителе использован стандартный генератор на базе металлического прямоугольного волновода, соединенный с измерительным трактом через переход. Параметры перехода: вносимые потери 0,3 дБ и КСВ $\leq 1,18$ во всем частотном диапазоне.

До начала измерений производят калибровку измерителя при полностью выведенном ослаблении переменного аттенуатора и без исследуемого НЭ. Калибровка заключается в выравнивании уров-

ней сигналов всех трех квадратичных детекторов Д1—Д3, после чего в тракт подключают исследуемый НЭ. Измерение прямых потерь, т. е. модуля коэффициента передачи в прямом направлении от генератора к нагрузке, НЭ и КСВ входа проводится при полностью введенном ослаблении аттенюатора, когда он эквивалентен согласованной нагрузке, по обычной схеме рефлектометра. Сигнал с детектора Д1 является опорным, сигналы с детекторов Д2 и Д3 несут информацию о КСВ и прямых потерях. Измерение обратных потерь НЭ осуществляется при полностью выведенном ослаблении переменного аттенюатора. Сигнал на детекторе Д2 определяется сразу тремя измеряемыми величинами: прямыми и обратными потерями и КСВ входа НЭ. Обратные потери НЭ устанавливаются с учетом измеренных прямых потерь и КСВ входа при последующей обработке в низкочастотной части измерителя.

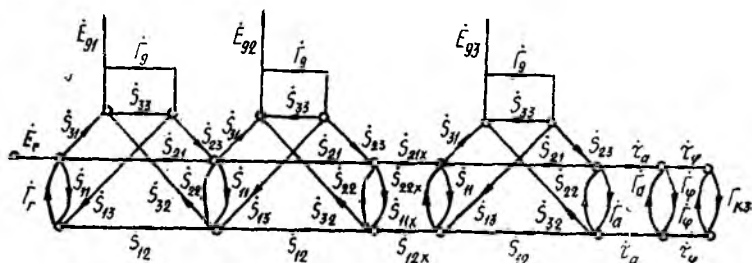


Рис. 2

Анализ работы измерителя проведен методом ориентированных графов [3]. Полный граф измерителя показан на рис. 2. Графы направленных ответвителей представляются эквивалентными шести-полюсниками с передачами S_{ij} . Допустим, что $[S]$ -матрицы всех ответвителей с присоединенными детекторами идентичны, а Γ_d — коэффициенты отражения детекторов. Ветви с передачами S_{ijx} соответствуют элементам $[S]$ -матрицы исследуемого НЭ; τ_a , Γ_a — коэффициенты передачи и отражения переменного аттенюатора; τ_ϕ , Γ_ϕ — коэффициенты передачи и отражения переменного фазовращателя, где $\tau_\phi = 1 \cdot \exp(i\phi)$, а ϕ — вносимый фазовый сдвиг; $\Gamma_{кз}$, Γ_g — коэффициенты отражения короткозамыкателя и генератора.

Пренебрегая слагаемыми второго и более высоких порядков малости, получаем выражение для сигнала, подаваемого на первый квадратичный детектор Д1, $\dot{E}_{д1} = \dot{E}_g \cdot S_{31}$ (1), где \dot{E}_g — амплитуда сигнала генератора.

Сигнал, подаваемый на второй квадратичный детектор Д2, имеет вид

$$\dot{E}_{д2} = \dot{E}_g (S_{21}^3 S_{12} S_{21x} S_{12x} \tau_a^2 \Gamma_{кз} S_{32} \tau_\phi^2 + S_{21}^2 S_{32} S_{11x}). \quad (2)$$

При этом коэффициенты передачи НЭ в прямом и обратном направлениях $S_{21x} = S_{21x} \exp(i\phi_{пр})$, $S_{12x} = S_{12x} \exp(i\phi_{обр})$ соответст-

венно. Сигнал, подаваемый на третий квадратичный детектор ДЗ, запишем следующим выражением: $\dot{E}_{д3} = \dot{E}_r \dot{S}_{21}^2 \dot{S}_{21x} \dot{S}_{31}$ (3). В режиме калибровки измерителя $\dot{S}_{21x} = \dot{S}_{12x} = \tau_a = 1$ и $S_{11x} = 0$. Тогда из выражений (1)–(3) с учетом квадратичности характеристик детекторов Д1–Д3 сигналы, снимаемые с них, в режиме калибровки представим как

$$U_{д1}^k = E_r^2 S_{31}^2; U_{д2}^k = E_r^2 S_{21}^2 S_{12}^2 \Gamma_{кз}^2 S_{32}^2; U_{д3}^k = E_r^2 S_{21}^4 S_{31}^2, \quad (4)$$

где S_{31} , S_{32} — переходное ослабление ответвителей; $\Gamma_{кз}$ — модуль коэффициента отражения короткозамыкателя.

Калибровка измерителя заключается в выравнивании уровней сигналов детекторов с помощью усилителей в низкочастотной части измерителя. Тогда условие калибровки имеет вид

$$k_1 S_{31}^2 = k_2 S_{21}^2 S_{12}^2 \Gamma_{кз}^2 S_{32}^2 = k_3 S_{21}^4 S_{31}^2. \quad (5)$$

Здесь k_1 , k_2 , k_3 — коэффициенты усиления соответствующих усилителей.

Измерение прямых потерь и КСВ входа НЭ проводят при полностью введенном ослаблении переменного аттенюатора, т. е. $\tau_a = 0$. Тогда сигналы, снимаемые с квадратичных детекторов, следующие:

$$U'_{д1} = k_1 E_r^2 S_{31}^2; U'_{д2} = k_2 E_r^2 S_{21}^2 S_{32}^2 S_{11x}^2; U'_{д3} = k_3 E_r^2 S_{21}^4 S_{31}^2. \quad (6)$$

Отношение сигналов третьего и первого детекторов с учетом калибровки (5) соответствует коэффициенту передачи в прямом направлении: $N = U'_{д3}/U'_{д1} = S_{21x}^2 = 1/\alpha_{пр}^2$ (7), где $\alpha_{пр} = 1/\sqrt{N}$ — потери НЭ в прямом направлении.

Отношение сигналов второго и первого детекторов соответствует модулю коэффициента отражения от входа НЭ. Пренебрегая потерями в третьем ответвителе и неидеальностью короткозамыкателя, т. е. $S_{21}^2 S_{12}^2 \Gamma_{кз}^2 = 1$, из выражений (6) с учетом (5) получаем $M = U'_{д2}/U'_{д1} = S_{11x}^2$ (8), а затем S_{11x}^2 можно пересчитать в КСВ.

Для измерения обратных потерь ослабление переменного аттенюатора полностью выводят, т. е. $\tau_a = 1$, а сигнал, снимаемый с детектора Д2, с учетом (7), (8) запишется как

$$U''_{д2} = k_2 E_r^2 S_{21}^2 S_{12}^2 \Gamma_{кз}^2 [N S_{12x}^2 + M + 2\sqrt{NM} \cdot S_{12x} \cos(\varphi_{пр} + \varphi_{обр} + 2\varphi + 2\varphi_0)],$$

где φ_0 — геометрическая сумма аргументов комплексных величин \dot{S}_{11x} , $\dot{\Gamma}_{кз}$, \dot{S}_{12} , \dot{S}_{21} .

Непрерывное изменение вносимого фазового сдвига переменного фазовращателя φ в пределах не менее $\pm \pi/2$ обуславливает изменение во времени амплитуды сигнала $U''_{д2}$ по закону изменения величины φ . Представим отношение сигналов первого и второго детекторов при последующем усреднении во времени и с учетом калибровки (5) $L = U''_{д2}/U'_{д1} = N S_{12x}^2 + M$, а коэффициент передачи

НЭ — в обратном направлении: $S_{12x}^2 = (L - M)/N$ (9). Здесь $\alpha_{обр}^2 = 1/S_{12x}^2 = N/(L - M)$ — потери НЭ в обратном направлении, определяемые с учетом измеренных прямых потерь и КСВ входа НЭ.

Погрешность измерителя в основном зависит от неидеальности ответвителей и переотражений сигнала от исследуемого элемента и детекторов. Анализ показывает, что при реальных параметрах элементов схемы (ненаправленность ответвителей 30дБ), полагая $\Gamma_{кз} = 1$, погрешность измерений коэффициентов передачи НЭ и коэффициента отражения от входа не превышает 2 %.

Для сравнения измеряли обратные потери НЭ по известной методике путем изменения направления его запитки и соответствующей перестройки СВЧ-тракта в нескольких точках частотного диапазона. В пределах погрешности получено хорошее совпадение результатов измерений обоими методами.

Список литературы: 1. Саламатин В. В., Кондрашихин А. Б. О деполаризации волн в прямоугольных диэлектрических волноводах. К., 1986. 135 с. Деп. в УкрНИИТИ 27.09.86, № 2312. 2. Елизаров А. С. О принципах построения измерителей параметров невязанных СВЧ-четырёхполосников // Электрон. техника. Сер. Контроль-измер. аппаратура. 1970. Вып. 2. С. 3—8. 3. Силаев М. А., Брянецев С. Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств // М., 1970. 248 с.

Поступила в редколлегию 20.04.87

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 неустраняемым погрешностям