

УДК 621.385.6

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-229-237

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОАКСИАЛЬНО-ПОЛОСКОВОЕ И ЗОНДОВОЕ КОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА И СПОСОБЫ ИХ КАЛИБРОВКИ

*Сергей Викторович Савелькаев*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Рассмотрены конструкция и способ калибровки коаксиально-полоскового контактного устройства, которое обеспечивает подключение к анализатору сверхвысокочастотных цепей как коаксиальных мер и микрополосковых калибраторов, так и исследуемых активных компонентов, таких как транзисторы. Контактное устройство обеспечивает высокую повторяемость подключения к нему коаксиальных мер, микрополосковых калибраторов и исследуемых активных компонентов, имеет малый собственный коэффициент стоячей волны и потери. Для калибровки контактного устройства используют минимальный набор легко рассчитываемых микрополосковых калибраторов с малыми потерями, что с учетом высокой повторяемости их подключения снижает трудоемкость его калибровки и повышает точность передачи результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт. Возможность передачи результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт расширяет область действия Государственной системы обеспечения единства измерений на последний. Также приведены конструкция зондового контактного устройства и способ его калибровки специализированным микрополосковым калибратором.

**Ключевые слова:** коаксиально-полосковое и зондовое контактные устройства, способ калибровки, транзистор,  $S$ -параметры, передача результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт

### *Введение*

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) проектирование микрополосковых усилителей и автогенераторов осуществляют на основе измеренных  $S$ -параметров активных компонентов (АК) этих устройств, например, транзисторов. Подключение АК к коаксиальному анализатору СВЧ-цепей (АЦ) осуществляют с помощью коаксиальных, полосковых или зондовых контактных устройств (ККУ, ПКУ или ЗКУ) [1–25].

Недостатком конструкций ПКУ [4–24] является то, что они не обеспечивают подключение к АЦ стандартизированных аттестованных коаксиальных мер при калибровке АЦ, это требует демонтажа ПКУ, что повышает трудоемкость его последующей калибровки. Также ПКУ имеют значительный собственный коэффициент стоячей волны (КСВ) и потери.

Кроме того, способы калибровки ПКУ [4, 5] предполагают использование избыточного набора короткозамкнутых, разомкнутых и про-

ходных расчетных микрополосковых калибраторов, в виде отрезков микрополосковой линии (МПЛ) различной длины. Плохая повторяемость подключения этих калибраторов и подключения АК к ПКУ, потери в этих калибраторах, включая потери в разомкнутых калибраторах из-за эффекта открытого конца, приводят к значительным погрешностям передачи результатов измерения  $S$ -параметров АК из коаксиального измерительного тракта АЦ в микрополосковый тракт.

В статье предложена модификация ККУ [1–3] в виде универсального коаксиально-полоскового контактного устройства (КПКУ), которое обеспечивает калибровку коаксиального АЦ и совместно с коаксиальными переходами ( $КП_i; i = 1, 2$ ) КПКУ набором стандартизированных аттестованных коаксиальных мер отражения и передачи. Дополнительная калибровка  $КП_i$  [3] расчетным микрополосковым согласованным калибратором или одновременно этим же калибратором и короткозамыкателем

обеспечивает передачу результатов измерения  $S$ -параметров АК из коаксиального измерительного тракта АЦ в микрополосковый тракт. Минимальный набор расчетных микрополосковых калибраторов с малыми потерями и высокая повторяемость подключения этих калибраторов и АК к КПКУ повышает точность передачи результатов из-

мерения  $S$ -параметров АК, а возможность совместной калибровки АЦ и КПКУ снижает трудоемкость измерения этих параметров. Также приведены конструкция ЗКУ и способ его калибровки специализированным микрополосковым калибратором.

**Конструкция КПКУ** показана на рис. 1, а и б.

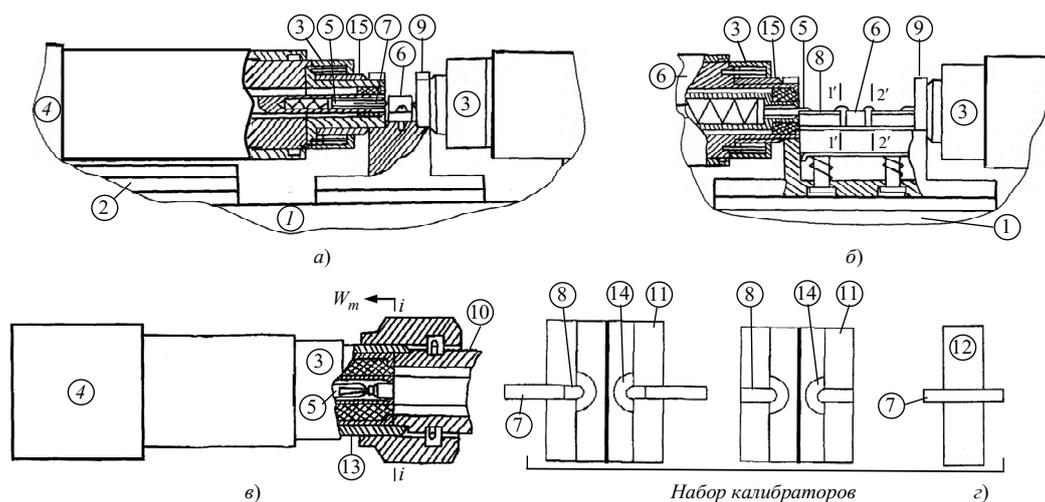


Рис. 1. Конструкция КПКУ и набор калибраторов:

а) и б) подключение к КПКУ 3 АК 6 с ленточными 7 и микрополосковыми 8 выводами; в) подключение к КПКУ 3 коаксиальной меры 10; г) набор калибраторов; 1 – основание; 2 – подвижный стол; 3 – КПКУ; 4 – порт АЦ; 5 – подпружиненная цанга; 6 – АК; 7 и 8 – ленточный вывод и отрезок МПЛ; 9 – пьедестал; 10 – коаксиальная мера; 11 – согласованный микрополосковый калибратор; 12 – короткозамыкатель; 13 – резьбовая втулка; 14 – резистивная нагрузка

КПКУ содержит основание 1, на каждом из двух подвижных столов 2 которого последовательно размещены КПКУ 3 этого КПКУ и один из двух коаксиальных измерительных портов АЦ 4. КПКУ 3, разрез которых показан на рис. 1, а и б, позволяют посредством подпружиненных цанг 5 подключить в отсчетных плоскостях  $i-i'$ ;  $i=1, 2$  их измерительных входов АК 6 как с ленточными 7 (см. рис. 1, а), так и с микрополосковыми 8 (см. рис. 1, б) выводами. При этом АК 6 размещают на пьедестале 9. Возможность горизонтального перемещения подвижных столов 2 (см. рис. 1, а) позволяет подключить в отсчетных плоскостях  $i-i'$  КПКУ 3 коаксиальную меру 10 (как, например, для рис. 1, а показано на рис. 1, в)

или расчетные согласованные микрополосковые калибраторы 11 калибровке АЦ (калибраторы показаны на рис. 1, г, причем для рис. 1, а используют калибраторы с ленточными выводами 7, а для рис. 1, б – с микрополосковыми 8). Также при дополнительной калибровке АЦ к входному ( $i'=1$ ) и выходному ( $i'=2$ ) отрезкам МПЛ 8 в их вспомогательных отсчетных плоскостях  $i'-i'$  (см. рис. 1, б, АК 6 удаляют) можно подключить короткозамыкатель 12 (см. рис. 1, г).

**Калибровка КПКУ.** Для калибровки КПКУ;  $i=1, 2$  совместно с АЦ пьедестал 9 (см. рис. 1, а и б) удаляют и в их отсчетных плоскостях  $i-i'$  поочередно подключают стандартизированные аттестованные коаксиальные меры

отражения  $\Gamma_0$  (см. рис. 1, в), набор которых определен способом калибровки АЦ.

Для калибровки АЦ на проход измерительные входы КПи 3 в отсчетных плоскостях  $i-i$ ;  $i=1, 2$  могут быть соединены встык. При этом цанга 5 с большим усилием пружины утапливает цангу 5 другого КПи 3 с меньшим усилием пружины аналогично рис. 1, в. При этом резьбовую втулку 13 одного из КПи 3 (см. рис. 1, а и б) надвигают на другой КПи 3, аналогично рис. 1, в.

При дополнительной калибровке КПКУ [1–3] подключение согласованного микрополоскового калибратора 11 (см. рис. 1, з) к КПи,  $i=1, 2$  в отсчетных плоскостях  $i-i$  (см. рис. 1, а и б) представлено эквивалентной схемой замещения (ЭСЗ), показанной на рис. 2, где  $Z_0$  – волновое сопротивление отрезка МПЛ калибратора, который нагружен на согласованную нагрузку с сопротивлением  $Z_n = Z_0$ .

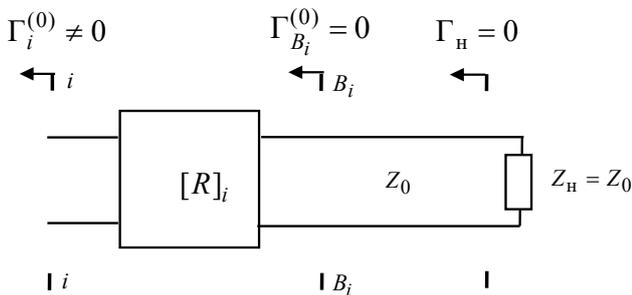


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения КПи,  $i=1, 2$  при подключении к нему согласованного микрополоскового калибратора

При подключении согласованного микрополоскового калибратора к измерительным входам КПи;  $i=1, 2$  в его отсчетной плоскости  $i-i$  возникает неоднородность с комплексным коэффициентом отражения (ККО)  $\Gamma_i^{(0)} \neq 0$ , обусловленная конструктивными различиями этих узлов и приводящая к взаимному искажению их полей в отсчетной плоскости  $i-i$ . Эту неоднородность можно моделировать вводом вспомогательной плоскости

$B_i - B_i$  и введением между плоскостями  $i-i$  и  $B_i - B_i$  четырехполюсника с  $[R]_i$ -параметрами, характеризующими указанную неоднородность. При этом плоскости  $i-i$  и  $B_i - B_i$  совмещены в пространстве, а в плоскости  $B_i - B_i$  ККО  $\Gamma_{B_i}^{(0)} = 0$ .

По измеренным ККО  $\Gamma_i^{(0)}$   $R_{11i}$ -параметры можно определить известным образом

$$R_{11i} = \Gamma_i^{(0)}. \quad (1)$$

Кроме того, в работе [1] был предложен другой наиболее трудоемкий способ определения  $R_{11i}$ -параметров, основанный на измерении  $[\hat{S}]_k$ -параметров двух отрезков МПЛ, имеющих длину  $l_k$ ;  $k=1, 2$  в отсчетных плоскостях  $i-i$  их поочередного подключения к КПи;  $i=1, 2$  с последующим определением  $[R]_i$ -параметров по формуле

$$R_{11i} = \frac{(\hat{S}_{ij} \hat{S}_{ji} e^{j\beta l_j} - \hat{S}_{ii} \hat{S}_{jj} e^{j\beta l_i})}{(\hat{S}_{ji} e^{j\beta l_j} - \hat{S}_{ij} e^{j\beta l_i})}; \quad (2)$$

$$i, j = 1, 2; i \neq j,$$

где  $\beta = 2\pi/\lambda$  и  $\lambda = c/\sqrt{\epsilon_3}f$  – фазовая постоянная и длина волны в отрезках МПЛ на частоте  $f$ ;  $\epsilon_3$  – эффективная диэлектрическая проницаемость МПЛ; индексы при  $[\hat{S}]_{i,j}$ -параметрах и  $l_{i,j}$  определены индексом  $k$ .

Для определения недостающих  $R_{12i}, R_{21i}$  и  $R_{22i}$ -параметров четырехполюсник, показанный на рис. 2, был представлен параллельной проводимостью  $Y_{R_i}$ . Такое представление сделано в предположении физического совпадения плоскостей  $i-i$  и  $B_i - B_i$ . Падающие и отраженные волны  $U_{1i}^{\pm}$  и  $U_{2i}^{\pm}$  связаны в плоскостях  $i-i$  и  $B_i - B_i$  уравнениями [3]:

$$\left. \begin{aligned} U_{1i}^- &= r_{11i} U_{1i}^+ + r_{12i} U_{2i}^+ \\ U_{2i}^- &= r_{21i} U_{1i}^+ + r_{22i} U_{2i}^+ \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $r_i$  – ненормированные параметры рассеяния введенного четырехполюсника.

Из уравнений (3) при  $U_{1i} = U_{2i}$ , где  $U_{1i} = U_{1i}^+ + U_{1i}^-$  и  $U_{2i} = U_{2i}^+ + U_{2i}^-$ , получим

$$U_{1i}^+[(1-r_{21i})+r_{11i}] = U_{2i}^+[(1-r_{12i})+r_{22i}]. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет решение:

$$r_{12i} = 1 + r_{11i}, r_{21i} = 1 + r_{22i}, \quad (5)$$

которое после его нормировки с учетом того, что  $r_{11i} = R_{11i}$  и  $r_{22i} = R_{22i}$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{12i} &= (1 + R_{22i})\sqrt{Z_0 / Z_i}; \\ R_{21i} &= (1 + R_{11i})\sqrt{Z_i / Z_0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $Z_i$  – волновое сопротивление КПи, равное волновому сопротивлению коаксиальных мер, используемых при калибровке АЦ.

Применяя к (6) условие взаимности  $R_{12i} = R_{21i}$ , определим недостающие  $R_{12i}$ -,  $R_{21i}$ - и  $R_{22i}$ -параметры:

$$\begin{aligned} R_{12i} &= R_{21i} = (1 + R_{11i})\sqrt{Z_i / Z_0}; \\ R_{22i} &= (1 + R_{11i})Z_i / Z_0 - 1. \end{aligned} \quad (7)$$

$R_i$ -параметры (7) применимы к конструкции КПКУ, показанной на рис. 1, б. Они могут быть нормированы относительно произвольного волнового сопротивления  $Z_0$  согласованного полоскового калибратора, выбранного для калибровки АЦ, и, следовательно, в последующем к этому волновому сопротивлению  $Z_0$  нормированы результаты измерения.

Для перехода от плоскости  $i-i$  измерительного входа КПи,  $i = 1, 2$  к вспомогательной отсчетной плоскости  $i'-i'$ ,  $i' = 1, 2$  отрезков МПЛ  $\delta$  конструкции КПКУ, показанной на рис. 1, б, необходима калибровка АЦ короткозамыкателем  $I2$  (см. рис. 1, з).

При подключении к вспомогательным отсчетным плоскостям  $i'-i'$ ,  $i' = 1, 2$  (см. рис. 1, б) короткозамыкателя  $I2$  (см. рис. 1, з) измере-

мый ККО в плоскости  $i-i$  входа КПи,  $i = 1, 2$  можно выразить в виде

$$\Gamma_i = R_{11i} + \frac{R_{12i}R_{21i}\delta_i\Gamma}{1 - R_{22i}\delta_i\Gamma}, \quad (8)$$

где  $\Gamma$  – ККО короткозамыкателя  $I2$  (см. рис. 1, з), выполненного в виде металлической пластины, снабженной ленточным выводом  $7$ ;  $\delta_i$  – прямой и обратный комплексный коэффициент передачи (ККП)  $i$ -го отрезка МПЛ  $\delta$  (см. рис. 1, б) КПКУ.

При  $\Gamma = -1$  из (8) найдем

$$\delta_i = (\Gamma_i - R_{11i}) / (\Delta_{R_i} - R_{22i}\Gamma_i), \quad (9)$$

где  $\Delta_{R_i} = R_{11i}R_{22i} - R_{12i}R_{21i}$ .

С учетом  $\delta_i$  (9)  $[R]_i$ -параметры (1), (2) и (7) можно пересчитать как

$$\begin{aligned} R_{11i} &= R_{11i}, R_{22i} = R_{22i}\delta_i, R_{12i} = \\ &= R_{21i} = \sqrt{R_{12i}R_{21i}}\delta_i. \end{aligned} \quad (10)$$

$[R]_i$ -параметры (10) применимы к конструкции КПКУ, показанной на рис. 1, б.

С учетом  $[R]_i$ -параметров  $S$ -параметры АК, измеренные в коаксиальных портах АЦ, можно представить в виде каскадного соединения  $S = f([R]_1, [S'], [R]_2)$ . Откуда  $S'$ -параметры АК, нормированные относительно волнового сопротивления  $Z_0$  согласованного микрополоскового калибратора, можно определить из выражений [3]

$$\begin{aligned} S'_{11} &= [R_{112}(R_{111}S_{22} - \Delta_S) + (S_{11} - R_{111})\Delta_{R_i}] / \Delta; \\ S'_{12} &= -R_{211}R_{212}S_{12} / \Delta; \\ S'_{21} &= -R_{121}R_{122}S_{21} / \Delta; \end{aligned} \quad (11)$$

$$S'_{22} = [R_{221}(R_{222}S_{11} - \Delta_S) + (S_{22} - R_{222})\Delta_{R_i}] / \Delta,$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_S &= S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}; \\ \Delta_{R_1} &= R_{111}R_{221} - R_{121}R_{211}; \\ \Delta_{R_2} &= R_{112}R_{222} - R_{122}R_{212}; \end{aligned}$$

$$\Delta = R_{112}(S_{22}\Delta_{R_1} - R_{221}\Delta_S) + (R_{221}S_{11} - \Delta_{R_1})\Delta_{R_2}.$$

Здесь последний индекс при  $[R]_i$ -параметрах определяет их принадлежность к входу ( $i=1$ ) или выходу ( $i=2$ ). Для  $S$ -параметров коаксиальных узлов  $S' = S$ .

Выражения (11) обеспечивают передачу результатов измерения  $S' = f(S)$ -параметров АК из коаксиального измерительного тракта АЦ в микрополосковый тракт.

**Конструкция и способ калибровки ЗКУ.** Конструкция ЗКУ [25] показана на рис. 3.

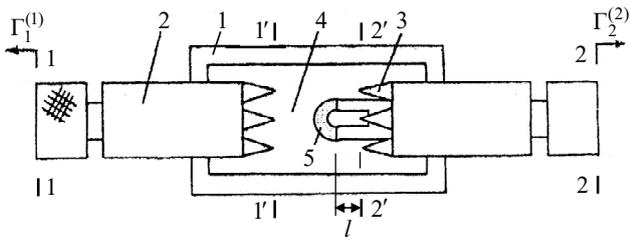


Рис. 3. Калибровка ЗКУ:

1 – основание; 2 – КПᵢ,  $i=1, 2$ ; 3 – зонд; 4 – короткозамыкатель; 5 – согласованная полосковая нагрузка

Калибровка ЗКУ, показанного на рис. 3, основана на измерении ККО  $\Gamma_1^{(1)}$  и  $\Gamma_1^{(2)}$  в плоскостях его входов  $i-i$ ;  $i=1, 2$  при подключении к нему в отсчетных плоскостях  $i'-i'$ ;  $i=1, 2$  совмещенных короткозамкнутого 4 и согласованного 5 калибраторов, а также на аналогичном измерении ККО  $\Gamma_i^{(3)}$  рассогласованного калибратора, состоящего из отрезка МПЛ с длиной  $l$ , нагруженного на рассогласованную микрополосковую нагрузку 5 [25]. При этом ККО короткозамкнутого, согласованного и рассогласованного калибраторов составляют  $\Gamma_i^{(m)} = \{-1; 0; \sim 0,4-0,5\}$  соответственно относительно отрезка МПЛ с волновым сопротивлением  $Z_0$ , где  $m=1, 2, 3$  – порядковый номер короткозамкнутого, согласованного и рассогласованного калибраторов.

Калибровку ЗКУ осуществляют в следующем порядке. К ЗКУ подключают совмещенный согласованно-короткозамкнутый калибратор 4, как показано на рис. 3. При этом во вспомогательной плоскости  $1'-1'$  зонды 3

КП₁ замкнуты металлизацией этого калибратора 4, а во вспомогательной плоскости  $2'-2'$  зонды 3 КП₂ нагружены на согласованный калибратор 5. После чего измеряют ККО  $\Gamma_i^{(m)}$ ;  $i, m=1, 2; i \neq j$  этих калибраторов в плоскостях  $i-i$  входов КПᵢ;  $i=1, 2$  при угле  $\alpha$  наклона КПᵢ к плоскости калибратора 4, составляющем  $\alpha \approx \pi/4$ . Далее к измерительным плоскостям  $i'-i'$  КПᵢ;  $i=1, 2$  подключают рассогласованный калибратор 5 и измеряют ККО  $\Gamma_i^{(3)}$  в плоскостях  $i-i$  входов КПᵢ;  $i=1, 2$ .

По измеренным ККО  $\Gamma_i^{(m)}$  определяют  $[R]_i$ -параметры ЗКУ по формулам

$$R_{11i} = \Gamma_i^{(1)};$$

$$R_{22i} = \frac{R_{11i} - \Gamma_i^{(3)} + (R_{11i} - \Gamma_i^{(2)})\Gamma_{ni}^{(3)}}{(\Gamma_i^{(2)} - \Gamma_i^{(3)})\Gamma_{ni}^{(3)}}; \quad (12)$$

$$R_{12i}R_{21i} = (R_{11i} - \Gamma_i^{(2)})(1 + R_{22i}).$$

Размеры полосковой нагрузки 5 могут быть определены по формуле [25, 26]

$$Z_n = \frac{R_s}{\pi} \ln(r_2 / r_1),$$

где  $Z_n$  – ее сопротивление;  $R_s$ ,  $r_1$  и  $r_2$  – поверхностное сопротивление ее резистивного слоя и его внутренний и внешний радиусы.

### Заключение

Конструкция и способ калибровки КПКУ представляют собой синтез конструкций ККУ и ПКУ, а также способов их калибровки [1–3, 23]. Они обеспечивают подключение к АЦ как коаксиальных мер и микрополосковых калибраторов, так и исследуемых АК, включая бескорпусные транзисторы. Кроме того, КПКУ обеспечивает высокую повторяемость подключения к нему коаксиальных мер и исследуемых АК, имеет малый собственный КСВ и потери. Для калибровки КПКУ используют минимальный набор легко рассчитываемых микрополосковых калибраторов с малыми потерями, что с учетом высокой повторяемости

их подключения снижает трудоемкость калибровки КПКУ и обеспечивает повышение точности передачи результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт примерно в 1,5–2 раза (подробные технические характеристики КПКУ приведены в работе [3]). Возможность передачи результатов измерения

из коаксиального тракта в микрополосковый тракт расширяет область действия Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) на последний. Предложенный способ калибровки КПКУ распространен на калибровку ЗКУ специализированным микрополосковым калибратором.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев С. В. Коаксиальное контактное устройство // Измерительная техника. – 2004. – № 4. – С. 65–68.
2. Заржецкая Н. В., Литовченко В. А. Коаксиальное контактное устройство и способ его калибровки / Интерэкспо Гео-Сибирь : XV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Наука. Оборона. Безопасность–2019» : сб. материалов (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 9. – С. 77–86.
3. Savel'kaev S. V., Danilevich S. B. Design and Quality Control of Microwave Devices Using Simulation and Measurement Methods: Theoretical basis for designing analyzers/simulators for microwave devices. – Cambridge Scholars Publishing, 2020. – 264 p.
4. Heuermann H., Schiek B. Line network network (LNN): at alternative in-fixture calibration procedure // IEEE Trans. – 1977 – Vol. MTT–45. – No. 3. – P. 408–413.
5. Техника измерения  $S$ -параметров СВЧ-транзисторов в полосковых линиях передачи с произвольным волновым сопротивлением / В. И. Евсеев, О. В. Лавричев, С. М. Никулин, В. В. Петров, А. С. Шипунов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2017. – № 4 (16). – С. 46–50.
6. Контактное устройство для контроля параметров интегральных структур и электронных компонентов в микрополосковых линиях передачи / О. В. Лавричев, Е. А. Лебедева, С. М. Никулин, В. В. Петров, А. А. Шипунов // Сборник статей Пятой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня). – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. Т. 1. – С. 310–314.
7. Филатов В. А., Щукин А. В., Бобкович П. И. Автоматизированный стенд для входного контроля пассивных компонентов СВЧ / 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» : материалы конференции (4–6 сентября 2016 г.). – Севастополь, Крым, 2016. – С. 1907–1912.
8. Официальный сайт Withwave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.withwave.com/t-probes> (дата обращения 14.06.2018).
9. Официальный сайт Integrated Device Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.idt.com> (дата обращения 14.06.2018).
10. Network Analysis Applying the 8510 TRL Calibration for Non-Coaxial Measurements [Electronic resource] : Technical Overview. USA: Keysight Technologies, 2014. – Mode of access: <http://www.keysight.com> (дата обращения 14.06.2016).
11. Horibe M. R., Kishikawa R. Metrological Traceability in Waveguide S-parameter Measurement at 1.0 THz band // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2013. – Vol. 62, No 6. – P. 1814–1820.
12. Chen L., Zhang C., Reck T. J., Arsenovic A., Bauwens M., Groppi C., Lichtenberger A. W., Weikle R. M., Barker N. S. Terahertz Micromachined On-Wafer Probes: Repeatability and Reliability // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No 9. – P. 2894–2902.
13. Hanning J., Stenarcon J., Yhland K., Sobis P. J., Bryllert T., Stake J. Single-Flange 2-Port TRL Calibration for Accurate THz S-parameter Measurements of Waveguide Integrated Circuits // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 4. – P. 582–587.
14. Hesler J. L., Duan Y., Foley B., Crowe T. W. THz Vector Network Analyzer Measurement and Calibration / 21st International Symposium on Space Terahertz Technology. – Oxford, 23–25 March, 2010. – P. 318–320.
15. Caglayan C., Georgios C. Trichopoulos, Sertel K. Non-Contact Probes for Device and Integrated Circuit Characterization in the THz and mmW Bands // Transactions on Microwave Symposium (IMS), 1–6 June, 2014. – P. 1–3.

16. Caglayan C., Trichopoulos G. C., Sertel K. Non-Contact Probes for On-Wafer Characterization of Sub-Millimeter-Wave Devices and Integrated Circuits // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – November 2014. – Vol. 62, No 11. – P. 2791–2801.
17. Dunsmore J., Cheng N., Zhang Y. Characterization of asymmetric fixtures with a two-gate approach // Proceedings of the 77th Microwave Measurement Conference (ARFTG), 10 June, 2011. – P. 1–6.
18. Yoon C., Tsiklauri M., Zvonkin M., Fan J., Drewniak J. L., Razmadze A., Aflaki A., Kim J., Chen Q. B. Design Criteria of Automatic Fixture Removal (AFR) for Asymmetric Fixture De-embedding // 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 4–8 Aug. 2015, Raleigh, North Carolina, USA. – P. 654–659.
19. PNA-X Series Microwave Network Analyzers [Electronic resource]. – USA : Keysight Technologies, 2015. – Mode of access: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02294/brochures/5990-4592.pdf>.
20. Vanel J. Improved Evaluation of Planar Calibration Standards Using the TDR Preselection Method // Acta Polytechnica. – 2007. – Vol. 47, No 4–5. – P. 102–106.
21. Scott J. B. Investigation of a Method to Improve VNA Calibration in Planar Dispersive Media Through Adding an Asymmetrical Reciprocal Device // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – Vol. 53, No 9. – P. 3007–3013.
22. Евсеев В. И., Лебедева Е. А., Никулин С. М., Петров В. В., Шипунов А. С. Технические средства для измерений параметров полосковых СВЧ-устройств // Датчики и системы. – 2016. – № 6 (204). – С. 23–27.
23. Савелькаев С. В., Литовченко В. А. Способ калибровки полоскового контактного устройства / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015 : XI Международный научный конгресс : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2014. Т. 3 – С. 37–41.
24. Zhu N. H. Phase uncertainty in calibrating microwave test fixtures // IEEE Trans. – 1999 – Vol. VTT-47, No. 10. – P. 1917–1922.
25. А.с. 11578667 СССР, Н 01 Р 5/08. Контактное устройство и калибровочная согласованная нагрузка / С.В. Савелькаев, А.П. Герасименко. – Оpubл. в Бюл. Открытия. Изобретения. – 1990. – № 26.
26. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. – М. : Радио и связь. – 1987. – 432 с.

Получено 27.07.2020

© С. В. Савелькаев, 2020

## UNIVERSAL COAXIAL-STRIPLINE AND PROBE TEST FIXTURES AND THEIR CALIBRATION METHODS

*Sergei V. Savelkaev*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special Devices, Innovations, and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: [sergei.savelkaev@yandex.ru](mailto:sergei.savelkaev@yandex.ru)

The design and calibration method for a coaxial-stripline test fixture that provides connection of microwave circuit analyzer of both coaxial measures and microstrip calibrators, as well as the active components under study, such as transistors, are considered. The test fixture provides high repeatability of connecting coaxial measures, microstrip calibrators, and active components being studied and has a small standing-wave ratio and loss. The test fixture is calibrated with using a minimal set of easily calculated microstrip calibrators with low losses, which, taking into account the high repeatability of their connection, reduces the complexity of its calibration and increases the accuracy of transmitting measurement results from the coaxial line to the microstrip line. The possibility of transmitting measurement results from the coaxial line to the microstrip line extends the scope of the State System for Ensuring the Uniformity of Measurements to the microstrip line. The design of the probe test fixture and a method of its calibration by a specialized microstrip calibrator are also given.

**Keywords:** coaxial-stripline and probe test fixtures, calibration method, transistor, S-parameters, transmission of measurement results from the coaxial line to the microstrip line

## REFERENCES

1. Savel'kaev, S. V. (2004). Coaxial test fixture. *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring Equipment]*, 4, 65–68 [in Russian].
2. Zarzhetskaya, N. V., & Litovchenko, V. A. (2019). Coaxial contact device and its calibration method. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2019: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 9. Nauka. Oborona. Bezopasnost'-2019 [Proceedings of Interekspo GEO-Siberia-2019: International Scientific Conference: Vol. 9. Science. Defense. Security-2019]* (pp. 77–86). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
3. Savel'kaev, S. V., & Danilevich, S. B. (2020). *Design and Quality Control of Microwave Devices Using Simulation and Measurement Methods: Theoretical basis for designing analyzers/simulators for microwave devices*. Cambridge Scholars Publishing, 264 p.
4. Heuermann, H., & Schiek, B. (1977). Line network network (LNN): at alternative in-fixture calibration procedure. *IEEE Trans., MTT-45*(3), 408–413.
5. Evseev, V. I., Lavrichev, O. V., Nikulin, S. M., Petrov, V. V., & Shipunov, A. S. (2017). Technique for measuring s-parameters of microwave transistors in strip transmission lines with arbitrary wave resistance. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony [Bulletin of Aerospace Defense]*, 4(16), 46–50 [in Russian].
6. Larichev, O. V., Lebedeva, E. A., Nikulin, S. M., Petrov, V. V., & Shipunov, A. A. (2016). Contact device for monitoring parameters of integrated structures and electronic components in microstrip transmission lines. In *Sbornik statey Pyatoy vserossiyskoy konferentsii: T. 1. Elektronika i mikroelektronika SVCh [Proceedings of the Fifth all-Russian Conference: Vol. 1. Electronics and Microelectronics of Microwave]* (pp. 310–314). Saint Petersburg: SPbGETU "LETI" Publ. [in Russian].
7. Filatov, V. A., Shchukin, A. V., & Bobkovich, P. I. (2016). Automated stand for input control of passive microwave components. In *Materialy 26-oy Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii: SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii [Proceedings of 26-th International Crimean Conference: Microwave Technology and Telecommunication Technologies]* (pp. 1907–1912). Sevastopol [in Russian].
8. Official website of Withwave. (n. d.). Retrieved from <http://www.with-wave.com/t-probes> (accessed 14.06.2018).
9. Official website of Integrated Device Technologies. (n. d.). Retrieved from <http://www.idt.com> (accessed 14.06.2018).
10. Network Analysis Applying the 8510 TRL Calibration for Non-Coaxial Measurements. Technical Overview. (2014). USA: Keysight Technologies. Retrieved from <http://www.keysight.com> (accessed 14.06.2016).
11. Horibe, M. R., & Kishikawa, R. (2013). Metrological Traceability in Waveguide S-parameter Measurement at 1.0 THz band. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(6), 1814–1820.
12. Chen, L., Zhang, C., Reck, T. J., Arsenovic, A., Bauwens, M., Groppi, C., Lichtenberger, A. W., Weikle, R. M., & Barker, N. S. (2012). Terahertz Micromachined On-Wafer Probes: Repeatability and Re-liability. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(9), 2894–2902.
13. Hanning, J., Stenarcon, J., Yhland, K., Sobis, P. J., Bryllert, T., & Stake, J. (2014). Single-Flange 2-Port TRL Calibration for Accurate THz S-parameter Measurements of Waveguide Integrated Circuits. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 4(4), 582–587.
14. Hesler, J. L., Duan, Y., Foley, B., & Crowe, T. W. (2010). THz Vector Network Analyzer Measurement and Calibration. *21-st International Symposium on Space Terahertz Technology* (pp. 318–320). Oxford.
15. Caglayan, C., & Georgios, C. (2014). Trichopoulos and Sertel K. Non-Contact Probes for Device and Integrated Circuit Characterization in the THz and mmW Bands. *Transactions on Microwave Symposium (IMS)* (pp. 1–3).
16. Caglayan, C., Trichopoulos, G. C., & Sertel, K. (2014). Non-Contact Probes for On-Wafer Characterization of Sub-Millimeter-Wave Devices and Integrated Circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 62(11), 2791–2801.
17. Dunsmore, J., Cheng, N., & Zhang, Y. (2011). Characterization of asymmetric fixtures with a two-gate approach. *Proceedings of the 77-th Microwave Measurement Conference (ARFTG)* (pp. 1–6).
18. Yoon, C., Tsiklauri, M., Zvonkin, M., Fan, J., Drewniak, J. L., Razmadze, A., Aflaki, A., Kim, J., & Chen, Q. B. (2014). Design Criteria of Automatic Fixture Removal (AFR) for Asymmetric Fixture De-embed-

ding. 2014 *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)* (pp. 654–659). Raleigh, North Carolina, USA.

19. PNA-X Series Microwave Network Analyzers. (2015). USA: Keysight Technologies. Retrieved from <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02294/brochures/5990-4592.pdf>.

20. Vanel, J. (2007). Improved Evaluation of Planar Calibration Standards Using the TDR Preselection Method. *Acta Polytechnica*, 47(4–5), 102–106.

21. Scott, J. B. (2004). Investigation of a Method to Improve VNA Calibration in Planar Dispersive Media Through Adding an Asymmetrical Reciprocal Device. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(9), 3007–3013.

22. Evseev, V. I., Lebedeva, E. A., Nikulin, S. M., Petrov, V. V., & Shipunov, A. S. (2016). Technical means for measuring parameters of strip microwave devices. *Datchiki i sistemy [Sensors and Systems]*, 6(204), 23–27 [in Russian]

23. Savel'kaev, S. V., & Litovchenko, V. A. (2015). Method of calibration of a strip contact device. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Siboptika-2015 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 3. Siboptika-2015]* (pp. 37–41). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

24. Zhu, N. H. (1999). Phase uncertainty in calibrating microwave test fixtures. *IEEE Trans.*, VTT-47(10), 1917–1922.

25. Saveliev, S. V., & Gerasimenko, A. P. (1990). Contact device and calibration coordinated loading. A. S. 11578667 USSR, N 01 R 5/08. *Openings Inventions*, 26.

26. Gupta, K., Garj, R., & Chadha, R. (1987). *Mashinnoe proektirovanie SVCh-ustroystv [Machine design of microwave devices]*. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 432 p. [in Russian].

Received 27.07.2020

© S. V. Savelkaev, 2020