

КОАКСИАЛЬНОЕ КОНТАКТНОЕ УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ЕГО КАЛИБРОВКИ

Наталья Викторовна Заржецкая

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630136, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (913)456-07-97, e-mail: zarjetskaya@yandex.ru

Владимир Анатольевич Литовченко

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, начальник инструкторской группы кафедры разведки (и воздушно-десантной подготовки), тел. (383)332-50-45, e-mail: litovchienko.vladimir@mail.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, тел. (923)100-89-86

Предложено коаксиальное контактное устройство для подключения к анализатору СВЧ-цепей как коаксиальных мер при калибровке анализатора, так и исследуемых полосковых узлов при измерении их S-параметров. Кроме того, предложен способ калибровки этого устройства одним или двумя расчетными полосковыми калибраторами, обеспечивающий перенос результатов калибровки анализатора коаксиальными мерами на измерение S-параметров полосковых узлов.

Ключевые слова: коаксиальное контактное устройство, калибровка, измерение S-параметров.

COAXIAL CONTACT DEVICE AND METHOD OF CALIBRATION

Natalya V. Zarzhetskaya

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Special-Purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (913)456-07-97, e-mail: zarjetskaya@yandex.ru

Vladimir A. Litovchenko

Novosibirsk Higher Military Command School, 49, Ivanova St., Novosibirsk, 630117, Russia, Head of Instructor Group, Department of Educational Intelligence (and Airborne Training), phone: (383)332-50-45, e-mail: litovchienko.vladimir@mail.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, phone: (923)100-89-86

A coaxial contact device for connection to the microwave transition analyzer is proposed as coaxial measures for calibrating the analyzer, and the investigated strip line junctions for measuring their S-parameters. In addition, a method for calibrating this device with one or two calculated coaxial-to-stripline calibrators, providing the transfer of the results of calibration of the analyzer by coaxial measures to the measurement of S-parameters of the strip line junctions is presented.

Key words: coaxial contact device, calibration, measurement of S-parameters of strip line junctions.

Введение

Для калибровки анализаторов СВЧ-цепей (АЦ) [1] используют наборы однотипных стандартизированных мер отражения и проходных мер, например, коаксиальные или волноводные.

Исследуемые узлы могут иметь большое разнообразие типов входных трактов и чаще всего полосковых, для которых нет ни одного набора стандартизированных мер. Это приводит к необходимости разработки контактных устройств (КУ) [2-8] для подключения таких узлов к АЦ и способов калибровки КУ [2, 4, 8-10], обеспечивающих перенос результатов калибровки АЦ стандартизированными мерами на измерение S -параметров полосковых узлов.

В работах [2, 3] предложены конструкции и способы калибровки полосковых контактных устройств (ПКУ). Одним из существенных недостатков ПКУ является то, что они не обеспечивают подключение к АЦ стандартизированных мер при калибровке АЦ, что требует демонтажа ПКУ. К другим недостаткам ПКУ относятся плохая повторяемость подключения к ним расчетных полосковых калибраторов при калибровке ПКУ и исследуемых полосковых узлов при измерении их S -параметров, а также значительный собственный коэффициент стоячей волны (КСВ) и потери.

Методы и материалы

В статье предложено коаксиальное контактное устройство (ККУ) [4-7] для подключения к АЦ как коаксиальных мер при калибровке АЦ, так и исследуемых полосковых узлов при измерении их S -параметров. Кроме того, предложен способ калибровки ККУ [4, 9] одним или двумя расчетными полосковыми калибраторами, обеспечивающий перенос результатов калибровки АЦ коаксиальными мерами на измерение S -параметров полосковых узлов.

Конструкция. Предлагаемое ККУ показано на рис. 1. ККУ содержит основание 1, на котором установлены коаксиальные переходы (КП) 2 с возможностью их перемещения вдоль центральной оси. Каждый из КП 2 снабжен контактной головкой 3, которая введена в его осевое отверстие с возможностью ее осевого перемещения и закрепления фиксаторами 4 в рабочем положении, как показано на рис. 1. Между КП 2 установлен съемный пьедестал 5, на котором закреплен исследуемый полосковый узел 6, подключение которого к КП 2 осуществляется подпружиненными цапгами 7 контактных головок 3. Полное введение контактных головок 3 в осевые отверстия КП 2 приводит к перекрытию «тромбонов» 8, образованных КП 2 и контактными головками 3, что исключает возможность излучения СВЧ-энергии при подключении узла 6. Возможность замены контактных головок 3 и пьедестала 5 обеспечивает подключение к ККУ узлов в виде планарных структур с различными базовыми длинами l , соответствующими расстоянию между плоскостями 1-1' и 2-2' подключения этих узлов. Так, например, на рис. 1, а показано подключение полевого транзистора

с барьером Шоттки (ПТБШ) 6, а на рис. 1, б – отрезка микрополосковой линии (МПЛ) 9, в которую включен кристалл 10 безкорпусного транзистора. Выбор требуемой базовой длины l осуществляется путем замены пьедестала 5. Возможность осевого перемещения контактных головок 3 при подключении узла 6 исключает необходимость перемещения КП 2 а, следовательно, погрешность измерений, вносимую деформациями кольцевого измерительного канала АЦ. Этому также способствует пьедестал аналогичный пьедесталу 5, снабженный проходной коаксиальной мерой для калибровки АЦ «на проход» с длиной l меры равной базовой длине узла 6. При малой длине l калибровку АЦ «на проход» осуществляют при непосредственном соединении плоскостей 1-1' и 2-2' входов КП 2. При этом соединение центральных проводников контактных головок 3 осуществляется подпружиненной цангой 7 с большим усилием пружины, а внешних проводников – с помощью одной из подвижных резьбовых втулок 11.

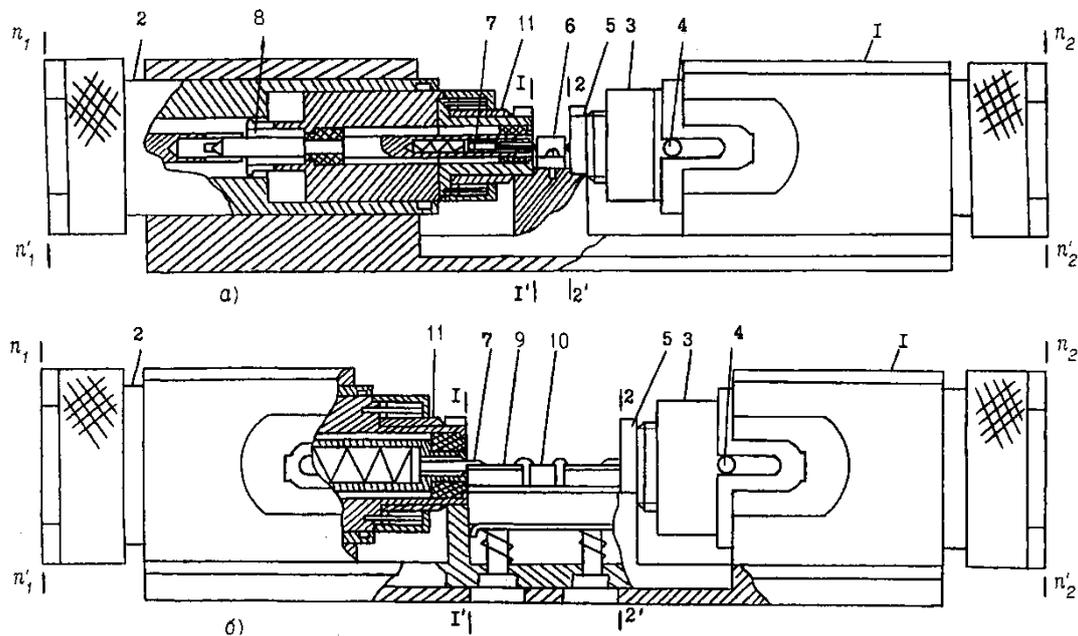


Рис. 1. Коаксиальное контактное устройство

Технические характеристики ККУ:

Диапазон рабочих частот: 0,1-18 ГГц.

Потери на КП: не более 0,5 дБ.

КСВ: не более 1,15.

Тип подключаемых узлов:

устройства с коаксиальными разъемами 3,5/1,5 мм;

транзисторы в корпусах КТ-21, КТ-22, КТ-47, 048-03 и 048-04;

полосковые структуры с базовой длиной 5, 12, 24 и 48 мм.

Погрешность, вносимая ККУ из-за неповторяемости подключения

Модуля: не более 1%, фазы: не более 1 град.

Габариты: 220x45x45 мм.

Способ калибровки. Возможность подключения коаксиальных мер 12 к АЦ посредством КП 2 позволяет осуществить калибровку АЦ относительно плоскостей $i-i'$ входов КП 2 (рис. 2).

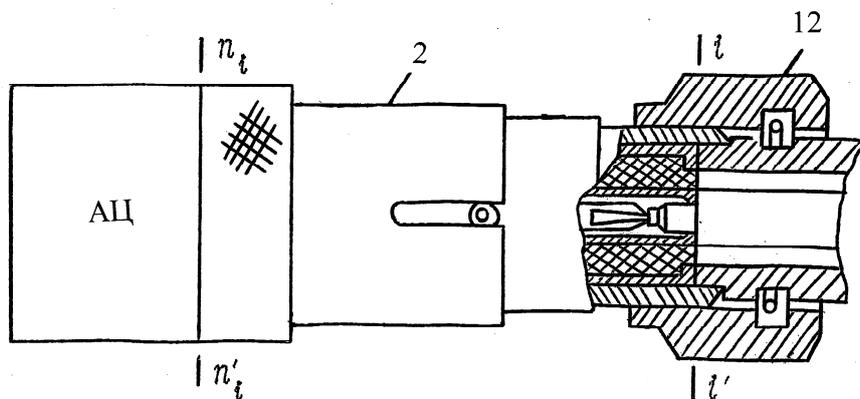


Рис. 2. Калибровка АЦ

Для переноса результатов калибровки АЦ коаксиальными мерами на измерение S -параметров полосковых узлов необходима калибровка КП 2 расчетными полосковыми калибраторами, например, отрезками МПЛ с волновым сопротивлением Z_0 , нагруженными на согласованные нагрузки $Z_H = Z_0$, или проходными микрополосковыми калибраторами в виде двух отрезков МПЛ с волновым сопротивлением Z_0 , имеющих различную длину l_k (рис. 3), где $k = 1, 2$ – индекс проходного микрополоскового калибратора.

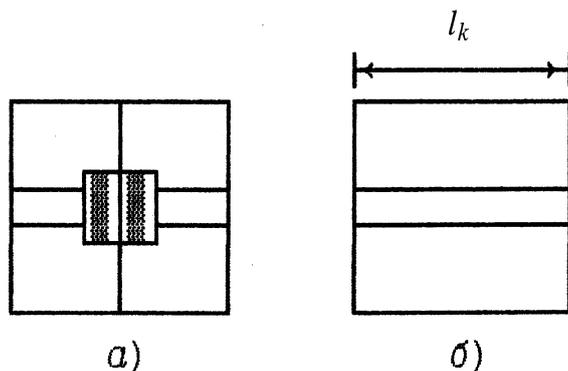


Рис. 3. Согласованный (а) и проходной (б) микрополосковые калибраторы

Конструктивное различие КП 2 (рис. 2), и согласованного микрополоскового калибратора (рис. 3, а), приводит к тому, что комплексные коэффициенты отражения (ККО) Γ_i^0 этого калибратора в плоскостях $i - i'$ подключения его

к входам КП 2 не равны нулю $\Gamma_i^0 \neq 0$ (рис. 4, а). Это требует введения в рассмотрение вспомогательных плоскостей $B_i - B_i'$ соответствующих плоскостям входов согласованного микрополоскового калибратора, в которых его ККО $\Gamma_i^0 = 0$. Введение этих плоскостей требует включения между ними и плоскостями $i - i'$ 4-х-полюсника переноса с неизвестными R_i -параметрами рассеяния (рис. 4), где $S_{ijk} = C_k \exp(\varphi_{ijk})$ - S_k - параметры k -го проходного микрополоскового калибратора; C_k и $\varphi_{ijk} = -j\beta l_k$ - их модуль и фаза; $\beta = 2\pi/\lambda$ и $\lambda = c/\sqrt{\varepsilon_3} f$ - фазовая постоянная и длина волны в отрезках МПЛ согласованного и проходных микрополосковых калибраторов; ε_3 - эффективная диэлектрическая проницаемость МПЛ.

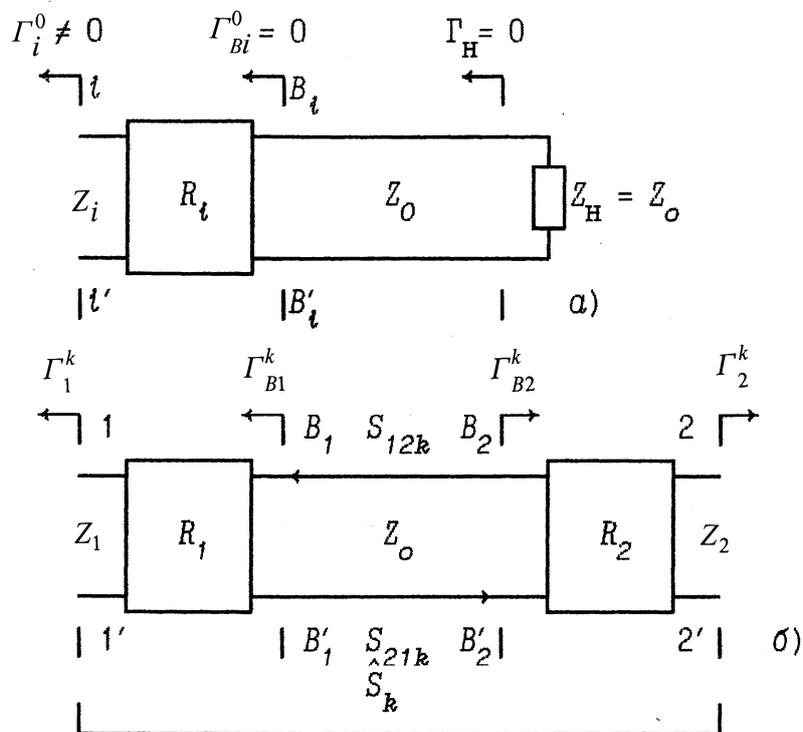


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения ККУ при включении в него согласованного (а) и проходного (б) микрополосковых калибраторов

Таким образом, задача калибровки ККУ решается посредством измерения ККО Γ_i^0 или \hat{S}_k -параметров в плоскостях $i - i'$ входов КП 2 при подключении к ним согласованного микрополоскового калибратора или поочередного под-

ключения двух проходных микрополосковых калибраторов, имеющих длину l_k , с последующим определением R_i -параметров 4-х-полосников переноса. По измеренным ККО Γ_i^0 или \hat{S}_k -параметрам R_{11i} -параметры можно определить как в [10]:

$$R_{11i} = \Gamma_i^0,$$

$$R_{11i} = (\hat{S}_{ijj}\hat{S}_{iji}e^{j\beta l_j} - \hat{S}_{iii}\hat{S}_{ijj}e^{j\beta l_i}) / (\hat{S}_{iji}e^{j\beta l_j} - \hat{S}_{ijj}e^{j\beta l_i}), \quad (1)$$

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

Для определения недостающих R_{21i} и R_{22i} -параметров 4-х -полосники переноса (рис. 4), были представлены параллельной проводимостью Y_{Ri} . 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:

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

где r_i – ненормированные параметры рассеяния 4-х - полюсников переноса.

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

$$U_{1i}^+ [(1 - r_{21i}) + r_{11i}] = U_{2i}^+ [(1 - r_{12i}) + r_{22i}]. \quad (3)$$

Уравнение (3) имеет решение:

$$r_{12i} = 1 + r_{11i}, r_{21i} = 1 + r_{22i}, \quad (4)$$

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

$$R_{12i} = (1 + R_{22i})\sqrt{Z_0 / Z_i}, \quad R_{21i} = (1 + R_{11i})\sqrt{Z_i / Z_0}, \quad (5)$$

где Z_i – волновое сопротивление КП 2, равное волновому сопротивлению коаксиальных мер, используемых при калибровке АЦ.

Применяя к (5) условие взаимности $R_{12i} = R_{21i}$, определим недостающие R_{12i} , R_{21i} и R_{22i} -параметры:

$$R_{12i} = R_{21i} = (1 + R_{11i})\sqrt{Z_i / Z_0}, \quad R_{22i} = (1 + R_{11i})Z_i / Z_0 - 1. \quad (6)$$

Калибровку ККУ при измерении S -параметров предпочтительнее выполнять двумя проходными микрополосковыми калибраторами, а при измерении Γ -параметров – согласованными (рис. 3). Причем, нормировка (6) R_i -параметров может быть осуществлена относительно произвольного волнового сопротивления Z_0 согласованного микрополоскового калибратора и двух проходных микрополосковых калибраторов, выбранных для калибровки ККУ.

Таким образом, предложен способ калибровки ККУ, описывающийся математической моделью (1) и (6).

Определение S -параметров. В общем случае ККУ с включенным в него исследуемым полосковым узлом представляет собой каскадное соединение 4-х-полюсников с $\hat{S} = f(R_1, S, R_2)$ -параметрами.

S -параметры узла можно определить из выражений [4, 11–19]:

$$\begin{aligned} S_{11} &= [R_{112}(R_{111}\hat{S}_{22} - \hat{\Delta}_S) + (\hat{S}_{11} - R_{111})\Delta_{R2}] / \Delta_S, \\ S_{12} &= -R_{211}R_{212}\hat{S}_{12} / \Delta_S, \\ S_{21} &= -R_{121}R_{122}\hat{S}_{21} / \Delta_S, \\ S_{22} &= [R_{221}(R_{222}\hat{S}_{11} - \hat{\Delta}_S) + (\hat{S}_{22} - R_{222})\Delta_{R1}] / \Delta_S, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_S &= \hat{S}_{11}\hat{S}_{22} - \hat{S}_{12}\hat{S}_{21}; \\ \Delta_{R1} &= R_{111}R_{221} - R_{121}R_{211}; \\ \Delta_{R2} &= R_{112}R_{222} - R_{122}R_{212}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta_S = R_{112}(\hat{S}_{22}\Delta_{R1} - R_{221}\hat{\Delta}_S) + (R_{221}\hat{S}_{11} - \Delta_{R1})\Delta_{R2};$$

\hat{S}_{ii} и \hat{S}_{ij} – \hat{S} -параметры узла, измеренные в плоскостях $i-i'$ его подключения к ККУ.

Выражения (7) обеспечивают перенос результатов калибровки АЦ коаксиальными мерами на измерение S -параметров полосковых узлов. При измерении S -параметров коаксиальных узлов $S = \hat{S}$.

Заключение

Предложенное ККУ [20–27] имеет более широкие функциональные возможности в сравнении с ПКУ. ККУ обеспечивает подключение к АЦ как коаксиальных мер, так и исследуемых полосковых узлов с разнообразными типами входных полосковых трактов. Кроме того, ККУ обеспечивает высокую повторяемость подключения к нему коаксиальных мер и исследуемых полосковых узлов, имеет малый собственный КСВ и потери. Для калибровки ККУ используется минимальный набор легко рассчитываемых микрополосковых калибраторов, что с учетом высокой повторяемости их подключения уменьшает погрешность измерения вносимую ККУ в сравнении с ПКУ в 2–3 раза.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь и поддержку своему научному руководителю, Савелькаеву Сергею Викторовичу, д.т.н., профессору СГУГиТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев, С.В. Теоретические основы построения адаптивных цифровых анализаторов СВЧ-цепей // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. - 1991. - Вып. 9. - С. 34 - 39.
2. А.с. 1478156 СССР, G 01 R 27/28. Держатель транзисторов в устройствах для измерения электрических параметров/В.П. Петров, С.В. Савелькаев. - Оpubл. Бюл.//Открытия. Изобретения. - 1989. - №17.
3. А.с. 1682942 СССР, G 01 R 27/28. Держатель транзисторов в устройствах для измерения электрических параметров/В.П. Петров, С.В. Савелькаев, А.В. Борисов. - Оpubл. Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1991. - №37.
4. Савелькаев, С.В. Коаксиальное контактное устройство / С.В. Савелькаев // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. - 1991.- Вып.6. - С. 30 - 33.
5. А.с. 1436152 СССР, H 01 P 5/08. Контактное устройство / С.В. Савелькаев. - Оpubл. Бюл. // Открытия. Изобретения. – 1988. - №41.
6. А.с. 1608762 СССР, H 01 P 5/08. Контактное устройство / С.В. Савелькаев. - Оpubл. Бюл.//Открытия. Изобретения. - 1990. - №43.
7. А.с. 1584001 СССР, H 01 P 5/08. Контактное устройство / С.В. Савелькаев, А.П. Герасименко. - Оpubл. Бюл.//Открытия. Изобретения. - 1990. - №29.
8. А.с. 11578667 СССР, H 01 P 5/08. Контактное устройство и калибровочная согласованная нагрузка/С.В. Савелькаев, А.П. Герасименко. - Оpubл. в Бюл. // Открытия. Изобретения. – 1990. - №26.
9. А.с. 1774286 СССР, G 01 R 27/28. Способ калибровки коаксиального устройства/ С.В. Савелькаев. - Оpubл. Бюл. // Открытия. Изобретения, - 1992. - №41.
10. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. – М.: Радио и связь, 1987 – 432 с.

11. Теоретические основы построения имитатора-анализатора активных СВЧ-цепей / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 175–188.
12. Теоретические основы построения имитатора-анализатора активных СВЧ-цепей / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Успехи современной радиотехники. – 2017. – № 2. – С. 50–61.
13. Теоретические основы построения имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Известия высших заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – Вып. 1. – С. 63–74.
14. Савелькаев С. В., Заржецкая Н. В. Расчет и проектирование автогенераторов СВЧ в пространстве S-параметров // Известия высших заведений России. Радиоэлектроника. – 2016. – Вып. 1. – С. 41–53.
15. Полупроводниковые входные устройства СВЧ / Под редакцией В. С. Эткина. – М. : Сов. Радио, 1975, Т. 1. – 344 с.
16. Савелькаев С. В., Ромасько С. В., Литовченко В. А. Математическая модель имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Национ. науч. конф. «Наука. Оборона. Безопасность-2017» : сб. материалов (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 131–137.
17. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S-параметров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 164–171.
18. Литовченко В. А. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S-параметров // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 90–100.
19. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Трехсекционная дрейфово-диффузионная математическая модель полевого транзистора с барьером шоттки // Вестник НГУ. Серия: Физика твердого тела, полупроводников наноструктур. – 2015. – Том 10, № 1. – С. 57–62.
20. Савелькаев С. В., Литовченко В. А. Способ калибровки полоскового контактного устройства // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 37–41.
21. Савелькаев С. В., Литовченко В. А. Методика расчета автогенератора СВЧ, в пространстве S-параметров // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2016. – № 8. – С. 36–46.
22. Метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 5. – С. 224–228.
23. Анализ высокоточных методов измерения параметров отражения в коаксиальных трактах / С. В. Владимирова, Ю. А. Пальчун [и др.] // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 856–862.
24. Владимирова С. В., Пальчун Ю. А., Колпаков А. В. Использование интерполирующих и экстраполирующих функций для определения межповерочного интервала коаксиальных мер // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 5, ч. 2. – С. 127–129.
25. Владимирова С. В., Пальчун Ю. А. Алгоритмические методы определения функции поправки по модулю при измерении параметров отражения // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. – С. 261–263.

26. Ромасько С. В. Методика определения коэффициентов интерполяции и экстраполяции СВЧ мер ослабления по модулю коэффициента отражения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 127–129.

27. Савелькаев С. В., Литовченко В. А. Вариационная методика оценки суммарной погрешности измерения имитаторов-анализаторов усилителей и автогенераторов СВЧ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Наука. Оборона. Безопасность-2018» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 3–12.

© Н. В. Заржецкая, В. А. Литовченко, 2019