

Экспериментальная проверка методов измерения параметров коаксиально-волноводных узлов с поперечным сечением сложной формы

А. Крылов¹

УДК 621.31 | ВАК 05.11.08

В восьмом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2016 год [1] был представлен анализ методов измерения параметров невстраиваемых двухпортовых устройств, с одной стороны которых расположен волновод нестандартного сечения, а с другой – стандартный коаксиальный разъем. Измерение параметров проводилось с использованием векторного анализатора цепей (ВАЦ) семейства PNA компании Keysight Technologies. Было отмечено, что наибольший практический интерес представляют методы калибровки ВАЦ «неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой» (Unknown Thru with Offset Load) и «исключение адаптера» (Adapter Removal), поскольку для их использования не требуется аттестованная волноводная нагрузка.

В рамках данной публикации представлены результаты экспериментальной проверки указанных методов, полученные при измерении частотных параметров коаксиально-волноводного перехода (КВП) с гребневым волноводом П-образного сечения, выполненного в соответствии с отраслевым стандартом [2, 3], в диапазоне частот 7,5–18 ГГц. Дополнительно в рамках статьи рассматриваются подходы к оценке неопределенности полученных результатов измерений.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕР ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ВОЛНОВОДА ГРЕБНЕВОГО П-СЕЧЕНИЯ

Калибровка ВАЦ в плоскости гребневого волновода требует использования волноводных калибровочных мер. Отсутствие на рынке комплектов мер для калибровки ВАЦ в волноводных трактах П-образного сечения, выполненных в соответствии с российскими стандартами, вызывает необходимость расчета и изготовления калибровочных мер для соответствующего типа сечения волновода.

Расчет волноводных мер производился исходя из требований, предъявляемых каждым из рассматриваемых методов калибровки.

Метод калибровки «неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой» является разновидностью SOLT («короткое замыкание – холостой ход – согласованная нагрузка – перемычка») калибровки. Поскольку применение меры холостого хода для волновода не представляется возможным, выполнение калибровки методом «неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой» предусматривает

использование элементов смещения (OFFSET Standards) различной длины совместно с нагрузкой короткого замыкания. Элементы смещения представляют собой отрезки волноводов, электрическая длина которых должна отличаться на $\lambda_v/4$ (где λ_v – длина волны в волноводе на центральной рабочей частоте (H_{10})). Метод смещенной нагрузки не требует использования аттестованной волноводной нагрузки для проведения калибровки волноводного тракта.

Метод калибровки «исключение адаптера» позволяет использовать TRL («перемычка – отражение – задержка») калибровку для волновода. Классический алгоритм TRL-калибровки предъявляет требование к физической длине меры LINE для обеспечения ее фазовой длины в пределах 20–160° относительно длины меры THRU в полосе частот волновода. Поскольку коэффициент перекрытия для П-волновода с сечением 16,6 × 7,5 мм составляет 2,4, то возможно использование одной меры LINE для калибровки в рабочем диапазоне частот волновода. Как правило, оптимальная длина меры LINE составляет $\lambda_v/4$.

Для рассматриваемых методов калибровки ВАЦ геометрические размеры мер OFFSET и LINE являются эталоном

¹ ООО «Кейсайт Текнолоджиз», инженер по поддержке оборудования, тел.: +7 831 425-80-60, andrey.krivilov@keysight.com.

волнового сопротивления калибруемого волноводного тракта и устанавливают характеристический импеданс волноводного тракта измерительной системы.

Поскольку волновод является дисперсионной средой, для расчета длины волны в волноводе на центральной рабочей частоте (λ_B) использовался метод баланса фаз:

$$\lambda_B = 2 \cdot \left(\frac{\lambda_{гв} \cdot \lambda_{гн}}{\lambda_{гв} + \lambda_{гн}} \right), \quad (1)$$

где $\lambda_{гн}$ – длина волны в волноводе на нижней рабочей частоте волновода,

$\lambda_{гв}$ – длина волны в волноводе на верхней рабочей частоте волновода.

Расчет длин волн в волноводе (λ_{gi}) на нижней и верхней рабочей частоте П-волновода с сечением 16,6×7,5 мм производился по формуле [4]:

$$\lambda_{gi} = \frac{c}{f_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{f_{кр}}{f_i} \right)^2}}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме;

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздуха);

$f_{кр}$ – критическая частота для основного типа волн П-волновода.

Проверка фазового сдвига (φ) на длине $\lambda_B/4$ для граничных рабочих частот выполнялась с использованием соотношения [5]:

$$\varphi = \frac{360 \cdot \lambda_B / 4}{\lambda_{gi}}. \quad (3)$$

Задержка (d) может быть рассчитана по формуле:

$$d = \frac{\lambda_B / 4}{c / \sqrt{\epsilon_r}}. \quad (4)$$



Рис. 1. Изготовленные меры: короткого замыкания SHORT (она же REFLECT) (слева), проходная LINE (она же OFFSET) (справа)

Результаты расчета параметров проходной волноводной меры с сечением 16,6×7,5 мм приведены в табл. 1. Полученные результаты показывают, что расчетные значения длины и фазового сдвига для мер OFFSET и LINE удовлетворяют требованиям каждого из методов калибровки.

Для эксперимента была изготовлена мера LINE длиной 6 мм. Как можно видеть из табл. 1, длина используемой меры LINE также удовлетворяет условию обеспечения фазовой длины (фазовая длина меры THRU принималась равной нулю).

Методы калибровки SOLT и TRL используют нагрузку короткого замыкания (SHORT – для SOLT-калибровки, REFLECT – для TRL-калибровки). Мера REFLECT необходима для обеспечения одинакового (но не обязательно известного) значения коэффициента отражения в волноводных плоскостях калибровки ВАЦ. Мера SHORT должна обеспечивать известное значение коэффициента отражения, описываемое полиномиальной моделью паразитной индуктивности. Обычно для волноводной меры SHORT паразитная индуктивность является незначительной и принимается равной нулю. Технологически, волноводная нагрузка короткого замыкания реализуется в виде фланца волновода (без прорезки).

Меры LINE и SHORT изготавливались из латуни с использованием электроискрового метода обработки. Изготовленные меры представлены на рис. 1.

Измерение фазового сдвига для изготовленной меры LINE выполнялось по результатам проведения двухпортовой TRL-калибровки ВАЦ в волноводном тракте. Результаты измерения фазы коэффициента передачи S_{21} меры LINE представлены на рис. 2. Как можно видеть из рисунка, измеренные фазовые характеристики меры

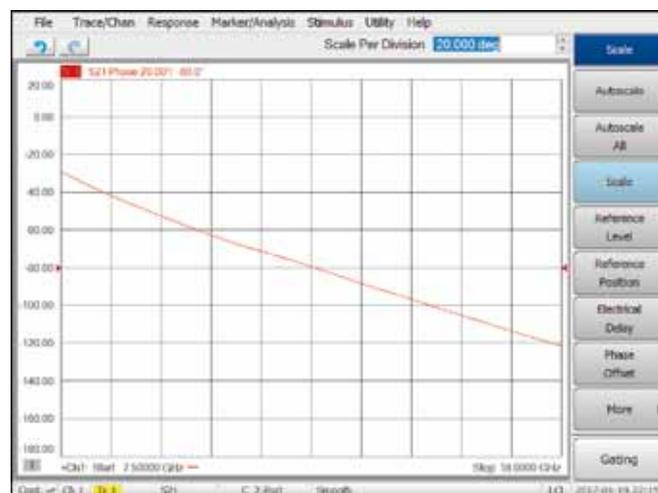


Рис. 2. Фаза коэффициента передачи изготовленной меры LINE

Таблица 1. Результаты расчета параметров проходной волноводной меры LINE (она же OFFSET)

Параметр	Обозначение	Значение*	
Скорость света в вакууме, м/с	c	$2,997 \cdot 10^8$	
Относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздух)	ϵ_r	1	
Нижняя рабочая частота, ГГц	f_n	7,5	
Верхняя рабочая частота, ГГц	f_v	18	
Критическая частота для основного типа волн, ГГц	$f_{кр}$	6,213	
Центральная частота, ГГц	–	12,241	
Длина волны на нижней рабочей частоте, мм	λ_{gn}	71,347	
Длина волны на верхней рабочей частоте, мм	λ_{gv}	17,740	
Длина волны на центральной частоте, мм	λ_v	28,415	24,000
Длина волны на центральной частоте/4 (длина меры), мм	$\lambda_v/4$	7,103	6,000
Фазовый сдвиг для нижней рабочей частоты, °	φ_n	35,844	30,274
Фазовый сдвиг для верхней рабочей частоты, °	φ_v	144,155	121,755
Задержка, пс	d	23,703	20,020

* В последних строках в графе «Значение» два столбца соответствуют различным длинам меры. В левом столбце указана длина, полученная в ходе расчета (7,103 мм), в правом – длина меры, которая была изготовлена (6 мм). Далее для изготовленной меры был проведен расчет фазового сдвига и задержки.

хорошо согласуются с расчетными значениями, представленными в табл. 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕР

Номинальные значения внутренних размеров П-образного волновода с сечением 16,6 × 7,5 мм, согласно [3], представлены в табл. 2. С использованием двухкоординатного измерительного прибора ДИП-1 были проведены измерения отклонений внутренних размеров меры LINE от номинальных размеров. Результаты измерений также представлены в табл. 2, из которой видно, что внутренние

размеры изготовленной меры LINE лежат в пределах допустимых значений.

Отклонения внутренних размеров меры LINE влияют на точность калибровки ВАЦ, поэтому необходимо установить степень влияния измеренных отклонений на электрические параметры волноводного тракта. В первом приближении можно провести оценку коэффициента отражения от стыка волноводов, один из которых имеет номинальные значения внутренних размеров, а второй – внутренние размеры с учетом отклонений. Подобный анализ выполнялся с использованием программного обеспечения 3D электромагнитного моделирования

Таблица 2. Номинальные и измеренные значения внутренних размеров меры LINE

Параметр	Обозначение	Размеры, мм (согласно [3])	Допуск ±, мм (согласно [3])	Измеренное значение, мм	Δ, мм
Длина узкой стенки	b	7,493	0,064	7,460	0,033
Длина широкой стенки	a	16,637	0,064	16,603	0,034
Высота выступа	d	3,124	0,025	3,108	0,016
Радиус скругления выступа	R_2	0,635	–	0,580	0,055
Ширина выступа	s	2,578	0,025	2,590	–0,012

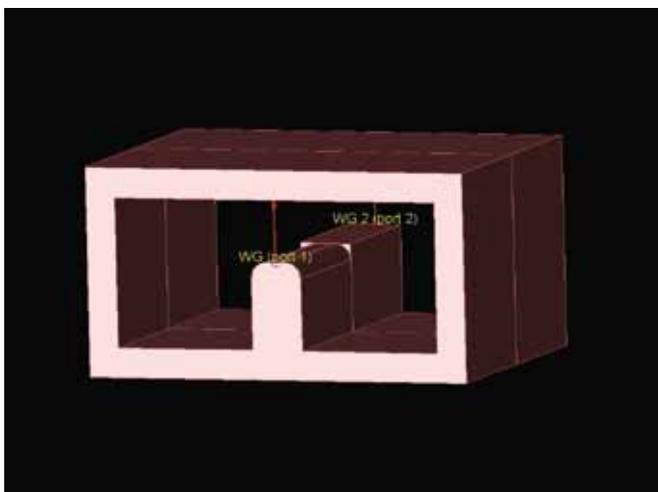


Рис. 3. Моделируемый волноводный стык в САПР EMPro (радиус скругления выступа изменен)

Keysight EMPro. Проводилось 3D электромагнитное моделирование стыка П-волновода 16,6×7,5 мм с номинальными внутренними размерами с волноводом, имеющим либо положительное, либо отрицательное отклонение от номинального размера (рис. 3). Волноводные плоскости были соединены симметрично, зазоры между плоскостями и вращение в плоскости сочленения отсутствовали.

Моделирование стыка производилось при использовании метода конечных элементов (FEM). Разбиение сетки – адаптивное. Для моделирования стыка использовались волноводные порты, работающие в режиме основного тона H_{01} . Условием сходимости являлось наибольшее значение разности между параметрами рассеяния (ΔS), полученными на двух последовательных итерациях [6]:

$$\Delta S = \Delta S^f = \max_{i,j} |S_{i,j}^f - S_{i,j}^{f'}|, \quad (5)$$

где i, j – элементы матрицы рассеяния;

$S_{i,j}^f$ – значение параметра рассеяния на частоте f , полученное на текущей итерации;

$S_{i,j}^{f'}$ – значение параметра рассеяния на частоте f , полученное на предыдущей итерации.

Значение ΔS задавалось равным 0,0002. Ожидаемая точность получаемых S -параметров находится на уровне:

$$20 \log_{10}(0,0002) = -73,979 \text{ дБ}. \quad (6)$$

На рис. 4 представлены частотные зависимости максимальных значений амплитуд коэффициента отражения, полученные при отклонении номинальных значений внутренних размеров волновода на величину допуска. Анализ данных кривых позволяет сделать вывод, что наибольшее увеличение $|\Gamma|$ вызвано отклонениями в геометрии

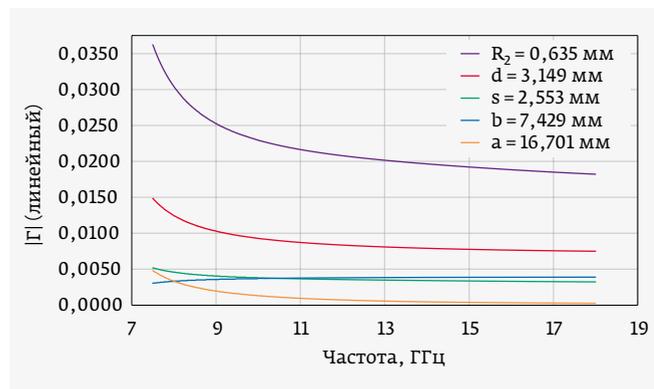


Рис. 4. Частотные зависимости максимальных значений амплитуд коэффициента отражения $|\Gamma|$ от стыка волновода, полученные при отклонении номинальных значений внутренних размеров волновода на величину допуска

выступа гребневого волновода, поскольку электрическое и магнитное поля в П-волноводе концентрируются между концом выступа и широкой стенкой [3].

Несмотря на то, что изготовленная мера LINE соответствует допускам стандарта [2], фланцы волнопроводов гребневого сечения в России не нормированы. Обычно в России для волнопроводов гребневого сечения 16,6×7,5 мм используют стандартный фланец прямоугольного волновода с сечением 16,0×8,0 мм. Допуск на стыковку волновода подобного типа находится на уровне $\pm 0,050$ мм согласно [7]. При этом для фланцев гребневых волнопроводов, выполненных по стандартам МЭК, используются установочные штифты и отверстия с предельными отклонениями размеров на уровне $\pm 0,013$ мм.

ОРГАНИЗАЦИЯ И КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Измерительный стенд построен на базе ВАЦ N5245A компании Keysight Technologies. Для проведения измерений



Рис. 5. Гребневые КВП, используемые при калибровке и измерениях

использовались два гребневых КВП (рис. 5) с размерами сечения П-образного волновода 16,6×7,5 мм согласно отраслевому стандарту [2], размерами фланца от прямоугольного волновода 16,0×8,0 мм согласно [7] и коаксиальным сечением 3,5×1,5 мм. Один из КВП использовался в качестве измеряемого устройства (ИУ), второй – для организации волноводной плоскости измерений. Схема измерительного стенда показана на рис. 6.

ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения экспериментальной проверки метода калибровки «неизвестная перемычка со смещенной

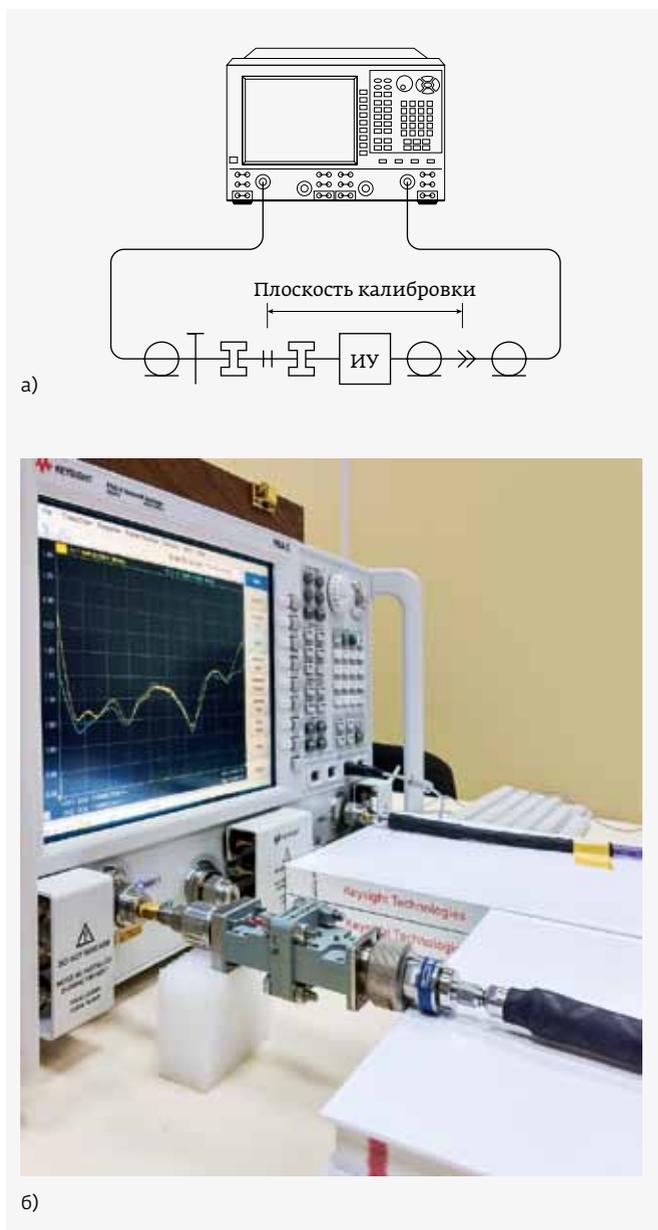


Рис. 6. Схема измерения (а) и измерительный стенд (б) для измерения параметров гребневого КВП

нагрузкой» были использованы следующие комплекты калибровочных мер:

- волноводная нагрузка в виде каскадного соединения КВП и коаксиальной согласованной нагрузки из комплекта мер 85052D фирмы Keysight Technologies;
- волноводная нагрузка короткого замыкания (мера SHORT);
- мера LINE в виде отрезка $\lambda_g/4$ тракта 16,6×7,5 мм;
- комплект коаксиальных мер 85052D.

Для проведения экспериментальной проверки метода калибровки «исключение адаптера» были использованы следующие комплекты калибровочных мер:

- волноводная нагрузка короткого замыкания (мера REFLECT);
- мера LINE в виде отрезка $\lambda_g/4$ тракта 16,6×7,5 мм;
- комплект коаксиальных мер 85052D.

Этапы калибровки ВАЦ каждым из методов представлены на рис. 7.

Калибровка методом «неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой» включает следующие этапы (рис. 7а):

1. Калибровка волноводной плоскости с использованием последовательного подключения: волноводной нагрузки короткого замыкания (SHORT), волноводной нагрузки в виде каскадного соединения элемента смещения OFFSET и короткозамкнутой нагрузки SHORT, волноводной нагрузки LOAD в виде каскадного соединения КВП с коаксиальной согласованной нагрузкой, нагрузки OFFSET LOAD в виде каскадного соединения элемента смещения OFFSET и КВП с коаксиальной согласованной нагрузкой.
2. Калибровка коаксиальной плоскости с использованием последовательного подключения: коаксиальной нагрузки холостого хода (OPEN), коаксиальной нагрузки короткого замыкания (SHORT), коаксиальной согласованной нагрузки (LOAD).
3. Измерение «на проход» с использованием меры «неизвестная перемычка» (UNKNOWN THRU). В качестве меры «неизвестная перемычка» выступает измеряемый КВП.

Калибровка методом «исключение адаптера» состоит из следующих этапов (рис. 7б):

1. Калибровка волноводных плоскостей (адаптер подключен к коаксиальному порту) с использованием последовательного подключения: волноводной нагрузки короткого замыкания REFLECT к каждой калибруемой волноводной плоскости, проходной меры LINE между калибруемыми волноводными плоскостями.
2. Калибровка коаксиальных плоскостей (адаптер подключен к волноводному порту) с использованием

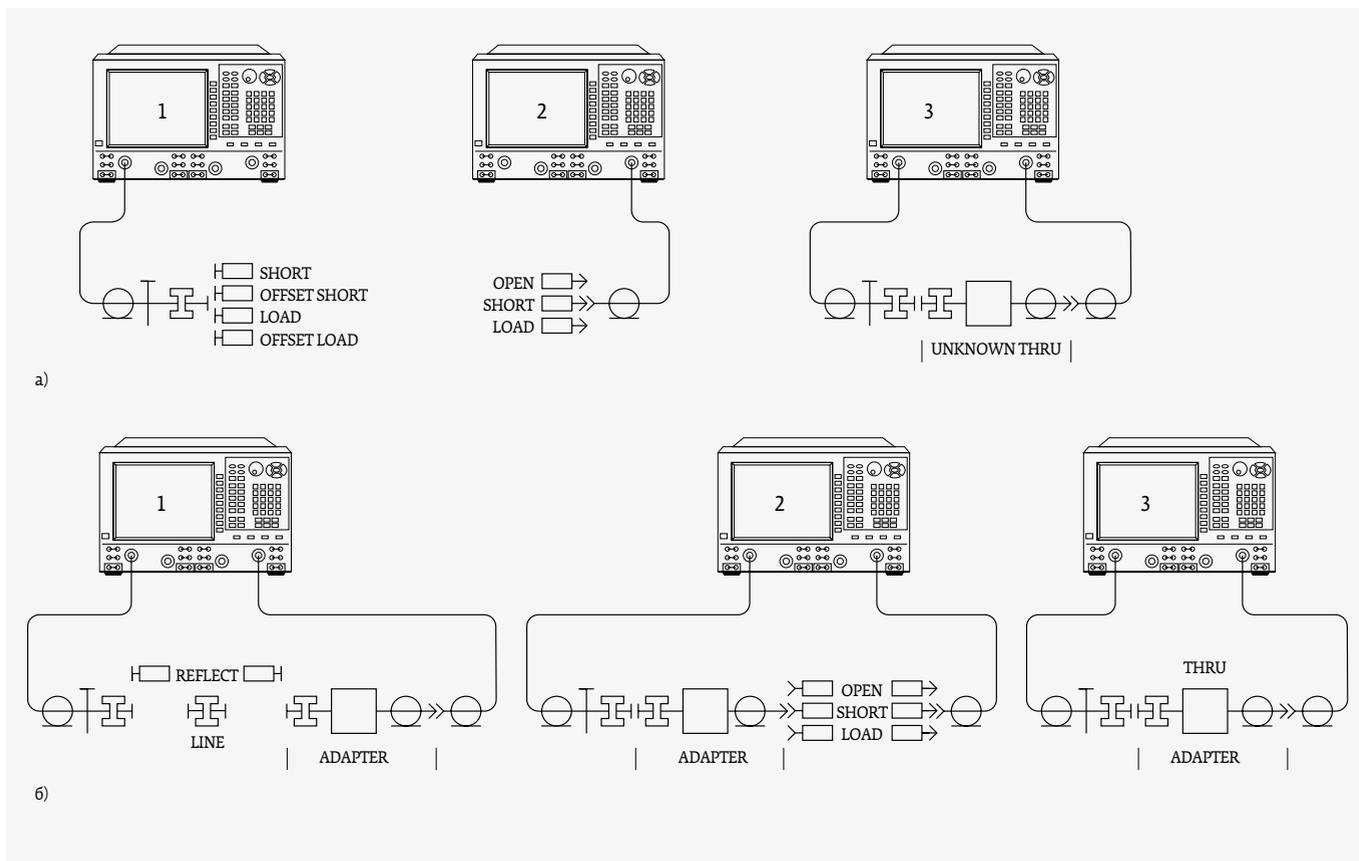


Рис. 7. Этапы калибровки ВАЦ для измерения параметров КВП: а – калибровка ВАЦ методом «неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой»; б – калибровка ВАЦ методом «исключение адаптера»

последовательного подключения к каждому из портов: коаксиальной нагрузки холостого хода (OPEN), коаксиальной нагрузки короткого замыкания (SHORT), коаксиальной согласованной нагрузки (LOAD).

- Измерение «на проход» THRU (измеряемый КВП (мера ADAPTER) помещен между волноводным и коаксиальным портом).

На рис. 8 представлено сравнение кривых, полученных при измерении КВП по результатам калибровки с использованием методов «неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой» и «исключение адаптера».

Сравнение кривых дает следующие результаты:

- максимальное отклонение при измерении коэффициентов отражения $|S_{11}|, |S_{22}|: \pm 0,025$;
- максимальный разброс при измерении коэффициентов передачи $S_{21}, S_{12}: \pm 0,1$ дБ;
- максимальное отклонение при измерении фазы коэффициентов передачи $S_{21}, S_{12}: \pm 1^\circ$.

Разброс полученных результатов измерений вызван систематическими и случайными ошибками измерительной системы, анализ которых будет приведен далее.

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Оценка производительности измерительной системы на основе ВАЦ требует построения бюджетов неопределенности. Они показывают ожидаемый размер вкладов индивидуальных неопределенностей, приписываемых систематическим ошибкам измерительной системы (таким как несовершенство калибровочных стандартов, остаточные составляющие в модели ошибок ВАЦ, изоляция между измерительными портами, нелинейность измерительных приемников и т. д.). Бюджеты неопределенности не включают вклады случайных ошибок, вызванных недостаточной повторяемостью параметров коаксиальных соединителей и фланцев волноводов, шумом трактов, условиями окружающей среды. Полученные бюджеты неопределенности характеризуют калибровочные и измерительные возможности (Calibration and Measurement Capability, CMC) [8, 9] рассматриваемой измерительной системы и могут применяться для установления области ее аккредитации [10]. Оценка неопределенности производилась для результатов измерений, полученных при использовании метода калибровки «исключение адаптера».

Измерение коэффициента отражения

Оценка неопределенности при измерении коэффициента отражения от волноводного тракта

В случае измерения коэффициента отражения в волноводной плоскости, основной источник неопределенности будет вызван отражениями от меры LINE, используемой при калибровке [11, 12]. В разделе «Определение электрических характеристик мер» приведены частотные зависимости значений коэффициентов отражения ($|\Gamma_x|$), полученные при отклонении внутренних размеров меры LINE от номинальных. Поскольку представленные значения являются оценками наихудшего случая, то они могут рассматриваться как предельные и могут быть охарактеризованы с использованием равномерного распределения. Исходя из этого, стандартная неопределенность может быть рассчитана по формуле [13]:

$$u(|\Gamma_x|) = \frac{|\Gamma_x|}{\sqrt{3}}. \tag{7}$$

Поскольку $u(|\Gamma_x|)$, вызванные отклонением различных внутренних размеров меры LINE, существенно некоррелированы друг с другом, то они могут быть объединены в суммарную стандартную неопределенность:

$$u(|\Gamma_{wcl}|) = \sqrt{(u(|\Gamma_{a1}|))^2 + (u(|\Gamma_{b1}|))^2 + (u(|\Gamma_{s1}|))^2 + (u(|\Gamma_{Rz1}|))^2 + (u(|\Gamma_{d1}|))^2}. \tag{8}$$

График частотной зависимости $u(|\Gamma_{wcl}|)$ представлен на рис. 9.

Расширенная неопределенность при измерении коэффициента отражения от волноводного порта $U(|\Gamma_{wcl}|)$ может быть выражена согласно [13]:

$$U(|\Gamma_{wcl}|) = 2u(|\Gamma_{wcl}|). \tag{9}$$

$U(|\Gamma_{wcl}|)$ характеризует результат измерения с учетом охватывающего его интервала (коэффициент охвата $k=2$),

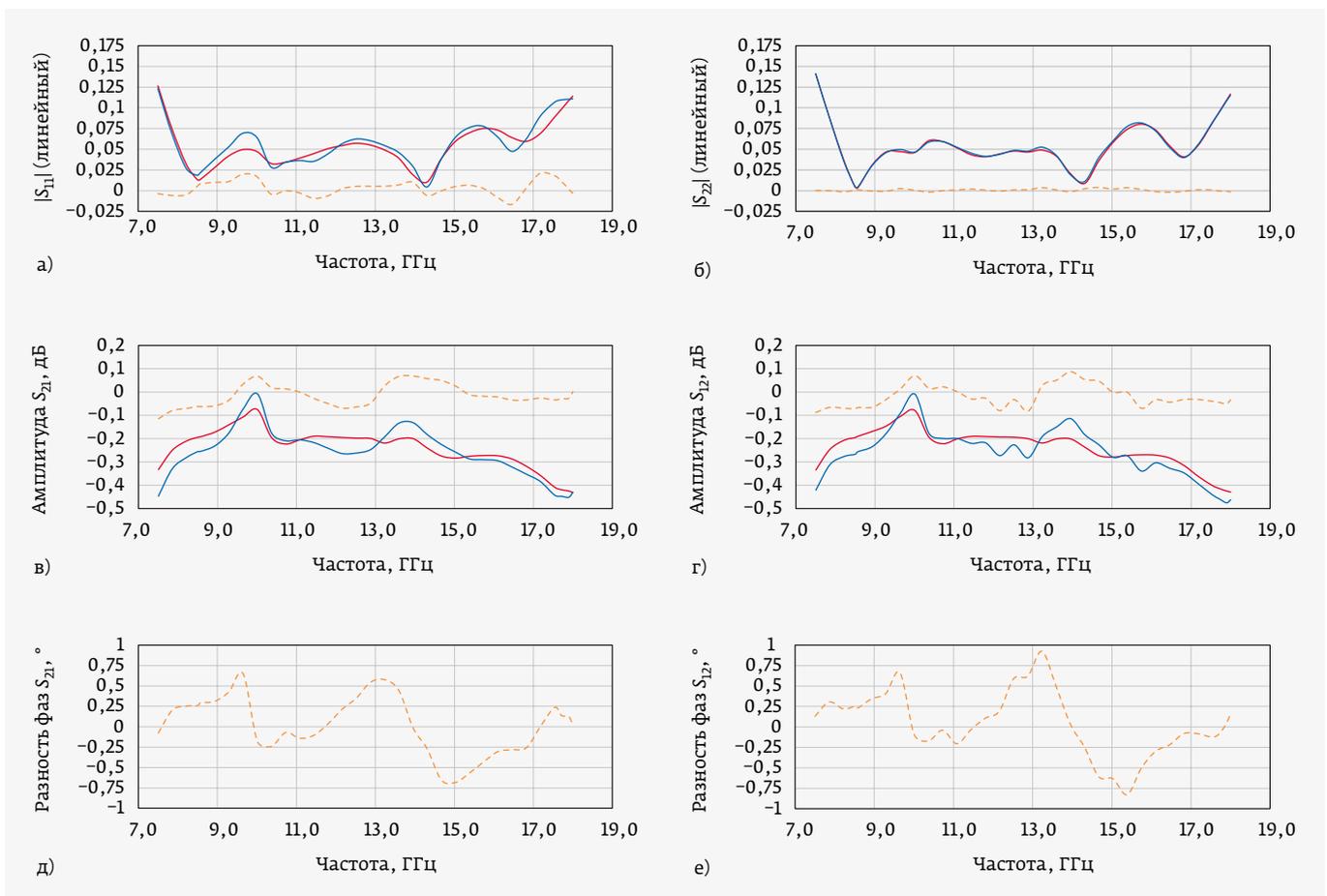


Рис. 8. Параметры измеренного КВП по результатам рассматриваемых методов калибровки: а – $|S_{11}|$ (линейный); б – $|S_{21}|$ (линейный); в – амплитуда S_{21} ; г – амплитуда S_{12} ; д – разность фаз S_{21} ; е – разность фаз S_{12} . Синий цвет – метод «исключение адаптера»; красный – метод «неизвестная перемычка»; оранжевый – разность измеренных значений

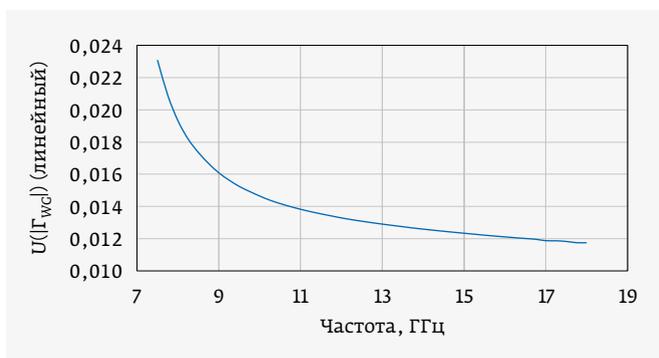


Рис. 9. Частотная зависимость $u(\Gamma_{wcl})$

в пределах которого, как можно ожидать, будет находиться большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны измеряемой величине. Значение $U(\Gamma_{wcl})$ может рассматриваться как расширенная СМС-неопределенность при измерении коэффициента отражения от волноводного порта ($|S_{11}|$).

Оценка неопределенности при измерении коэффициента отражения от коаксиального тракта

Оценку неопределенности коэффициента отражения от коаксиального тракта можно провести с использованием модели ошибок, представленной в [14, 15]:

$$U_{VRC} = D + T\Gamma + L_R\Gamma + M\Gamma^2 + S_{21}S_{12}\Gamma_L, \tag{10}$$

- где: Γ – измеренное значение коэффициента отражения;
- S_{21} – измеренное значение коэффициента передачи;
- D – эффективная направленность;
- T – неравномерность тракта отраженного сигнала;
- L_R – нелинейность измерительного приемника;
- M – значение эффективного согласования источника сигнала;
- Γ_L – значение эффективного согласования нагрузки (подключенной ко второму измерительному порту).

Термин «эффективный» используется для обозначения значения параметра после выполнения полной калибровки соответствующих измерительных портов ВАЦ с использованием указанных калибровочных комплектов.

Измерение D производится при каскадном подключении согласованной воздушной коаксиальной линии из верификационного комплекта 85053В и согласованной коаксиальной нагрузки из комплекта калибровочных мер 85052D к плоскости калибровки коаксиального тракта ВАЦ. Значение D определяется как половина максимального значения амплитуды пульсаций на графике зависимости коэффициента отражения S_{22} от частоты

в линейном масштабе. По результатам измерений величина D составляет 0,008.

Измерение M производится с помощью каскадного подключения согласованной воздушной коаксиальной линии из верификационного комплекта 85053В и коаксиальной нагрузки короткого замыкания из комплекта калибровочных мер 85052D к плоскости калибровки коаксиального тракта ВАЦ. Значение M определяется как половина максимального значения амплитуды пульсаций на графике зависимости коэффициента отражения S_{22} от частоты в линейном масштабе. По результатам измерений величина M составляет 0,005.

Согласно [15] рекомендуется сложить величины вкладов неопределенностей D и $M\Gamma^2$ перед вычислением суммарной стандартной неопределенности. Стандартная неопределенность коррелированных величин $u(D + M\Gamma^2)$ может быть рассчитана с использованием U-образной функции распределения вероятностей:

$$u(D + M\Gamma^2) = \frac{D + M\Gamma^2}{\sqrt{2}}. \tag{11}$$

В качестве оценки неопределенности T использовалось значение, приведенное в [15], равное 0,001 (половина интервала прямоугольного распределения). Дополнительно оценка T проводилась с использованием метода оконной фильтрации во временной области (Time Domain Gating) [16, 17] за счет подавления составляющих D и M , полученных по результатам измерения коэффициента отражения S_{22} каскадного соединения согласованной воздушной коаксиальной линии из верификационного комплекта 85053В и коаксиальной нагрузки короткого замыкания из комплекта 85052D. Измеренное значение T хорошо соотносится со значением, приведенным в [15], и составляет 0,001. Стандартная неопределенность $u(T\Gamma)$ может быть рассчитана по формуле:

$$u(T\Gamma) = \frac{T\Gamma}{\sqrt{3}}. \tag{12}$$

Величина L_R может быть оценена путем измерения калиброванного перестраиваемого шагового аттенюатора. Поскольку калиброванный аттенюатор отсутствовал при проведении измерений, для оценки нелинейности использовалось значение 0,002 дБ / дБ [15], хорошо соотносящееся с графиком динамической точности для ВАЦ N5245A на частоте 20 ГГц, приведенным в техническом описании [18]. Стандартная неопределенность $u(L_R\Gamma)$, вызванная нелинейностью при измерении коэффициента отражения, может быть рассчитана с использованием прямоугольной функции распределения вероятностей:

$$u(L_R\Gamma) = \frac{L_R\Gamma}{\sqrt{3}}. \tag{13}$$

Значение $u(\Gamma_L)$ принималось равным значению стандартной неопределенности при измерении коэффициента отражения от волноводного порта [11]:

$$u(\Gamma_L) = u(|\Gamma_{wc}|). \quad (14)$$

Выражения для $u(D+M)$, $u(T)$, $u(L_R)$ и $u(\Gamma_L)$ являются существенно некоррелированными и используются для определения суммарной стандартной неопределенности при измерении коэффициента отражения от коаксиального порта ($u(|\Gamma_{cx}|)$):

$$u(|\Gamma_{cx}|) = \sqrt{(u(D+M\Gamma^2))^2 + (u(T\Gamma))^2 + (u(L_R\Gamma))^2 + (u(\Gamma_L))^2}. \quad (15)$$

Расширенная неопределенность при измерении коэффициента отражения от коаксиального порта ($U(|\Gamma_{cx}|)$) может быть выражена согласно [13]:

$$U(|\Gamma_{cx}|) = 2 \cdot u(|\Gamma_{cx}|). \quad (16)$$

$U(|\Gamma_{cx}|)$ характеризует результат измерения с учетом охватывающего его интервала ($k=2$), в пределах которого, как можно ожидать, будет находиться большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны измеряемой величине. Значение $U(|\Gamma_{cx}|)$ может рассматриваться как расширенная СМС-неопределенность при измерении коэффициента отражения от коаксиального порта (S_{22}).

Измерение коэффициента передачи

Оценку неопределенности коэффициента передачи можно провести с использованием модели ошибок, представленной в [15]:

$$M_{TM} = L_{TM} + M_{TM} + I, \quad (17)$$

где: L_{TM} – нелинейность измерительного приемника;
 M_{TM} – расчетное значение коэффициента ошибки рассогласования, включающей остаточные рассогласования источника сигнала и нагрузки, а также коэффициенты отражения от входа и выхода измеряемого устройства;
 I – измеренное значение изоляции (развязки) измерительных портов.

Выражение, используемое для оценки ошибки рассогласования M_{TM} , представлено в [15]:

$$M_{TM} = 20 \log_{10} \frac{1 + (|MS_{11}| + |\Gamma_L S_{22}| + |M\Gamma_L S_{11} S_{22}| + |M\Gamma_L S_{21} S_{12}|)}{1 - |M||\Gamma_L|}, \quad (18)$$

где: M – эффективное согласование источника;

Γ_L – значение эффективного согласования нагрузки (подключенной ко второму измерительному порту);

$S_{11}, S_{22}, S_{12}, S_{21}$ – параметры рассеяния измеряемого устройства.

При оценке M_{TM} при измерении коэффициента передачи от волноводного порта к коаксиальному (S_{21}) значение параметра M принималось равным значению стандартной неопределенности $u(|\Gamma_{wc}|)$ при измерении коэффициента отражения от волноводного порта. Для метода калибровки «исключение адаптера» значение параметра Γ_L для коаксиального порта соответствует значению Γ_L , полученному по результатам двухпортовой SOLT-калибровки в коаксиальном тракте, когда адаптер подключен к волноводному порту (рис. 7б, шаг 2). Таким образом, Γ_L коаксиального порта может быть оценен при измерении коэффициента отражения S_{11} согласованной воздушной линии, подключенной между калиброванными коаксиальными портами.

При оценке M_{TM} при измерении коэффициента передачи от коаксиального порта к волноводному порту (S_{22}) значение параметра Γ_L принималось равным значению стандартной неопределенности $u(|\Gamma_{wc}|)$ при измерении коэффициента отражения от волноводного порта.

Стандартная неопределенность $u(M_{TM})$ может быть рассчитана с использованием U-образной функции распределения вероятностей [19, 20]:

$$u(M_{TM}) = \frac{M_{TM}}{\sqrt{2}}. \quad (19)$$

Эффекты неполной изоляции между измерительными портами по результатам калибровки можно определить исходя из оценки параметров S_{21} и S_{12} , когда калиброванные порты ВАЦ нагружены на согласованные нагрузки с малым значением коэффициента отражения. Типовое значение изоляции для ВАЦ N5245A, согласно [18], составляет –120 дБ. Поскольку согласованная нагрузка для волноводного порта отсутствует, то для приближенной оценки величины изоляции использовался КВП с коаксиальной нагрузкой. По результатам измерений для расчетов было выбрано значение изоляции, равное –85 дБ. При измерении параметров устройства величина неопределенности, вызванной эффектом неполной изоляции, dA , будет зависеть от измеренного значения ослабления, A согласно [15]:

$$dA = \pm 20 \log_{10} \left[1 + 10^{-\frac{(I-A)}{20}} \right], \quad (20)$$

где: dA – неопределенность, вызванная неполной изоляцией;

I – значение изоляции;

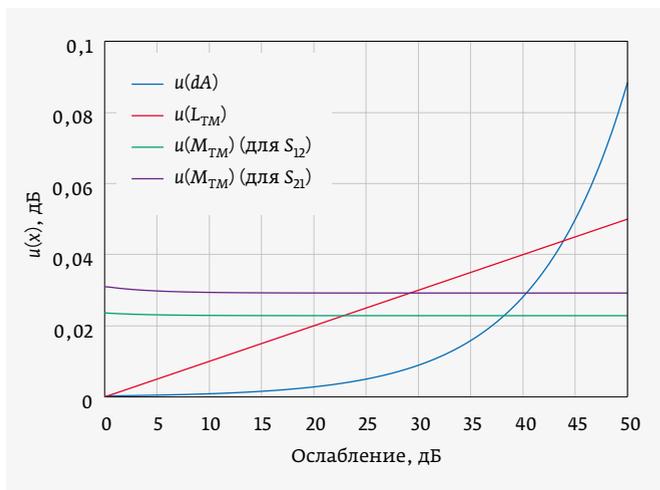


Рис. 10. Составляющие неопределенности $u(T_{tr})$ в зависимости от измеренного значения ослабления ($|S_{11}|=|S_{22}|=0,12$; $u(|\Gamma_{WC}|)=0,025$)

A – измеренное значение ослабления измеряемого устройства.

Поскольку величина dA представляет собой оценку наихудшего случая, ее значение может рассматриваться как предельное и может быть охарактеризовано с использованием равномерного распределения. Исходя из этого, стандартная неопределенность может быть рассчитана по формуле [13]:

$$u(dA) = \frac{dA}{\sqrt{3}}. \tag{21}$$

Нелинейность измерительных приемников L_{TM} может быть оценена путем измерения калиброванного перестраиваемого шагового аттенюатора. Поскольку калиброванный аттенюатор отсутствует, то для оценки нелинейности использовалось значение 0,002 дБ/дБ [15]. Стандартная неопределенность $u(L_{TM})$, вызванная нелинейностью при измерении коэффициента передачи, может быть рассчитана с использованием нормальной функции распределения вероятностей [15]:

$$u(L_{TM}) = \frac{L_{TM}}{2}. \tag{22}$$

Выражения для $u(M_{TM})$, $u(dA)$ и $u(L_{TM})$ используются для определения суммарной стандартной неопределенности при измерении коэффициента передачи $u(T_{tr})$:

$$u(T_{tr}) = \sqrt{(u(dA))^2 + (u(M_{TM}))^2 + (u(L_{TM}))^2}. \tag{23}$$

Расширенная неопределенность при измерении коэффициента передачи $U(T_{tr})$ может быть выражена согласно [13]:

$$U(T_{tr}) = 2u(T_{tr}). \tag{24}$$

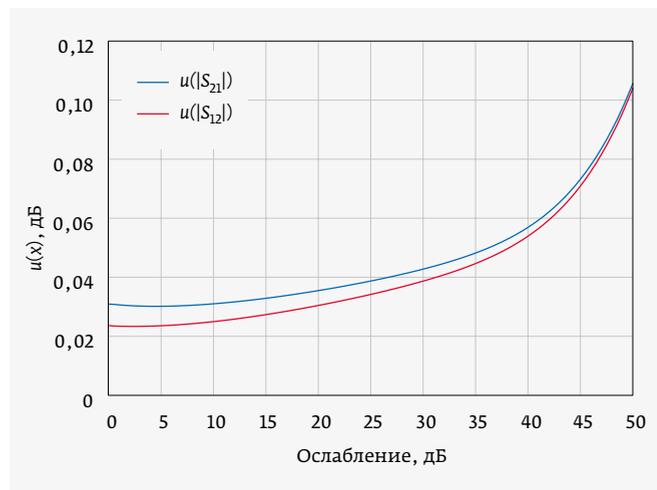


Рис. 11. Суммарная стандартная неопределенность при измерении коэффициента передачи $u(T_{tr})$ в зависимости от измеренного значения ослабления ($|S_{11}|=|S_{22}|=0,12$; $u(|\Gamma_{WC}|)=0,025$)

Значение $U(T_{tr})$ может рассматриваться как расширенная СМС-неопределенность при измерении коэффициентов передачи (S_{21} и S_{12}).

Величины $u(T_{tr})$ и $U(T_{tr})$ являются функциями измеренного значения ослабления. На рис. 10 показан вклад каждой составляющей неопределенности $u(T_{tr})$ в зависимости от значения ослабления. Зависимости построены с учетом следующих допущений: $|S_{11}|=|S_{22}|=0,12$ и $u(|\Gamma_{WC}|)=0,025$.

Для малых значений ослаблений (менее 23 дБ при измерении $|S_{12}|$ и менее 30 дБ при измерении $|S_{21}|$) рассогласование является доминирующим источником неопределенности. В диапазоне ослаблений от 30 до 43 дБ доминирующий источник неопределенности – нелинейность измерительных приемников. Для больших значений ослаблений (более 43 дБ) доминирующим источником неопределенности является изоляция.

На рис. 11 показаны зависимости суммарной стандартной неопределенности при измерении коэффициента передачи $u(T_{tr})$ в зависимости от измеренного значения ослабления.

Измерение фазы

Стандартная неопределенность при измерении фазы $U(\varphi)$ для параметра рассеяния S_{ij} ($i=1, 2; j=1, 2$) может быть вычислена с использованием выражения [12, 21]:

$$u(\varphi) = \arcsin \left[\frac{u(|S_{ij}|)}{|S_{ij}|} \right], \tag{25}$$

где S_{ij} – измеренное значение параметра рассеяния; $u(|S_{ij}|)$ – стандартная неопределенность измеренного параметра рассеяния $|S_{ij}|$.

Расширенная неопределенность при измерении фазы $U(\varphi)$ может быть выражена согласно [13]:

$$U(\varphi) = 2 \cdot u(\varphi). \quad (26)$$

Согласно [12], при использовании уравнения (25) для вычисления стандартной неопределенности при измерении фазы коэффициента передачи необходимо выразить неопределенность $u(|S_{ij}|)$ в виде линейной величины. Это выражение может быть получено из измеренного значения ослабления a (в дБ) и неопределенности, полученной при измерении ослабления (в дБ). Величина коэффициента ослабления (в дБ) связана с амплитудой линейного коэффициента передачи $|S_{ij}|$ ($i \neq j$) следующим образом:

$$|S_{ij}| = 10^{-a/20}. \quad (27)$$

Выражение для суммарной стандартной неопределенности $u(|S_{ij}|)$ может быть представлено согласно [13] в следующем виде:

$$u^2(|S_{ij}|) = \left(\frac{d|S_{ij}|}{da} \right)^2 u^2(a). \quad (28)$$

Выражения (27) и (28) дают следующее выражение для $u(|S_{ij}|)$ в виде линейной величины:

$$u(|S_{ij}|) = \frac{\ln 10}{20} \cdot 10^{-\frac{a}{20}} \cdot u(a). \quad (29)$$

Уравнение (25) показывает, что значение неопределенности при измерении фазы варьируется в зависимости от величины измеряемого параметра рассеяния. Для линейных величин, близких к единице (полная передача для коэффициента передачи или полное отражение для коэффициента отражения), стандартная неопределенность может быть представлена согласно [21]:

$$u(\varphi) \approx \arcsin[u(|S_{ij}|)]. \quad (30)$$

Выражение (30) характеризует калибровочные и измерительные возможности (СМС) измерения фазы S-параметров. Однако, если амплитуда рассматриваемого параметра рассеяния меньше стандартной неопределенности для данного параметра $|S_{ij}| < u(|S_{ij}|)$, то неопределенность при измерении фазы становится неизвестной.

На рис. 12 показаны зависимости стандартной неопределенности при измерении фазы коэффициента передачи в зависимости от измеренного значения ослабления.

Частотные зависимости параметров КВП с учетом неопределенности представлены на рис. 13. Бюджеты

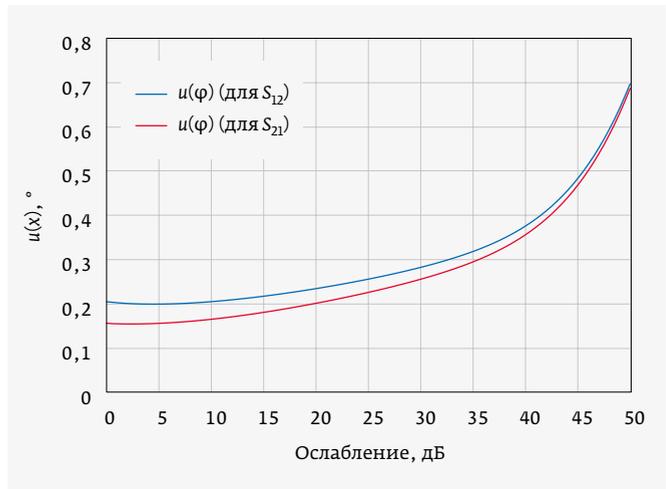


Рис. 12. Стандартная неопределенность при измерении фазы коэффициента передачи $u(\varphi)$ в зависимости от измеренного значения ослабления ($|S_{11}| = |S_{22}| = 0,12$; $u(\Gamma_{wc}) = 0,025$)

неопределенности измеренных параметров КВП приведены в табл. 3–6. Измерения проводились на частоте 12,75 ГГц, S-параметры имели следующие значения: $|S_{11}| = 0,060206$; $|S_{22}| = 0,04564$; $|S_{12}| = 0,972097$; $|S_{21}| = 0,971813$.

Случайные составляющие ошибок

Как было отмечено ранее, в рамках построения бюджетов неопределенности не учитывались вклады случайных составляющих ошибок, воздействующих на измерительную систему. Большинство случайных ошибок не являются репрезентативными при оценке производительности измерительной системы на основе ВАЦ [11, 12].

Эффекты дрейфа, вызванные изменением условий окружающей среды и нестабильностью ВАЦ, минимизируются за счет поддержания постоянной температуры и уменьшения времени при проведении калибровки и измерений.

Для коаксиального тракта недостаточная повторяемость параметров при сочленении соединителей измерительной системы и измеряемого устройства будет являться источником случайных ошибок. На данную повторяемость влияют конструкция соединителя, используемые в нем материалы и качество его изготовления.

Для волноводного тракта наиболее вероятным источником случайных ошибок будет являться повторяемость сочленения волноводных фланцев при подключении измеряемого устройства к волноводному порту измерительной системы. Данная разновидность ошибки напрямую определяется конструкцией, материалами и качеством изготовления волноводных соединителей. Механические допуски на выравнивающие механизмы

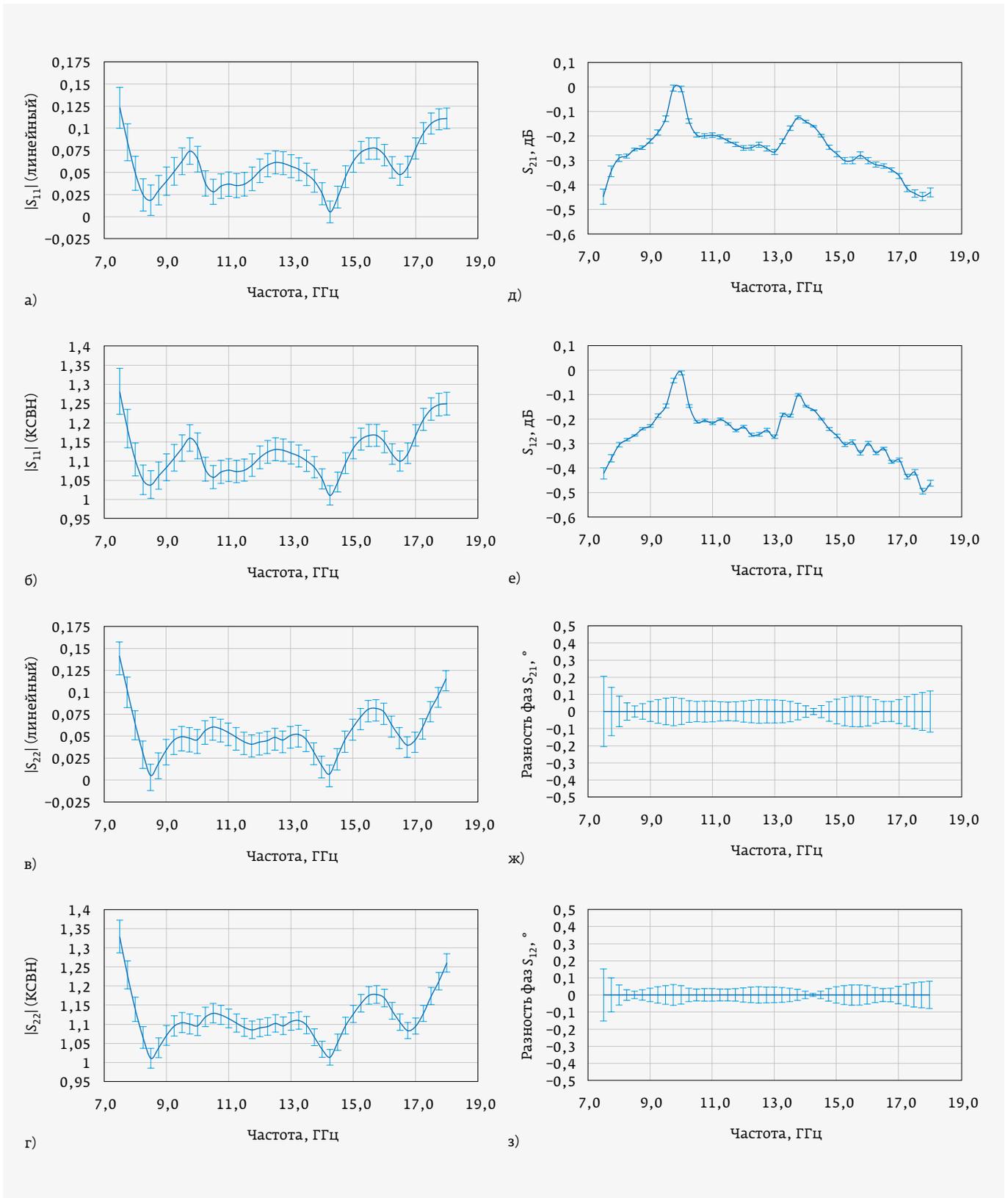


Рис. 13. Параметры измеренного КВП с учетом неопределенности по результатам калибровки ВАЦ методом «исключение адаптера»: а - $|S_{11}|$ (линейный); б - $|S_{11}|$ (КСВН); в - $|S_{22}|$ (линейный); г - $|S_{22}|$ (КСВН); д - амплитуда S_{21} ; е - амплитуда S_{12} ; ж - разность фаз S_{21} ; з - разность фаз S_{12}

Таблица 3. Бюджет неопределенности при измерении коэффициента отражения ($|S_{11}|$) от волноводного порта по результатам двухпортовой калибровки методом «исключение адаптера»

Величина	Оценка	Вклад в неопределенность для $ S_{11} =0,060206$	Распределение	Делитель	Стандартная неопределенность
Коэффициент отражения при отклонении длины широкой стенки, Γ_a	-	0,000609	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0004
Коэффициент отражения при отклонении длины узкой стенки, Γ_b	-	0,003829	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0022
Коэффициент отражения при отклонении высоты выступа, Γ_d	-	0,008161	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0047
Коэффициент отражения при отклонении радиуса скругления выступа, Γ_{R2}	-	0,020304	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0117
Коэффициент отражения при отклонении ширины выступа, Γ_s	-	0,003511	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0020
Комбинированная стандартная неопределенность					0,0130
Расширенная неопределенность ($k=2$)					0,0260

Таблица 4. Бюджет неопределенности при измерении коэффициента отражения ($|S_{22}|$) от коаксиального порта по результатам двухпортовой калибровки методом «исключение адаптера»

Величина	Оценка	Вклад в неопределенность для $ S_{22} =0,0456$	Распределение	Делитель	Стандартная неопределенность
Эффективная направленность, D	0,008	0,008	U-образное	$\sqrt{2}$	-
Эффективное согласование измерительного порта, $(M \cdot S_{22} ^2)$	$0,005 \cdot S_{22} ^2$	0,000010	U-образное	$\sqrt{2}$	-
Сумма коррелированных величин	-	0,008010	U-образное	$\sqrt{2}$	0,0057
Неравномерность тракта отраженного сигнала, $(T \cdot S_{22})$	$0,001 \cdot S_{22} $	0,000046	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0000
Линейность, $L_R \cdot S_{22} $, дБ/дБ	$0,002 \cdot S_{22} $	0,000281	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0002
Эффективное согласование нагрузки, $(\Gamma_L \cdot S_{21} \cdot S_{12})$	$0,013 \cdot S_{21} \cdot S_{12} $	0,012281	U-образное	$\sqrt{2}$	0,0087
Комбинированная стандартная неопределенность					0,0104
Расширенная неопределенность ($k=2$)					0,0207

(направляющие штифты и отверстия), степень прижатия сочленяемых плоскостей (крутящий момент для затяжки болтов), шероховатость и плоскостность сочленяемых поверхностей будут варьироваться в зависимости от качества изготовления и степени износа волноводных соединителей как измерительной системы, так и измеряемого устройства.

На рис. 14 показаны результаты оценки повторяемости волноводных фланцев, используемых при измерениях.

Проводилось измерение S_{11} прямого соединения волноводных плоскостей (после TRL-калибровки). График с результатами измерений S_{11} сохранялся в память ВАЦ, после чего проводилось повторное сочленение волноводных плоскостей и повторное измерение S_{11} . Различия в значениях S_{11} для десяти последовательных подключений волноводных плоскостей отображены в виде семейства частотных зависимостей. Из рис. 14 видно, что повторяемость коэффициента отражения волноводных

Таблица 5. Бюджет неопределенности при измерении коэффициента передачи ($|S_{21}|$) от волноводного порта к коаксиальному по результатам двухпортовой калибровки методом «исключение адаптера»

Величина	Оценка	Вклад в неопределенность для $ S_{21} =0,251297$ дБ	Распределение	Делитель	Стандартная неопределенность, дБ
Линейность, L_{TM} , дБ/дБ	0,002	0,000503	Нормальное	2	0,0003
Согласование измерительного порта, $(M \cdot S_{11})$	$0,02598 \cdot S_{11} $	0,001564	-	-	-
Согласование нагрузки, $(\Gamma_L \cdot S_{22})$	$0,01215 \cdot S_{22} $	0,000555	-	-	-
Произведение $(M \cdot \Gamma_L)$	0,000316	0,000316	-	-	-
Рассогласование, M_{TM} , дБ	-	0,014271	U-образное	$\sqrt{2}$	0,0101
Изоляция, дБ	85	0,000505	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0003
Комбинированная стандартная неопределенность					0,0101
Расширенная неопределенность ($k=2$)					0,0202

Таблица 6. Бюджет неопределенности при измерении коэффициента передачи ($|S_{12}|$) от коаксиального порта к волноводному по результатам двухпортовой калибровки методом «исключение адаптера»

Величина	Оценка	Вклад в неопределенность для $ S_{12} =0,245091$ дБ	Распределение	Делитель	Стандартная неопределенность, дБ
Линейность, L_{TM} , дБ/дБ	0,002	0,00049	Нормальное	2	0,0002
Согласование измерительного порта, $(M \cdot S_{22})$	$0,005 \cdot S_{22} $	0,000301	-	-	-
Согласование нагрузки, $(\Gamma_L \cdot S_{11})$	$0,012991 \cdot S_{11} $	0,000593	-	-	-
Произведение $(M \cdot \Gamma_L)$	0,000065	0,000065	-	-	-
Рассогласование, M_{TM} , дБ	-	0,00987	U-образное	$\sqrt{2}$	0,0070
Изоляция, дБ	85	0,000502	Прямоугольное	$\sqrt{3}$	0,0003
Комбинированная стандартная неопределенность					0,0070
Расширенная неопределенность ($k=2$)					0,0140

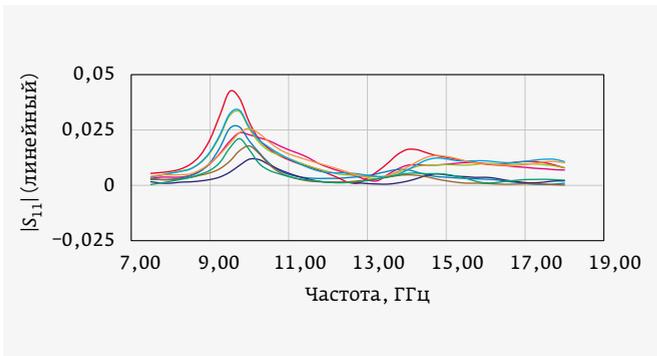


Рис. 14. Повторяемость коэффициента отражения для волноводных соединителей, используемых при проведении измерений

соединителей лежит в пределах 0,045 в рабочем диапазоне частот, что не позволяет обеспечить измерение КСВН на уровне менее 1,1.

Дополнительно проводилась оценка повторяемости амплитуды и фазы S_{21} , учитывающая повторяемость сочленения волноводных фланцев и стабильность коаксиального кабеля. На рис. 15 показаны зависимости амплитуды и фазы S_{21} при прямом соединении волноводных плоскостей для десяти последовательных сочленений после выполнения TRL-калибровки волноводного тракта.

Из рис. 15 видно, что повторяемость амплитуды коэффициента передачи находится в диапазоне от +0,1 до -0,4 дБ, а повторяемость фазы коэффициента передачи изменяется в пределах $\pm 1,5^\circ$.

Несмотря на то, что параметры и размеры волноводов гребневой формы регламентируются отраслевым стандартом [2], в настоящее время в России отсутствует нормативная документация, устанавливающая требования к размерам и допускам фланцев для волноводов данного типа. Применение фланцев прямоугольных волноводов для волноводов гребневого сечения не позволяет обеспечить высокое значение повторяемости параметров волноводного тракта, что ограничивает возможность измерения малых значений коэффициента отражения и приводит к значительному возрастанию погрешности при измерении коэффициента передачи. В связи с этим необходимым является проведение соответствующих работ по стандартизации и изучению повторяемости сочленений волноводов гребневого сечения.

* * *

Таким образом, представлены возможности проведения измерений S-параметров коаксиально-волноводных устройств на гребневых волноводах П-образного сечения в диапазоне частот 7,5–18 ГГц.

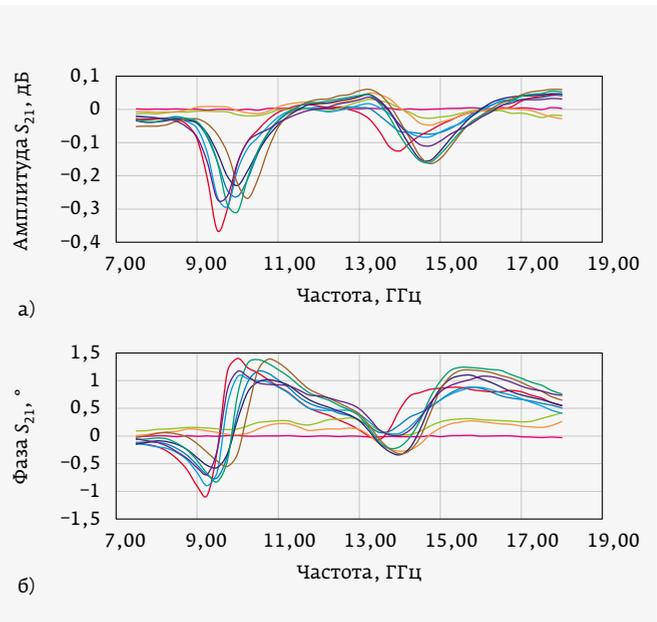


Рис. 15. Повторяемость амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента передачи для волноводных соединителей и коаксиального кабеля, используемых при проведении измерений

Показана эффективность методики расчета волноводных калибровочных мер гребневого П-образного сечения 16,6×7,5 мм, применяемых для калибровки ВАЦ Keysight с использованием методов «неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой» и «исключение адаптера». Изложенная методика расчета волноводных калибровочных мер может быть оптимизирована для волноводных трактов нестандартного сечения.

Определение электрических характеристик изготовленных волноводных калибровочных мер гребневого П-образного сечения 16,6×7,5 мм с применением САПР электромагнитного моделирования EMPro позволило использовать полученные результаты при построении бюджетов неопределенности измерительной системы на основе ВАЦ.

Использование ВАЦ Keysight серии PNA для организации измерительного стенда дает возможность:

- создавать и редактировать описание волноводных калибровочных мер;
- обеспечить проведение измерений в широком диапазоне частот;
- проводить настройку измеряемых устройств в процессе измерений без необходимости использования стороннего программного обеспечения и итерационных алгоритмов для определения значений измеряемых величин;
- сохранять и экспортировать результаты измерений в различных форматах.

Полученные практические результаты измерений подтверждают изложенные ранее выводы [1] о применимости рассматриваемых методов калибровки для измерения устройств как с гребневыми волноводными соединителями, так и невстраиваемых устройств с коаксиальным и волноводным соединителями.

Результаты анализа измерительной системы на основе ВАЦ позволяют говорить о возможности достижения при калибровке и измерении следующих значений расширенных неопределенностей ($k=2$):

- коэффициента отражения от волноводного порта: на уровне 0,048;
- коэффициента отражения от коаксиального порта: на уровне 0,042;
- коэффициента передачи: на уровне 0,07 дБ для малых значений ослаблений;
- фазы коэффициента передачи: на уровне 0,40°.

Полученные значения неопределенности основаны на предварительной оценке систематических ошибок, которые, как ожидается, будут являться доминирующими при измерении S-параметров.

Для уточнения характеристик измерительной системы на основе ВАЦ необходимыми являются работы по стандартизации волноводных фланцев гребневого сечения и последующий анализ повторяемости волноводных соединений, поскольку повторяемость может являться существенным источником неопределенности при измерении S-параметров. В частности, необходимым является уменьшение допусков на стыковку волноводных фланцев, поскольку использование фланцев прямоугольных волноводов для волноводов гребневого сечения не позволяет достичь высокой повторяемости проводимых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Казарновский В. С., Крылов А. А.** Методы измерения параметров коаксиально-волноводных переходов и узлов с нестандартным сечением // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 8. С. 82–87.
2. ОСТ 107.750781.001-87 «Волноводы с поперечным сечением сложной формы. Параметры и размеры», 1988.
3. **Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П.** Справочник по элементам волноводной техники / 2-е изд. – М.: Советское радио, 1967.
4. **Marcuvitz N.** Waveguide Handbook. – MIT Rad. Lab. Ser. Vol. 10. – New York: McGraw-Hill, 1951.
5. **Ellerbruch D. A.** Evaluation of a Microwave Phase Measurement System // Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section C: Engineering and Instrumentation. 1965. V. 69C. № 1. P. 55–65.
6. EMPro Workshop 4.0 URL: https://www.keysight.com/upload/cm_upload/All/EMPro_Workshop_4.0.pdf (дата обращения: 12.03.17).
7. ГОСТ РВ 51914-2002 «Элементы соединения СВЧ трактов электронных измерительных приборов. Присоединительные размеры».
8. EA-04/02:1999 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
9. Р 50.1.109-2016 «Политика ИЛАК в отношении неопределенности при калибровках».
10. ГОСТ ИСО / МЭК 17025–2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».
11. **Ridler N. M., Salter M. J., Wilson A., Pollard R., Clarke R.** Traceability to National Standards for S parameter measurements of waveguide devices from 110 GHz to 170 GHz // 73rd ARFTG Microwave Measurement Conference. Boston: 2009. P. 127–136.
12. **Ridler N. M., Clarke R.** Establishing Traceability to the International System of Units for Scattering Parameter Measurements From 750 GHz to 1.1 THz // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2016. V. 6. № 1. P. 2–11.
13. ГОСТ 34100.3-2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения».
14. Measurement Uncertainty of VNA Based TDR/TDT Measurement. Application note // URL: literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-8406EN.pdf
15. EURAMET cg-12 Version 2.0 (03/2011) Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA).
16. **Dunsmore J. P.** Handbook of Microwave Component Measurements: with Advanced VNA Techniques. – John Wiley & Sons, Ltd., 2012. P. 176–196.
17. **Donecker B.** Determining the measurement accuracy of the HP 8510 microwave network analyzer. – URL: <http://na.support.keysight.com/faq/spec-ocr.pdf>
18. Keysight 2-Port and 4-Port PNA-X Network Analyzer N5244A, N5245A: Data Sheet and Technical Specifications. – URL: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/N5245-90008.pdf?id=1712187> (дата обращения: 12.03.2018).
19. ГОСТ Р 51318.16.4.2-2006 (СИСПР 16-4-2:2003) «Совместимость технических средств электромагнитная. Неопределенность измерений в области электромагнитной совместимости».
20. **Harris I. A., Warner F. L.** Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation // IEE Proceedings H – Microwaves, Optics and Antennas. 1981. V. 128. № 1. P. 35–41.
21. **Ridler N. M., Medley J. C.** An uncertainty budget for VHF and UHF reflectometers. – National Physical Laboratory, Teddington, UK, NPL Report DES120, 1992.