

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНО-ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ И УЗЛОВ С НЕСТАНДАРТНЫМ СЕЧЕНИЕМ

В.Казарновский<sup>1</sup>, А.Крылов<sup>2</sup>

УДК 621.31

ВАК 05.11.00

По мере развития систем радиолокации широкое распространение получают волноводы с поперечным сечением сложной формы, в том числе гребниевые волноводы П- и Н-образного сечения. Преимуществом волноводов П- и Н-образного сечения является расширенный (в сторону более низких частот) диапазон рабочих полос пропускания при сохранении достаточно высокого уровня предельной пропускаемой мощности. Для измерения параметров изделий с волноводными сечениями сложной формы применяют специальные калибровочные комплекты. Авторы статьи предлагают эффективную методику измерения параметров коаксиально-волноводных переходов и узлов с волноводным поперечным сечением сложной формы с использованием векторных анализаторов цепей компании Keysight Technologies.

**П**араметры и размеры волноводов гребниевой формы регламентируются отраслевым стандартом ОСТ 107.750781.001-87 [1]. Для калибровки волноводов с Н-сечением на рынке доступны специальные калибровочные комплекты семейства TRL ("перемычка – отражение – задержка"), выпускаемые зарубежными производителями, например Flann Microwave [2]. Однако, несмотря на то, что геометрические размеры волноводных труб П- и Н-сечений стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК) и России совпадают, фланцы калибровочных мер, выполненные по стандартам МЭК, невозможно использовать в России без при-

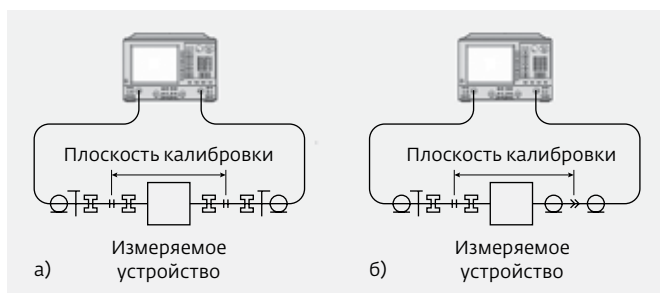
менения дополнительных переходов. Помимо волноводов с Н-образным сечением широкое распространение в России получают волноводы с П-сечением, для которых калибровочные эталоны, по данным авторов, не выпускаются.

В связи с этим актуальными задачами являются поиск и отработка оптимальных методик измерения амплитудно-частотных и фазо-частотных параметров как для изделий, выполненных с использованием волноводов с поперечным сечением сложной формы, так и для невстраиваемых устройств. Схемы измерения подобных устройств показаны на рис.1. Проанализируем методы векторного измерения параметров невстраиваемых двухпортовых устройств, с одной стороны которых подключен волновод с поперечным сечением сложной формы, а с другой – стандартный коаксиальный разъем.

При использовании волноводов с прямоугольным сечением, для которых предлагаются калибровочные

1 АО ФНПЦ "ННИПИ "Кварц" им. А.П.Горшкова", начальник сектора, +7 905 665-57-33, 19311939@mail.ru.

2 ООО "Кейсайт Текнолоджиз", инженер по поддержке оборудования, +7 831 425-80-60, andrey.kryilov@keysight.com.



**Рис.1.** Схемы измерений: а - устройств с волноводными сечениями сложной формы, б - невстраиваемых устройств с коаксиальными и волноводными соединителями

комплекты, параметры коаксиально-волноводных переходов (КВП) могут быть измерены на основе стандартного метода "неизвестная перемычка" (unknown thru) [3]. Для полной двухпортовой калибровки на основе данного метода необходимо выполнить две однопортовые калибровки с каждой стороны устройства, после чего измерить проходное устройство, параметры которого исключаются из результатов калибровки. Для калибровки каждого из портов необходим калибровочный комплект типа SOLT ("короткое замыкание – холостой ход – согласованная нагрузка – перемычка"), для волноводного калибровочного комплекта в качестве меры холостого хода OPEN используется отрезок  $\lambda_g/4$  (где  $\lambda_g$  – длина TEM-волны в волноводе на центральной частоте) с мерой короткого замыкания SHORT.

В качестве меры "неизвестная перемычка" может применяться коаксиально-волноводный переход. К проходной мере "неизвестная перемычка" предъявляются дополнительные требования:

- взаимность ( $S_{21} = S_{12}$ );
- уровень вносимых потерь не более 40 дБ;
- электрическая длина должна быть известна с погрешностью  $\lambda_g/4$ .

Какие методы калибровки волноводного тракта предусмотрены в векторных анализаторах цепей? В описаниях приборов указывается, что метод "неизвестная перемычка" не может использоваться совместно с TRL-калибровкой. Изготовление мер типа SOLT для калибровки гребниевых волноводов является сложной и дорогостоящей задачей, в отличие от мер семейства TRL. В частности, наибольшие трудности могут возникнуть при изготовлении и аттестации меры волноводной нагрузки LOAD.

Для преодоления данной проблемы в методе "неизвестная перемычка" можно использовать технику калибровки "со смещенной нагрузкой" (offset load calibration) [3, 4, 5]. Нагрузка со смещением представляет собой меру, состоящую из элемента нагрузки и двух известных элементов смещения. Процесс двухпортовой кали-

бровки аналогичен классическому методу "неизвестная перемычка", за исключением того, что, помимо измерения волноводной нагрузки, дополнительно измеряется волноводная нагрузка с мерой LINE для обеспечения фазового сдвига. Метод "со смещенной нагрузкой" не требует использования аттестованной волноводной нагрузки, что позволяет применять в качестве нагрузки КВП с коаксиальной нагрузкой из комплекта калибровочных мер. В случае калибровки по методу "со смещенной нагрузкой" метрологическим стандартом является мера LINE.

В векторных анализаторах цепей серий PNA и PNA-X компании Keysight Technologies наряду с методом "неизвестная перемычка" реализован метод "исключение адаптера" (adapter removal) [3, 4, 5], который предусматривает выполнение двух полных двухпортовых калибровок с каждой стороны КВП с последующей калибровкой на проход. Метод "исключение адаптера" не накладывает ограничений на совместимость SOLT- и TRL-калибровок, что позволяет выполнять TRL-калибровку со стороны гребниевых волноводов и SOLT-калибровку со стороны коаксиального тракта. Кроме того, при использовании данного метода отсутствуют ограничения, накладываемые на проходной элемент.

Применительно к двухпортовой TRL-калибровке гребниевых волноводов важно отметить, что фланцы волноводов совпадают по геометрическим размерам с фланцами стандартных прямоугольных волноводов российского производства, поэтому можно использовать меру короткого замыкания SHORT из соответствующего комплекта скалярного измерителя, а проходную меру THRU можно изготовить путем сопряжения двух КВП. При изготовлении меры LINE с требуемым сечением гребниевых волноводов ее геометрические размеры и допуски должны соответствовать калибруемому тракту. Геометрические размеры меры LINE служат эталоном волнового сопротивления. Неидеальность КВП гребниевых сечений учитывается в результате TRL-калибровки.

Для экспериментальной проверки предложенных методов калибровки авторы провели измерение КВП сечениями 23×10 мм и 3,5×1,5 мм в трех программах, предусмотренных векторными анализаторами цепей (рис.2).

1. Калибровка и измерение КВП методом "неизвестная перемычка". В качестве калибровочных мер волноводного тракта использовался стандартный волноводный комплект от скалярного измерителя 23×10 мм с добавлением  $\lambda_g/4$  этого тракта (длиной 9,71 мм). В качестве коаксиальных мер применялся комплект мер 85052B от Keysight Technologies.
2. Калибровка и измерение КВП методом "неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой". В качестве волноводной нагрузки использовался КВП с накру-



Рис.2. Измерительный стенд для калибровки и измерения параметров КВП

ченной коаксиальной согласованной нагрузкой из комплекта мер 85052В. Остальные калибровочные меры выбирали из стандартного волноводного комплекта от скалярного измерителя 23×10 мм с добавлением меры LINE. В качестве меры LINE применялся отрезок  $\lambda_g/4$  (9,71 мм) тракта 23×10 мм, а в качестве коаксиальных мер – комплект 85052В компании Keysight Technologies.

3. Калибровка и измерение КВП в программе "исключение адаптера". Для калибровки волновода в программе TRL использовался стандартный волноводный комплект от скалярного измерителя 23×10 мм с добавлением меры LINE. В качестве меры LINE применялся отрезок  $\lambda_g/4$  (9,71 мм) тракта 23×10 мм. Волноводная нагрузка не использовалась. В качестве коаксиальных мер был использован комплект 85052В компании Keysight Technologies.

В таблице приведена сводная информация о методах калибровок с указанием эталона волнового сопротивления волноводного тракта и количества шагов калибровки при использовании механического калибро-

Краткое описание рассматриваемых методов калибровок

Метод калибровки	Количество шагов калибровки	Эталон волнового сопротивления
Неизвестная перемычка (unknown thru)	7	Мера LOAD
Неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой (unknown thru with offset load)	8	Мера LINE
Исключение адаптера (adapter removal)	11	Мера LINE

вочного комплекта коаксиального тракта. Применение электронного калибровочного комплекта для коаксиального тракта (ECal) позволяет уменьшить количество шагов калибровки.

До начала процедур калибровки в интерфейс векторного анализатора цепей было внесено описание волноводного комплекта калибровочных мер сечением 23×10 мм (рис.3). В описании комплекта указываются рабочий диапазон частот волновода, критическая частота, электрическая длина для мер  $\lambda_g/4$  и OFFSET SHORT. В описании смещенной волноводной нагрузки OFFSET LOAD необходимо указать меры смещения (offset standards). В нашем случае в качестве мер смещения выбраны нулевое смещение (мера THRU) и отрезок волновода  $\lambda_g/4$  (мера LINE). Подробнее об описании калибровочных комплектов можно узнать в [3, 5].

Калибровка и измерения параметров КВП выполнялись тремя рассматриваемыми методами. Измерения проводились в следующих режимах: диапазон частот 8,15...12,05 ГГц, количество точек 5001, полоса фильтра ПЧ 10 кГц, уровень мощности 0 дБм.

Сравнение полученных кривых (рис.4–10) показало следующие результаты (черная кривая – метод "неизвестная перемычка", красная – метод "исключение адаптера", зеленая – метод "неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой", синяя – метод "исключение адаптера" при калибровке КВП с металлической вставкой).

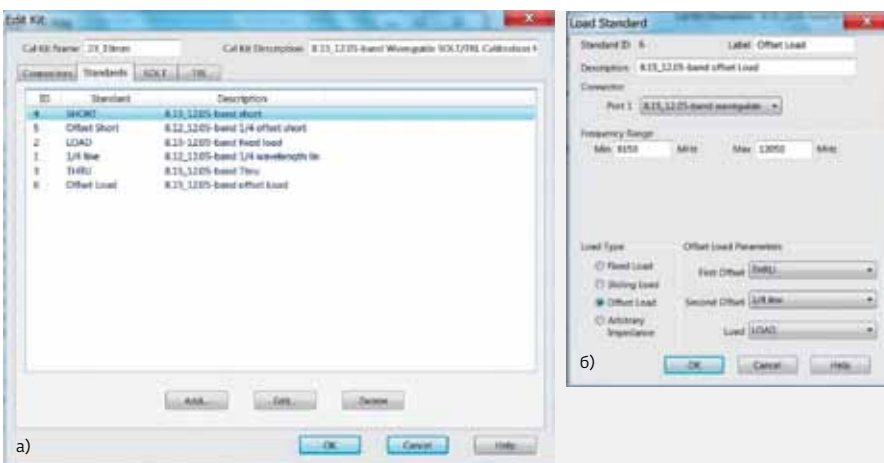


Рис.3. Описание волноводного комплекта калибровочных мер сечением 23×10 мм: а) список калибровочных мер, б) описание меры Offset Load

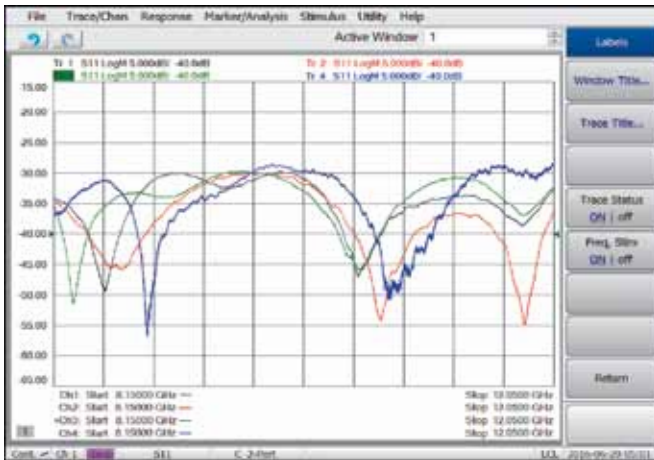


Рис.4. Результаты измерения коэффициента отражения  $S_{11}$  в логарифмическом формате

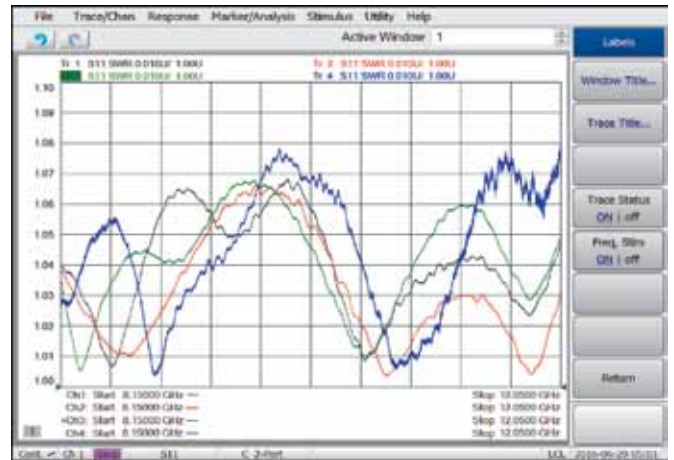


Рис.5. Результаты измерения коэффициента отражения  $S_{11}$  в формате КСВ

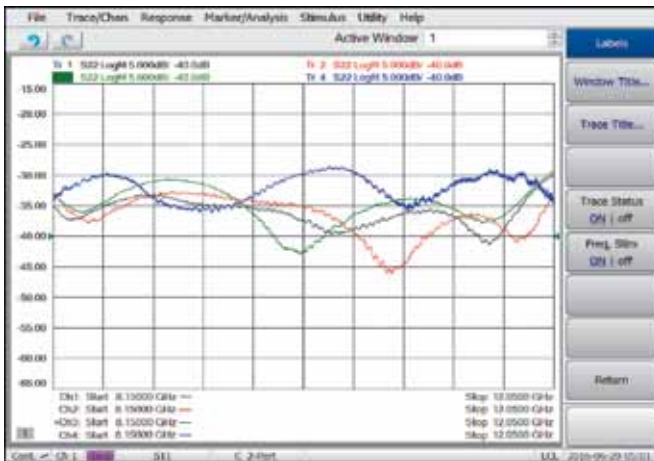


Рис.6. Результаты измерения коэффициента отражения  $S_{22}$  в логарифмическом формате

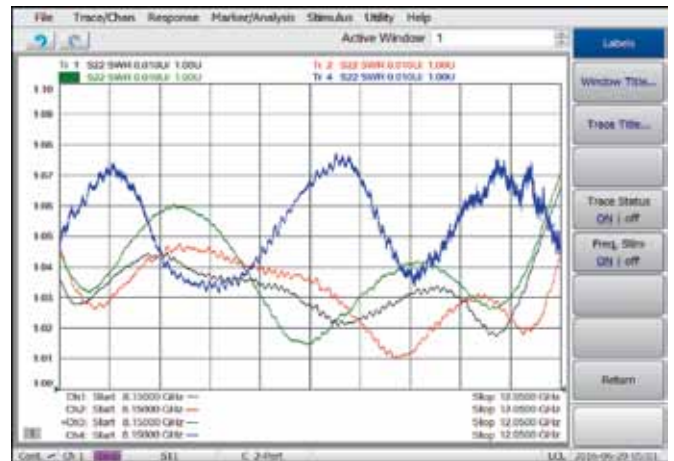


Рис.7. Результаты измерения коэффициента отражения  $S_{22}$  в формате КСВ

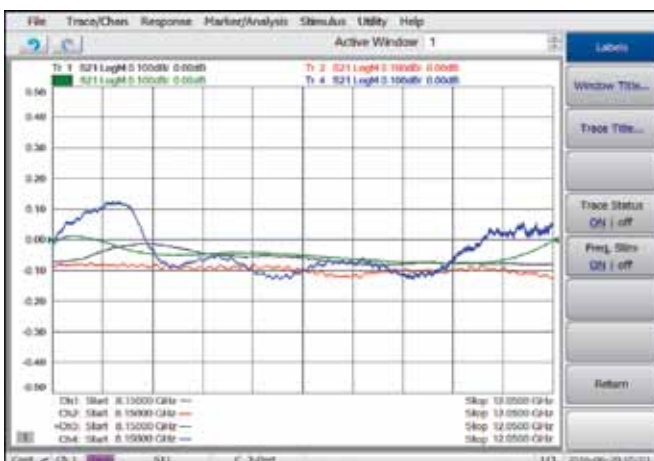


Рис.8. Результаты измерения коэффициента передачи  $S_{21}$  в логарифмическом формате

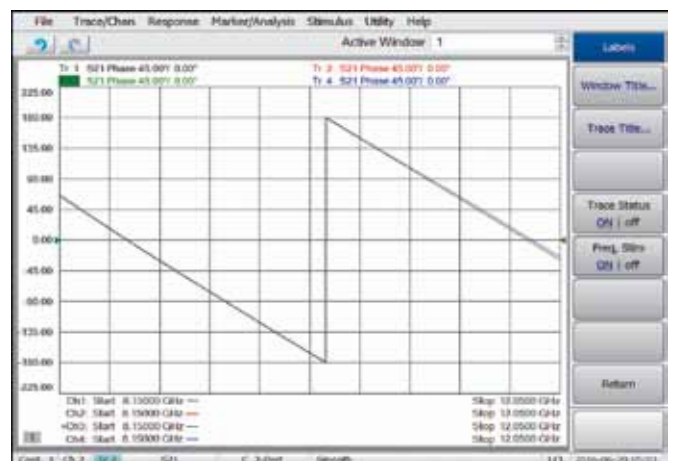


Рис.9. Результаты измерения коэффициента передачи  $S_{21}$  в формате "фаза"



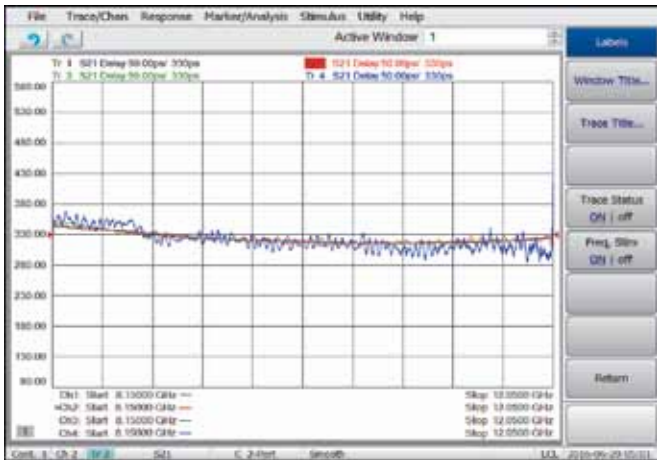


Рис.10. Результаты измерения коэффициента передачи  $S_{21}$  в формате "задержка"

Измерение коэффициента отражения  $S_{11}$  (коаксиальный вход КВП) и коэффициента отражения  $S_{22}$  (волноводный вход КВП) дает разброс примерно 5 дБ на уровне  $-30$  дБ (коэффициент стоячей волны (КСВ) составляет 1,1).

Результаты измерения коэффициента передачи  $S_{21}$  в форматах "фаза" и "задержка" идентичны. Измерение коэффициента передачи  $S_{21}$  в логарифмическом формате дает разброс примерно 0,2 дБ. Полученное несоответствие при измерении коэффициента передачи  $S_{21}$  приемлемо и может дать удовлетворительный результат при измерении узлов с коэффициентом передачи  $S_{21}$  в диапазоне от  $-6$  до 30 дБ.

Для проверки повторяемости результатов была выполнена четырехкратная калибровка методом "исключение адаптера" (рис.11). Следует отметить, что разброс коэффициента передачи  $S_{21}$  на уровне  $\pm 0,05$  дБ и КСВ ниже значения 1,06 обусловлены отсутствием установочных штифтов на волноводных узлах и использованием волноводной нагрузки с КСВ не более 1,06 при калибровке методом "неизвестная перемычка".

Для проверки корректности работы алгоритма TRL-калибровки при использовании неидеальных по параметрам КВП был изготовлен КВП с металлической вставкой (рис.12). Результаты измерения КСВ по волноводному входу ( $S_{11}$ ) и коаксиальному входу ( $S_{22}$ ) данного КВП показали, что КСВ для КВП с металлической вставкой составило не менее трех в диапазоне частот 8,15–12,05 ГГц (рис.13). Сравнение с полученными ранее значениями КСВ не более 1,1 для КВП без металлической вставки (см. рис.5, 7) позволяет считать КВП с металлической вставкой неидеальным.

Проводилось также повторное измерение параметров КВП сечениями 23 × 10 мм и 3,5 × 1,5 мм в ходе калибровки методом "исключение адаптера". В данном случае

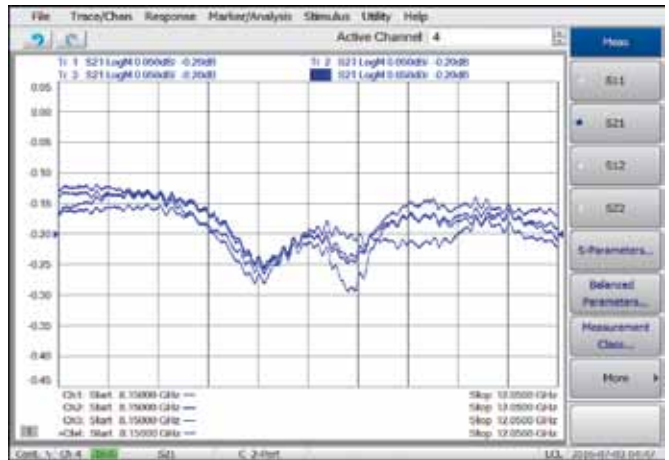


Рис.11. Результаты измерения коэффициента передачи  $S_{21}$  КВП при четырехкратной калибровке анализатора цепей

волноводной плоскостью калибровки являлся волноводный фланец КВП с металлической вставкой. Результаты измерения оказались близки к значениям, полученным при калибровке КВП без металлической вставки (см. синие кривые на рис.4–10).

\* \* \*

Таким образом, калибровка методами "неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой" и "исключение адаптера" позволяет упростить задачу измерения, поскольку данные методы не требуют изготовления и аттестации волноводных калибровочных мер семейства SOLT.

Для измерения узлов с гребенчатыми волноводами достаточно изготовить два КВП с требуемыми размерами волноводного тракта, но с ненормируемыми параметрами, а также меру LINE с трактом, параметры которого точно соответствуют стандарту на данный тип вол-



Рис.12. КВП с металлической вставкой

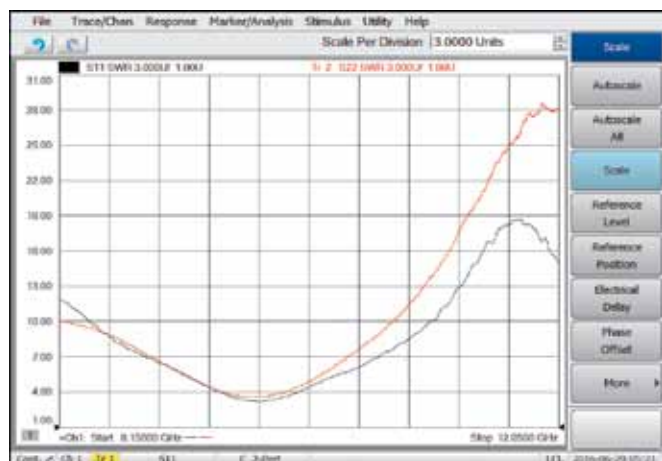


Рис.13. КСВ для КВП с металлической вставкой

новода. Длина меры LINE должна быть такой, чтобы в полосе частот волновода ее фазовая длина находилась в пределах 20–160°. Поскольку максимальный коэффициент перекрытия диапазонов рабочих частот для волноводов П- и Н-сечений, согласно отраслевому стандарту ОСТ 107.750781.001-87, составляет не более 3,6, то для проведения TRL-калибровки достаточно изготовить одну меру LINE. Соблюдение геометрических размеров меры

LINE при ее изготовлении позволяет в дальнейшем корректно выполнять калибровку в программе TRL с учетом неидеальности КВП.

Методы "неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой" и "исключение адаптера" позволяют провести калибровку тракта с возможностью последующей настройки и измерения узлов с гребенчатыми волноводами. Методы калибровки "неизвестная перемычка со смещенной нагрузкой" и "исключение адаптера" могут быть применимы для волноводных трактов с нестандартными сечениями.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ОСТ 107.750781.001–87. Волноводы с поперечным сечением сложной формы. Параметры и размеры, 1988 г.
2. <http://www.flann.com/wp-content/uploads/2015/09/Double-Ridge-Waveguide-Calibration-Kits.pdf>
3. PNA Series Network Analyzers help. – <http://na.support.keysight.com/pna/help/latest/help.htm>.
4. Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers. – [http://anlge.umd.edu/Agilent\\_Advanced\\_VNA\\_calibration.pdf](http://anlge.umd.edu/Agilent_Advanced_VNA_calibration.pdf).
5. Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers. Application Note 5989-4804EN // Keysight Technologies, 2016. P. 42.