

УДК 621.317.7

В.Г. Губа, А.А. Ладур, А.А. Савин

Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей

Рассмотрены методы выполнения различных калибровок векторного анализатора цепей для выполнения измерений параметров рассеяния пассивных СВЧ-устройств. Приведены краткий математический аппарат и анализ, даны рекомендации по применению.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, коэффициент отражения, коэффициент передачи, векторная калибровка, коррекция измерений, погрешность измерений, однопортовое устройство, нагрузка, двухпортовое устройство.

При тестировании исследуемых устройств (ИУ) с целью высокоточного измерения их параметров рассеяния (S -параметров) при помощи векторных анализаторов цепей (ВАЦ) очень важно минимизировать систематическую погрешность измерений. С возрастанием частоты зондирующего сигнала, как правило, ухудшаются свойства тракта распространения. Это проявляется возрастанием КСВН аксессуаров, увеличением частотной неравномерности передачи элементов тракта, появлением различных паразитных проникновений сигналов. Все перечисленные явления вносят вклад в систематическую погрешность измерений. Для определения составляющих (факторов) систематической погрешности используется процедура калибровки ВАЦ. Для исключения погрешности применяется математическая коррекция результатов измерений.

При разработке ВАЦ диапазона частот до 20 ГГц и тем более до 50 ГГц или выше нельзя не учитывать то, каким образом будет выполняться калибровка прибора. Чтобы правильно выполнить проектирование прибора и калибровочных средств для него, необходимо четко представлять современные достижения в области калибровки и коррекции в ВАЦ.

В работе обобщается опыт применения наиболее распространенных в настоящее время методов калибровки ВАЦ [1, 2]. При этом не делается акцент на то, каким именно способом выполняется калибровка: с помощью механического набора мер, с помощью электронного калибратора, в автоматическом режиме на зондовой станции или еще как-то. И прежде приведем краткую классификацию типов калибровки ВАЦ.

1. Краткая классификация методов калибровки ВАЦ

Существуют следующие виды калибровок двухпортовых ВАЦ:

- нормировка для измерения коэффициента отражения (КО);
- нормировка для измерения коэффициента передачи (КП);
- однопортовая векторная калибровка;
- двухпортовая калибровка в одном направлении;
- полная двухпортовая калибровка.

Все эти калибровки предполагают измерение комплексных частотных характеристик различных одно- или двухпортовых устройств.

Кроме этого, для выполнения высокоточных измерений при помощи ВАЦ можно использовать преобразование частотного описания цепей во временное и обратно. Например, можно проводить тестирование ИУ через идеальные отрезки линий передачи достаточной длины с последующим выделением отклика ИУ во временной области. Так, при работе ВАЦ до 50 ГГц разрешение по времени при известных условиях может достигать 6 мм. Проблемы выполнения измерений с привлечением обработки во временной области и другие не рассматриваются в данной работе. Основное внимание уделим наиболее точному типу калибровки, используемому в настоящее время в двухпортовых ВАЦ, – полной векторной двухпортовой калибровке в частотной области.

2. Модели ВАЦ

При построении аппарата калибровки и коррекции измерений полагают, что существует идеальная (неискажающая) часть ВАЦ, а все погрешности сводят в линейные искажающие адаптеры (ИА). Очевидно, что параметры искажающих адаптеров не должны меняться во времени.

Существуют как минимум две модели ВАЦ, пригодные для получения алгоритмов калибровки. Эти модели изображены на рис. 1 и 2. На рисунках факторы (составляющие) систематической погрешности обозначены через e_{\bullet} (наличие штриха означает изменение соответствующей составляющей для порта, который работает в режиме приема зондирующего сигнала). Приемники ВАЦ измеряют комплексные амплитуды сигналов a_1 , b_1 и b_2 при прямом зондировании (из первого порта во второй) и a_2 , b_1 и b_2 – при обратном (из второго порта в первый). Опорные приемники измеряют сигналы a_{\bullet} , измерительные – b_{\bullet} . Полученные амплитуды определяют некорректированные (измеряемые) S -параметры:

$$S_{11}^M = \frac{b_{1F}}{a_{1F}}, S_{21}^M = \frac{b_{2F}}{a_{1F}}, S_{12}^M = \frac{b_{1R}}{a_{2R}}, S_{22}^M = \frac{b_{2R}}{a_{2R}}. \quad (1)$$

Индексы F (от Forward – прямой) и R (от Reverse – обратный) определяют направление зондирования.

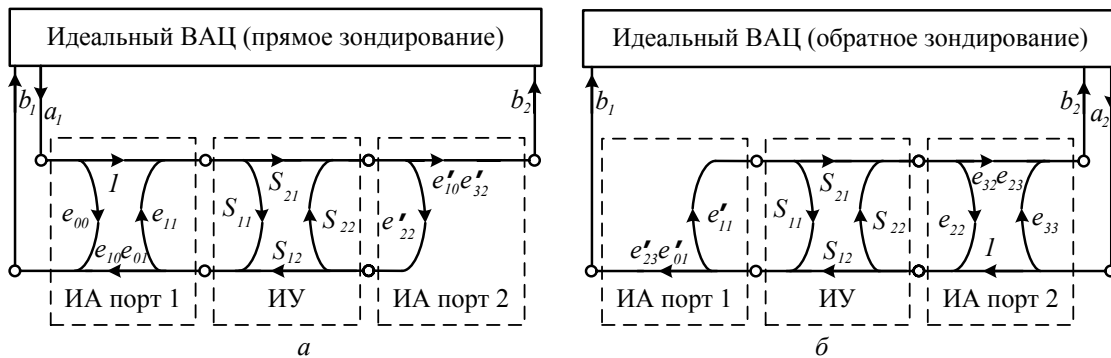


Рис. 1. Графы 10-параметрической модели ВАЦ: a – прямое; b – обратное зондирование

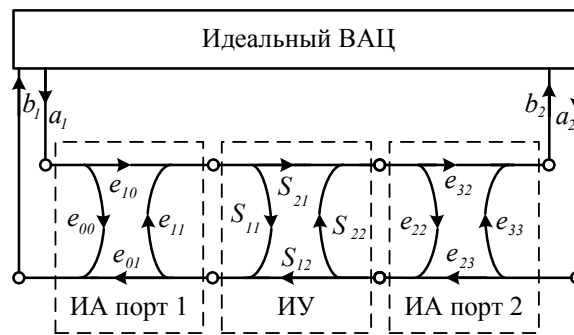


Рис. 2. Граф 8-параметрической модели ВАЦ

Неизвестными в 10-параметрической модели являются: e_{00} , e_{11} , e'_{22} , $e_{10}e_{01}$, $e'_{10}e'_{32}$, e_{33} , e_{22} , e'_{11} , $e_{32}e_{23}$ и $e'_{23}e'_{01}$; в 8-параметрической: e_{00} , e_{11} , e_{10} , e_{01} , e_{33} , e_{22} , e_{32} и e_{23} .

Существует модель с 16 параметрами, которая получается из 8-параметрической модели путем добавления ветвей графа, описывающих всевозможные паразитные проникновения сигналов. По этой причине такую модель следует использовать в ВАЦ в составе зондовых станций, особенно на частотах до 50 ГГц или выше. Очевидно, что из упомянутых наиболее полной является именно 16-параметрическая модель ВАЦ, так как она учитывает наибольшее число факторов систематических погрешностей измерений 4 S -параметров двухпортового ИУ. В настоящей работе данная модель детально не анализируется.

Модель с 8 параметрами может быть преобразована в модель с 10 параметрами путем привлечения дополнительных измерений в схеме с 4 приемниками (a_2 при прямом зондировании и a_1 при обратном). В свою очередь, к 10 параметрам можно добавить два основных паразитных проникновения сигнала и в результате получить основную для современных ВАЦ 12-параметрическую модель. Данная модель показана на рис. 3 и является базовой для алгоритма коррекции измерений, который дается ниже. В табл. 1 приведены названия и обозначения для всех факторов систематической погрешности.

Факторы погрешности имеют определенный физический смысл и моделируют отражения и искажения сигналов при прохождении цепей внутри прибора, различных кабельных сборок и переходов вне его вплоть до разъёма, к которому подключается ИУ. Например, частотную неравномерность трактов формируют цепи передачи сигнала между точками ответвлениями сигнала в опорный и измерительный приемники. Направленность складывается из сигналов, поступающих на вход измерительного приемника до их отражения от ИУ.

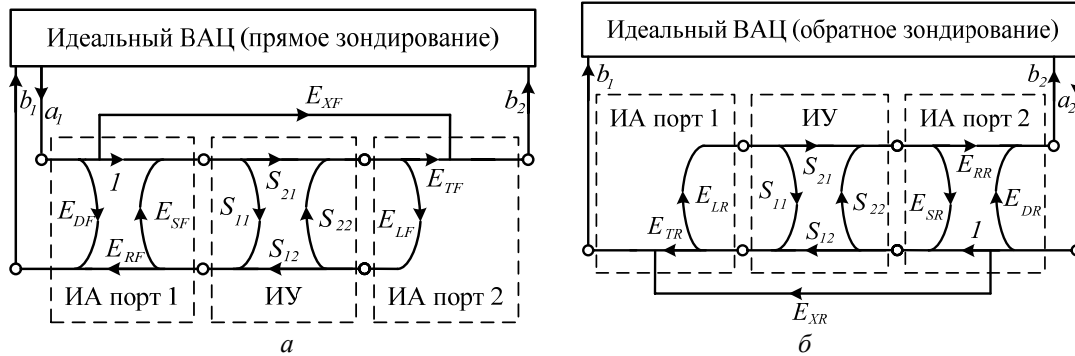


Рис. 3. Графы 12-параметрической модели ВАЦ: а – прямое; б – обратное зондирование

Таблица 1

Факторы систематической погрешности ВАЦ

Тип	Название	Обозначение	Модель
1. Паразитное проникновение	Направленность	E_D	$E_{DF} = e_{00}$ $E_{DR} = e_{33}$
	Изоляция	E_X	$E_{XF} = e_{30}$ $E_{XR} = e_{03}$
2. Паразитное отражение	Рассогласование источника сигнала	E_S	$E_{SF} = e_{11}$ $E_{SR} = e_{22}$
	Рассогласование нагрузки	E_L	$E_{LF} = e'_{22}$ $E_{LR} = e'_{11}$
3. Частотная неравномерность	Неравномерность тракта отраженного сигнала	E_R	$E_{RF} = e_{10}e_{01}$ $E_{RR} = e_{32}e_{23}$
	Неравномерность тракта передаваемого из порта в порт сигнала	E_T	$E_{TF} = e'_{10}e'_{32}$ $E_{TR} = e'_{23}e'_{01}$

Измеренные S-параметры (как решение соответствующих потоковых графов, рис. 3) равны:

$$S_{11}^M = E_{DF} + E_{RF} \frac{S_{11} - E_{LF}(S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12})}{1 - E_{SF}S_{11} - E_{LF}S_{22} + E_{SF}E_{LF}(S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12})}, \tag{2}$$

$$S_{21}^M = E_{XF} + \frac{E_{TF}S_{21}}{1 - E_{SF}S_{11} - E_{LF}S_{22} + E_{SF}E_{LF}(S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12})}, \tag{3}$$

$$S_{22}^M = E_{DR} + E_{RR} \frac{S_{22} - E_{LR}(S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12})}{1 - E_{SR}S_{22} - E_{LR}S_{11} + E_{SR}E_{LR}(S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12})}, \tag{4}$$

$$S_{12}^M = E_{XR} + \frac{E_{TR}S_{12}}{1 - E_{SR}S_{22} - E_{LR}S_{11} + E_{SR}E_{LR}(S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12})}, \tag{5}$$

где S_{\bullet} – истинные (действительные) значения S-параметров.

Для исключения влияния ИА на результаты измерений S-параметров необходимо провести коррекцию, т.е. решить (2)–(5) относительно истинных значений S-параметров. Коррекция или оценка действительных значений S-параметров выполняется по формулам:

$$\hat{S}_{11} = \left[(1 + D\hat{E}_{SR})A - \hat{E}_{LF}BC \right] / \left[(1 + A\hat{E}_{SF})(1 + D\hat{E}_{SR}) - CB\hat{E}_{LR}\hat{E}_{LF} \right], \tag{6}$$

$$\hat{S}_{21} = \left[[1 + D(\hat{E}_{SR} - \hat{E}_{LF})]B \right] / \left[(1 + A\hat{E}_{SF})(1 + D\hat{E}_{SR}) - CB\hat{E}_{LR}\hat{E}_{LF} \right], \tag{7}$$

$$\hat{S}_{12} = \left[\left[1 + A(\hat{E}_{SF} - \hat{E}_{LR}) \right] C \right] / \left[(1 + A\hat{E}_{SF})(1 + D\hat{E}_{SR}) - CB\hat{E}_{LR}\hat{E}_{LF} \right], \quad (8)$$

$$\hat{S}_{22} = \left[(1 + A\hat{E}_{SF})D - \hat{E}_{LR}BC \right] / \left[(1 + A\hat{E}_{SF})(1 + D\hat{E}_{SR}) - CB\hat{E}_{LR}\hat{E}_{LF} \right], \quad (9)$$

где $A = (S_{11}^M - \hat{E}_{DF}) / \hat{E}_{RF}$, $B = (S_{21}^M - \hat{E}_{XF}) / \hat{E}_{TF}$, $C = (S_{12}^M - \hat{E}_{XR}) / \hat{E}_{TR}$, $D = (S_{22}^M - \hat{E}_{DR}) / \hat{E}_{RR}$.

Оценки факторов \hat{E}_\bullet должны быть получены по результатам калибровки.

В настоящей работе рассмотрим два семейства полных векторных двухпортовых калибровок – условно *SOLT* и *TRL*, отличающихся способом определения оценок \hat{E}_\bullet (или \hat{e}_\bullet). При рассмотрении алгоритмов калибровок из указанных семейств на первом этапе будем полагать, что выходные разъемы портов ВАЦ таковы, что возможно непосредственное подключение портов друг к другу. Всегда оценки факторов изоляции \hat{e}_{30} и \hat{e}_{03} либо приравняются 0, либо измеряются как параметры S_{21} и S_{12} при подключении к обоим портам ВАЦ согласованных нагрузок.

3. Основные семейства двухпортовых калибровок ВАЦ

3.1. Семейство калибровок *SOLT*. Основой для всевозможных калибровок из семейства *SOLT* (от первых букв слов: Short – короткозамкнутая нагрузка (КЗ), Open – нагрузка холостого хода (XX), Load – согласованная нагрузка (СН) и Thru – перемычка между портами) является 10-параметрическая модель ВАЦ, которая приведена на рис. 1. Обозначение *SOLT* отражает суть метода и полностью определяет только одну основную калибровку данного семейства. Тем не менее существует одно важное обстоятельство, которое объединяет основную калибровку со всеми остальными из данного семейства. Заключается оно в том, что для определения неизвестных факторов систематических погрешностей процедура калибровки разбивается на три этапа:

1. Однопортовая калибровка первого порта (условно *SOL*).
2. Однопортовая калибровка второго порта (условно *SOL*).
3. Калибровка на проход (условно *T*).

Известны следующие типы однопортовых калибровок, отличающиеся техническими деталями при получении данных для вектора измерений:

- с использованием нагрузок КЗ, XX и фиксированной СН;
- с использованием нагрузок КЗ, XX и рассогласованной нагрузки (РН) с известным КО;
- с использованием нескольких (трех или более) нагрузок КЗ с разной, известной длиной;
- с использованием нагрузок КЗ, XX и подвижной СН;
- с использованием нагрузки КЗ и двух подвижных нагрузок с разными КО.

Независимо от типа калибровки в рамках рассматриваемого семейства одинаковым является этап № 3. Рассмотрим его, полагая, что однопортовые калибровки выполнены успешно и оценки факторов e_{00} , e_{11} , $e_{10}e_{01}$, e_{33} , e_{22} , и $e_{32}e_{23}$ уже известны.

Напомним, что ранее было выдвинуто предположение о том, что порты ВАЦ допускают непосредственное соединение их друг с другом. Ситуация, когда это невозможно, рассматривается ниже в разд. 4. Итак, по результатам тестирования идеальной перемычки или непосредственного соединения портов (*Thru*) необходимо определить оценки 4 параметров: e'_{22} , $e'_{10}e'_{32}$, e'_{11} и $e'_{23}e'_{01}$. Матрица *S*-параметров для идеальной перемычки имеет вид

$$\mathbf{S}_{THRU} = \begin{bmatrix} S_{11,T} & S_{12,T} \\ S_{21,T} & S_{22,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Измеренные *S*-параметры такого ИУ \mathbf{S}_{THRU}^M содержат систематические погрешности, обусловленные влиянием ИА. Чтобы записать выражения для искомым величин, необходимо рассмотреть потоковый граф модели ВАЦ (рис. 1) для ИУ (10). В итоге:

$$\hat{e}'_{22} = \frac{(S_{11,T}^M - \hat{e}_{00})(1 - \hat{e}_{11}S_{11,T}) - \hat{e}_{10}\hat{e}_{01}S_{11,T}}{(S_{11,T}^M - \hat{e}_{00})(S_{22,T} - \hat{e}_{11}\det\mathbf{S}_{THRU}) - \hat{e}_{10}\hat{e}_{01}\det\mathbf{S}_{THRU}} = \frac{(S_{11,T}^M - \hat{e}_{00})}{\hat{e}_{10}\hat{e}_{01} + \hat{e}_{11}(S_{11,T}^M - \hat{e}_{00})}, \quad (11)$$

$$\hat{e}'_{10}\hat{e}'_{32} = \frac{S_{21,T}^M(1-\hat{e}_{11}S_{11,T}-\hat{e}_{22}S_{22,T}+\hat{e}_{11}\hat{e}_{22}\det\mathbf{S}_{THRU})}{S_{21,T}} = S_{21,T}^M(1-\hat{e}_{11}\hat{e}_{22}) = \frac{S_{21,T}^M\hat{e}_{10}\hat{e}_{01}}{\hat{e}_{10}\hat{e}_{01}+\hat{e}_{11}(S_{11,T}^M-\hat{e}_{00})}, \quad (12)$$

$$\hat{e}'_{11} = \frac{(S_{22,T}^M-\hat{e}_{33})(1-\hat{e}_{22}S_{22,T})-\hat{e}_{32}\hat{e}_{23}S_{22,T}}{(S_{22,T}^M-\hat{e}_{33})(S_{11,T}-\hat{e}_{22}\det\mathbf{S}_{THRU})-\hat{e}_{32}\hat{e}_{23}\det\mathbf{S}_{THRU}} = \frac{(S_{22,T}^M-\hat{e}_{33})}{\hat{e}_{32}\hat{e}_{23}+\hat{e}_{22}(S_{22,T}^M-\hat{e}_{33})}, \quad (13)$$

$$\hat{e}'_{23}\hat{e}'_{01} = \frac{S_{12,T}^M(1-\hat{e}_{22}S_{22,T}-\hat{e}_{11}S_{11,T}+\hat{e}_{22}\hat{e}_{11}\det\mathbf{S}_{THRU})}{S_{12,T}} = S_{12,T}^M(1-\hat{e}_{22}\hat{e}_{11}) = \frac{S_{12,T}^M\hat{e}_{32}\hat{e}_{23}}{\hat{e}_{32}\hat{e}_{23}+\hat{e}_{22}(S_{11,T}^M-\hat{e}_{33})}, \quad (14)$$

где $\det\mathbf{S}_{THRU} = S_{11,T}S_{22,T} - S_{21,T}S_{12,T}$ – определитель матрицы \mathbf{S}_{THRU} , равный -1 для (10). Как видим, алгоритм калибровки допускает применение в качестве стандарта «перемычка.ел 4, в котором рассматриваются специальные калибровки, в том числе из семейства *SOLT*.

Точность калибровок *SOLT* существенно зависит от точности априорной информации о действительных значениях *S*-параметров калибровочных стандартов, от их стабильности во времени в процессе эксплуатации, от качества изготовления нагрузок и соединителей. Алгоритмы *TRL* калибровок не требуют такого большого объема априорной информации.

3.2. Семейство калибровок *TRL*. Семейство *TRL* (от первых букв слов: *Thru* – перемычка между портами, *Reflect* – мера отражения, *Line* – линия передачи между портами) объединяет двухпортовые калибровки ВАЦ, использующие 8-параметрическую модель, содержащую факторы: e_{00} , e_{11} , e_{10} , e_{01} , e_{33} , e_{22} , e_{32} и e_{23} (рис. 2). Данную 8-параметрическую модель ВАЦ, которую, как было сказано ранее, можно преобразовать в 10-параметрическую, несложно нормализовать и получить 7 неизвестных параметров. Знание 7 параметров достаточно для восстановления всех факторов \hat{E}_\bullet , которые используются для выполнения коррекции измерений в соответствии с (6)–(9). Для этого должны быть привлечены дополнительные измерения в схеме ВАЦ с 4 приемниками. То есть для двухпортового ВАЦ с общим опорным приемником применение аппарата *TRL* затруднительно.

Для нахождения 7 неизвестных необходимо выполнить минимум 7 измерений. В табл. 2 обобщены сведения практически обо всех калибровках, входящих в семейство *TRL* (в круглых скобках для каждого стандарта указано число получаемых измерений). Алгоритм нахождения неизвестных мало зависит от конкретного типа калибровки из семейства *TRL*. Однако необходимо правильным образом задавать исходные данные для начала расчета в каждой точке по частоте.

Таблица 2

Краткое описание калибровок из семейства *TRL*

Название	Стандарт № 1	Стандарт № 2	Стандарт № 3
<i>TRL</i> и <i>LRL</i>	Перемычка [T] или линия [L] с известными <i>S</i> -параметрами (4)	Неизвестный стандарт на отражение [R] на оба порта (1)	Линия [L] с известными КО S_{11} и S_{22} (2)
<i>TRM</i> и <i>LRM</i>	Перемычка [T] или линия [L] с известными <i>S</i> -параметрами (4)	Неизвестный стандарт на отражение [R] на оба порта (1)	Известная СН [M] на оба порта (2)
<i>TRA</i> и <i>LRA</i>	Перемычка [T] или линия [L] с известными <i>S</i> -параметрами (4)	Неизвестный стандарт на отражение [R] на оба порта (1)	Аттенюатор [A] с известными КО (2)
<i>TXYZ</i> и <i>LXYZ</i>	Перемычка [T] или линия [L] с известными <i>S</i> -параметрами (4)	3 известных отражения [X], [Y] и [Z] на порт 1 или порт 2 (3)	
<i>TXYX</i> и <i>LXYX</i>	Перемычка [T] или линия [L] с известными <i>S</i> -параметрами (4)	2 известных отражения [X] и [Y] на порт 1 (2)	1 известное отражение [X] на порт 2 (1)
<i>TRRM</i> и <i>LRRM</i>	Перемычка [T] или линия [L] с известными <i>S</i> -параметрами (4)	2 неизвестных [R] и [R] равных отражения на порт 1 и порт 2 (2)	Известная СН [M] на порт 2 (1)
<i>UXYZ</i>	Неизвестная линия [U] с $S_{21} = S_{12}$ (1)	3 известных отражения [X], [Y] и [Z] на порт 1 (3)	3 известных отражения [X], [Y] и Z на порт 2 (3)

Воздушные линии являются эталонами волнового сопротивления. Качество калибровки *TRL* фактически определяется качеством изготовления воздушной линии. В результате алгоритмы *TRL*

могут обеспечить максимальную точность определения факторов систематической погрешности, а значит – максимальную точность измерений среди всех известных алгоритмов калибровки. В зависимости от специфики ИУ, имеющегося набора мер и требуемого частотного диапазона следует выбирать тот или иной алгоритм из табл. 1. Сложно обеспечить работу в широкой полосе частот, имея в калибровочном наборе только одну воздушную линию. Как правило, приходится комбинировать методы и даже меры, например, использовать в начале частотного диапазона СВЧ алгоритм *TRM*, а затем алгоритм *TRL* с двумя или более различными линиями. Существуют методы калибровки, предполагающие использование нескольких линий (multiline) на одних и тех же частотах. Основой метрологии векторных измерений являются прецизионные воздушные линии вместе с теорией *TRL*. Применение специальных динамометрических ключей обеспечивает повторяемость и единство измерений.

Однако можно добиться хорошей точности и от калибровки типа *SOLT*. Для этого необходимо исключить погрешности описания мер. Если в составе прибора, кроме рабочего набора мер (класса *SOLT*), есть эталонный (класса *TRL*), то можно провести характеризацию рабочих мер после калибровки прибора на эталонный набор.

4. Способы калибровки ВАЦ при тестировании «невставляемых» устройств

Рассмотрим методы измерительной калибровки ВАЦ в случае, когда требуется тестировать «невставляемые» устройства. К «невставляемым» устройствам относятся все двухпортовые устройства, которые имеют однополюсные соединители любого типа, а также разнополюсные или однополюсные соединители различных типов. Существует несколько методов калибровки при измерениях «невставляемых» устройств. К ним относятся:

- 1) калибровка с использованием эквивалентных адаптеров;
- 2) калибровка с известным адаптером (Defined Thru);
- 3) калибровка с исключением адаптера (Adapter Removal);
- 4) калибровка с неизвестным адаптером (Unknown Thru);

Первый метод предполагает, что в процессе калибровки используется некоторый переход, который позволяет выполнить прямое соединение портов ВАЦ, а при измерениях он заменяется на эквивалентный (по *S*-параметрам). При этом можно использовать любой алгоритм калибровки. Второй тип калибровки – по сути, обычная *SOLT* калибровка, при выполнении которой переключатель не является идеальной, т.е. ее параметры отличаются от (10). Калибровка с исключением адаптера очень сложная и многоступенчатая, предполагающая четыре однопортовые калибровки вместо двух. Последний тип калибровки для тестирования «невставляемых» ИУ есть не что иное, как калибровка *WXYZ* из семейства *TRL*. Этот метод имеет одно ограничение – неизвестный адаптер должен быть взаимным устройством.

В завершение отметим одно важное обстоятельство, которое необходимо учитывать как при выполнении калибровки типа *SOLT*, так и при выполнении калибровки типа *TRL*. Если условия таковы, что необходимо выполнять измерение изоляции, то после ее измерения до выполнения расчетов следует заменить полученные значения КП для каждого стандарта на проход (переключатель, линия, аттенуатор, переход и пр.) на следующие:

$$S_{21}^M = S_{21}^M - \hat{e}_{30}, \quad S_{12}^M = S_{12}^M - \hat{e}_{03}. \quad (15)$$

Заключение. Современные приборы типа ВАЦ позволяют получить высокую точность измерений комплексных *S*-параметров различных устройств. Это достигается применением разнообразных методов калибровки. Чтобы эффективно использовать возможности прибора и разнообразных калибровочных наборов, необходимо ориентироваться в существующем многообразии алгоритмов. В работе приведена классификация и обобщен опыт авторского коллектива по разработке и использованию современных калибровочных процедур.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 и договором 74/10 от 15.07.2010 г. в порядке реализации Постановления №218 Правительства РФ.

Литература

1. Rytting D.K. Improved RF hardware and calibration methods for network analyzer / symposium presentation slides [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://cpd.ogi.edu/IEEE-MTT-ED/Improved RF Hardware and Calibration Methods.pdf](http://cpd.ogi.edu/IEEE-MTT-ED/Improved_RF_Hardware_and_Calibration_Methods.pdf), свободный (дата обращения: 25.09.2010).

2. Rytting D.K. Appendix to an analysis of vector measurement accuracy enhancement techniques. Hewlett-Packard Company, RF and microwave symposium and exhibition, March 1982 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://cpd.ogi.edu/IEEE-MTT-ED/ Appendix to an analysis of vector measurement accuracy enhancement techniques.pdf](http://cpd.ogi.edu/IEEE-MTT-ED/Appendix%20to%20an%20analysis%20of%20vector%20measurement%20accuracy%20enhancement%20techniques.pdf), свободный (дата обращения: 25.09.2010).

Губа Владимир Геннадьевич

Зам. главного метролога ЗАО «НПФ «Микран»

Тел.: (382-2) 90-00-38

Эл. почта: vovg@micran.ru

Ладур Александр Анатольевич

Аспирант каф. РЭТЭМ ТУСУРа, инженер ЗАО «НПФ «Микран»

Тел.: (382-2) 90-00-37

Эл. почта: ladur@micran.ru

Савин Александр Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-36-70

Эл. почта: saasavin@mail.ru

Guba V.G., Ladur A.A., Savin A.A.

Classification and analysis of calibration methods of vector network analyzers

In the article we described the methods of implementation of various calibrations of vector network analyzer for measuring the scattering parameters of passive microwave devices. There are given some brief mathematical tools and analysis, recommendations for use.

Keywords: vector network analyzer, the reflection coefficient, transmission coefficient, vector calibration, correction of measurement error of measurement, single port device, load, dual-port device.
