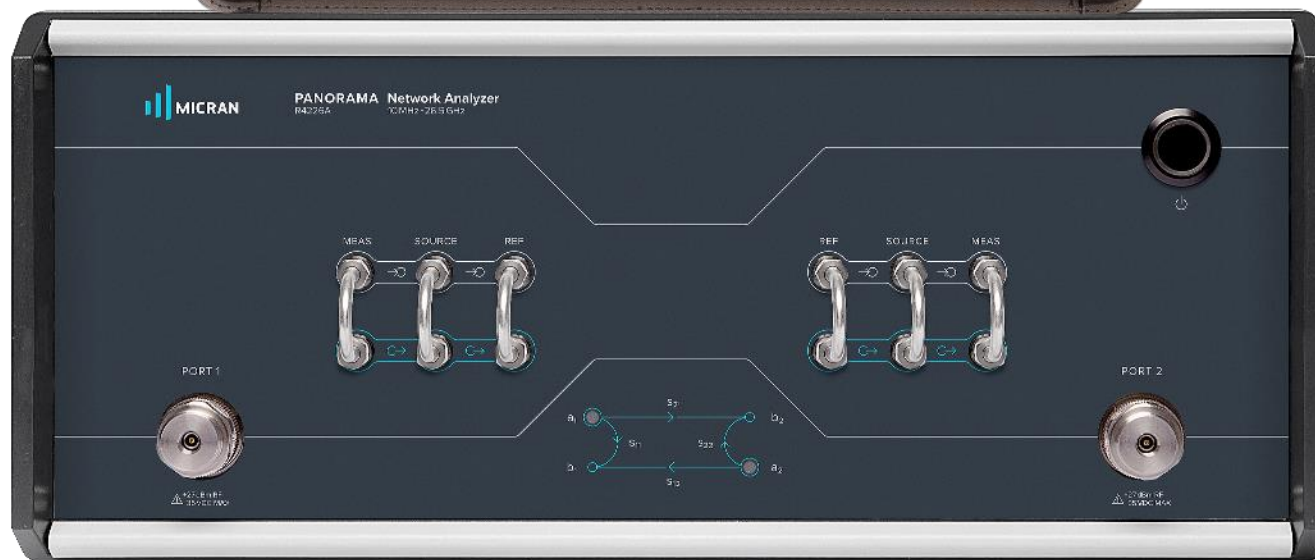
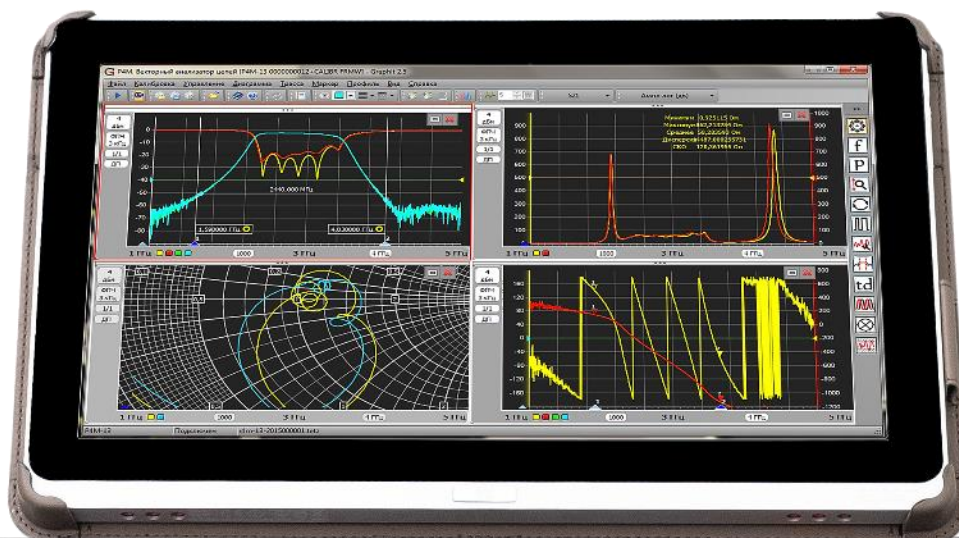


# КОММЕНТАРИИ К ПРИМЕНЕНИЮ ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ЦЕПЕЙ P4226A



## ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ S-ПАРАМЕТРОВ

## ВИДЫ КАЛИБРОВОК ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ



## 1 Общие сведения

Векторные анализаторы цепей (рис. 1) — измерительный прибор, позволяющий определять комплексные коэффициенты передачи (КП), комплексные коэффициенты отражения (КО) и другие параметры исследуемых устройств (ИУ) в диапазонах радиоволн от десятков кГц до десятков ГГц (НЧ, ВЧ, ..., СВЧ и КВЧ). В свою очередь КО и КП представляются, как правило, в виде S-параметров, т.е. используется математический аппарат матриц рассеяния волн мощности, также известные как обобщенные параметры рассеяния (в англоязычной литературе «power waves» или «traveling power waves» (!), что не то же самое, что «traveling voltage waves») [1, 2, 3].

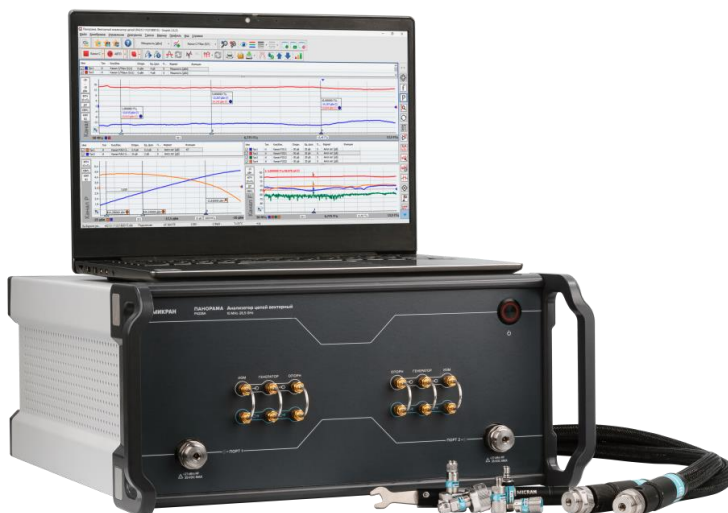


Рисунок 1 — Векторный анализатор цепей P4226A производства АО «НПФ «Микран»

Принцип работы современных ВАЦ можно условно разбить на 4 этапа: 1) генерирование и подача зондирующего радиосигнала на ИУ (при этом каждый из портов ВАЦ может выступать как в качестве генератора, так и в качестве приемника); 2) измерение отраженного и (или) прошедшего через ИУ сигнала; 3) расчет комплексных S-параметров и др. величин из результатов измерения с помощью программного обеспечения; 4) отображение результатов измерения на экране в виде различных графиков и диаграмм.

С целью высокоточного измерения S-параметров ИУ при помощи 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 пользовательской (другими словами измерительной) калибровки ВАЦ. С этой целью существуют специальные калибровочные наборы мер (механические или электронные), поставляемые либо в комплекте с ВАЦ, либо приобретаемые потребителем отдельно. Некоторые примеры калибровочных наборов приведены на рис. 2. Общим для всех калибровочных наборов является наличие в них различных нагрузок с известными характеристиками (т.е. с известным описанием), например: нагрузки холостого хода, нагрузки короткозамкнутые, нагрузки согласованные и др. В ходе пользовательской калибровки данные нагрузки подключают к ВАЦ и проводят соответствующие измерения. После проведения процедуры измерительной

калибровки, для исключения погрешности, в программном обеспечении ВАЦ применяется соответствующая математическая коррекция результатов измерений. В результате получают т. н. скорректированные S-параметры.

Существует множество видов измерительных калибровок, отличающихся видом используемых нагрузок, их количеством и др., о чем более подробно будет сказано ниже. Чтобы правильно выполнить измерения S-параметров и их интерпретацию, а также проектировать прибор и калибровочные средства для него необходимо быть в курсе современных достижений в области калибровки и коррекции в ВАЦ.



Рисунок 2 — Наборы калибровочных мер: а) механический набор НКММ-05-05P в коаксиальном тракте 2,4/1,042 мм; б) механический набор НКММ-11-11P в коаксиальном тракте 7,0/3,04 мм; в) модуль автоматической калибровки серии Р4М-ЭК4 (калибратор электронный) в коаксиальном тракте 3,5/1,52 мм; г) механический набор в прямоугольном волноводном тракте НКМВ-У-11×5,5-13P-13P

В данной статье обобщается опыт применения наиболее распространенных в настоящее время методов (видов) калибровки ВАЦ [4, 5, 6]. При этом не делается акцент на то, каким именно способом выполняется калибровка: с помощью механического набора мер, с помощью калибратора электронного, в автоматическом режиме на зондовой станции или еще как-то. И прежде приведем краткую классификацию типов калибровки ВАЦ.

## 2 Краткая классификация методов (видов) калибровки ВАЦ

Существуют следующие виды калибровок двухпортовых ВАЦ:

- нормировка для измерения КО;
- нормировка для измерения 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 статье. Основное внимание уделим наиболее точному типу калибровки, используемому в настоящее время в двухпортовых ВАЦ, — полной векторной двухпортовой калибровке в частотной области.

## 3 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 сделаны на основе теории графов [7] и изображены на рис. 3 и 4. На рисунках факторы (составляющие) систематической погрешности обозначены через  $e$ . (наличие штриха означает изменение соответствующей составляющей для порта, который работает в режиме приема зондирующего сигнала, а знак « $\bullet$ » означает некоторый цифровой индекс). 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 —  $b_{\bullet}$ .

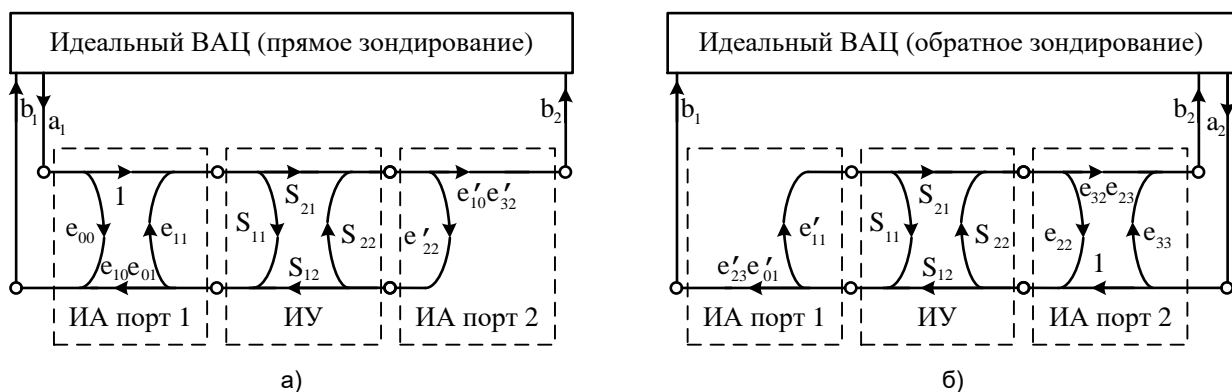


Рисунок 3 — Графы 10-параметрической модели ВАЦ:  
 а) прямое зондирование; б) обратное зондирование

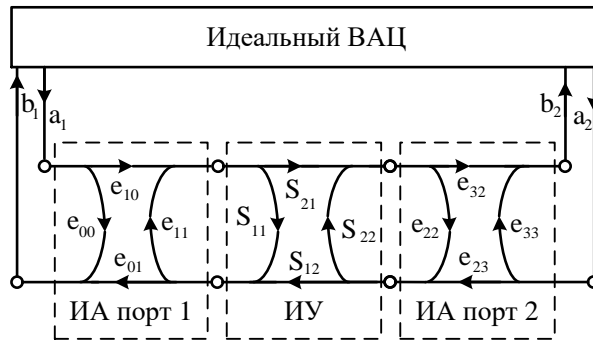


Рисунок 4 — Граф 8-параметрической модели ВАЦ

Полученные амплитуды определяют некорректированные (измеряемые) S-параметры:

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

где индексы F (от Forward — прямой) и R (от Reverse — обратный) определяют направление зондирования.

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 четырех S-параметров двухпортового ИУ. Для простоты в настоящей статье 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. 5 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 ответвления сигнала в опорный и измерительный приемники. Направленность складывается из сигналов, поступающих на вход измерительного приемника до их отражения от ИУ.

Измеренные S-параметры (как решение соответствующих потоковых графов, рис. 5) равны:

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



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

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

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

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

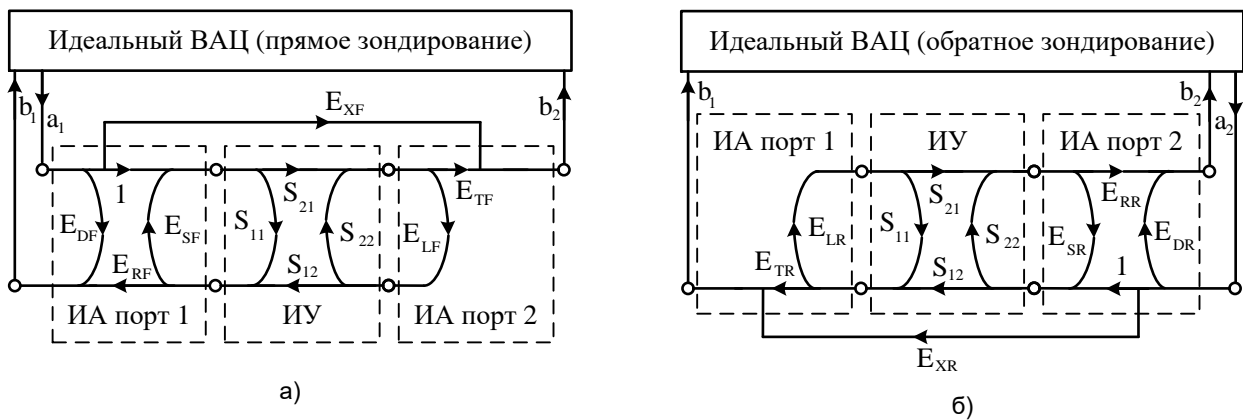


Рисунок 5 — Графы 12-параметрической модели ВАЦ:  
а) прямое зондирование; б) обратное зондирование

Т а б л и ц а 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	$E_T$	$E_{TF} = e'_{10} e'_{32}$ $E_{TR} = e'_{23} e'_{01}$

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:

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

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

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

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

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 измерительной 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 приравниваются 0, либо измеряются как параметры  $S_{21}$  и  $S_{12}$  при подключении к обоим портам ВАЦ согласованных нагрузок.

#### 4 Основные семейства двухпортовых калибровок ВАЦ

4.1 **Семейство калибровок SOLT.** Основой для 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. 3. Обозначение SOLT отражает суть метода и полностью определяет только одну основную калибровку данного семейства. Однако 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 — калибровка на проход; т.е. при соединении портов ВАЦ некоторой перемычкой. В качестве перемычки, как правило, используется фазостабильные кабельные сборки СВЧ; пример такой сборки показан на рис. 6. 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.



Рисунок 6 — Кабельные сборки фазостабильные КСФ26-13РН-13Н-600 и КСФ26-13РН-13Н-1000

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 п. 5. 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:

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

Измеренные S-параметры такого ИУ  $\mathbf{S}_{\text{THRU}}^M$  содержат систематические погрешности, обусловленные влиянием ИА. Чтобы записать выражения для искомых величин, необходимо рассмотреть потоковый граф модели ВАЦ (рис. 3) для ИУ с матрицей (10). В итоге:

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

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

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



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

где  $\det \mathbf{S}_{\text{THRU}} = S_{11,T}S_{22,T} - S_{21,T}S_{12,T}$  — определитель матрицы  $\mathbf{S}_{\text{THRU}}$ , равный минус 1 для (10).

Как видим, алгоритм калибровки допускает применение в качестве стандарта «перемычка» произвольного адаптера с известными параметрами. Обсуждению этого вопроса посвящен раздел 5, 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.

**4.2 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. 4). 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. 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.

Т а б л и ц а 2 — Краткое описание калибровок из семейства TRL (в круглых скобках для каждого стандарта указано число получаемых измерений)

Название	Стандарт № 1	Стандарт № 2	Стандарт № 3
TRL и LRL	Перемычка [Т] или линия [L] с известными S-параметрами (4)	Неизвестный стандарт на отражение [R] на оба порта (1)	Линия [L] с известными КО $S_{11}$ и $S_{22}$ (2)
TRM и LRM	Перемычка [Т] или линия [L] с известными S-параметрами (4)	Неизвестный стандарт на отражение [R] на оба порта (1)	Известная СН [М] на оба порта (2)
TRA и LRA	Перемычка [Т] или линия [L] с известными S-параметрами (4)	Неизвестный стандарт на отражение [R] на оба порта (1)	Аттенуатор [А] с известными КО (2)
TXYZ и LXYZ	Перемычка [Т] или линия [L] с известными S-параметрами (4)	3 известных отражения [X], [Y] и [Z] на порт 1 или порт 2 (3)	–
TXYX и LXYY	Перемычка [Т] или линия [L] с известными S-параметрами (4)	2 известных отражения [X] и [Y] на порт 1 (2)	1 известное отражение [X] на порт 2 (1)
TRRM и LRRM	Перемычка [Т] или линия [L] с известными S-параметрами (4)	2 неизвестных [R] и [R] равных отражения на порт 1 и порт 2 (2)	Известная СН [М] на порт 2 (1)
UXYZ	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. 2. 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 (см. рис. 7) 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.



Рисунок 7 — Ключи тарированные (сверху вниз): KT-1, KT-2, KT-3 и KT-4

## 5 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:

- калибровка с использованием эквивалентных адаптеров;
- калибровка с известным адаптером (Defined Thru);
- калибровка с исключением адаптера (Adapter Removal);
- 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 многоэтапная, предполагающая четыре однопортовые калибровки вместо двух. Последний тип калибровки для тестирования «невставляемых» ИУ есть не что иное, как калибровка UXYZ 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:

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

## 6 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 данной статье приведена классификация и обобщен опыт авторского коллектива [4] по разработке и использованию современных калибровочных процедур.

## 7 Список литературы

1. Kurokawa K. Power waves and the scattering matrix // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. March, 1965. – PP. 194–202.
2. Черкашин М.В., Бабак Л.И. СВЧ многополюсники: методическое пособие для студентов направления подготовки 09.04.01 – «Информатика и вычислительная техника». – Томск: ТУСУР, 2015. – 54 с. – URL: <https://new.kcup.tusur.ru/sites/default/files/library/> (дата обращения: 14.02.2024).
3. Roger B. Marks, Dylan F. Williams. A General Waveguide Circuit Theory // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – September-October, 1992. – V. 97, № 5. – PP. 533–562. – URL: [nist.gov](http://nist.gov) (дата обращения 21.10.2020).
4. Губа В.Г., Ладур А.А., Савин А.А. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей // Доклады ТУСУРа. – Декабрь, 2011. – № 2 (24). – Ч. 1. – С. 149–155.
5. 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%20RF%20Hardware%20and%20Calibration%20Methods.pdf), свободный (дата обращения: 25.09.2010).
6. 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).
7. Силаев М. А., Брянцев С. Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. – М.: «Советское радио», 1970. – 248 с.