



ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ КАЛИБРОВКИ ВАЦ

Введение

Калибровка – это процесс настройки измерительного устройства таким образом, чтобы оно обеспечивало результаты измерений в пределах известного и приемлемого диапазона. Все измерения подвержены ошибкам. Если эти ошибки можно оценить и охарактеризовать, то их можно в значительной степени уменьшить, что приведет к получению более точного результата. Устранить все ошибки измерения невозможно, поскольку в любом измерении всегда будет присутствовать некоторая неопределенность. Теория калибровки ВАЦ помогает понять и статистически оценить эти ошибки измерения и представить результат в краткой и точной форме.

Метрологическое обеспечение измерения

Метрологически полное измерение представлено следующим образом:

<Значение измерения> <Единица измерений> <Интервал неопределенности>
<Доверительный интервал>.

Например, измерение «обратных потерь» (Return Loss) в дБ может быть таким:

Return Loss = 12,5 дБ \pm 0,2 дБ с доверительной вероятностью 95 %.

Значение измерения находится в диапазоне от 12,3 до 12,7 дБ с доверительной вероятностью 95 %, и существует 5%-ная вероятность того, что измерение находится за пределами этого диапазона. Метрологические принципы позволяют рассчитать доверительный интервал. Существует также более широкий доверительный интервал, для которого вероятность составляет 98 % или 99 %, но никогда не 100 %.

Погрешность измерения

Погрешность измерения предполагается равной $\pm 1\sigma$ для Гауссовского (нормального) распределения. Поскольку 68 % всех возможных значений лежат в этом диапазоне, доверительный интервал – это среднее значение $\pm \sigma$ с вероятностью 68 %. Возможно, нам потребуется большая доверительная вероятность, для этого необходимо задать более широкий доверительный интервал, например, $\pm 3\sigma$ для доверительной вероятности 99,7%. Путаница исключена, если четко указан процент вероятности. Как пример, ниже в таблице 1 представлена погрешность измерения, приведенная в технических характеристиках для оборудования ООО «ПЛАНАР» с доверительным интервалом 3σ .

Таблица 1 — Погрешность измерения ВАЦ

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений модуля и фазы коэффициента передачи в диапазоне его значений в диапазоне частот	
от 100 кГц до 1 МГц	
от плюс 5 до плюс 15 дБ	$\pm 0,2$ дБ/ $\pm 2^\circ$
от минус 30 до плюс 5 дБ	$\pm 0,1$ дБ/ $\pm 1^\circ$
от минус 50 до минус 30 дБ	$\pm 0,2$ дБ/ $\pm 2^\circ$
от минус 70 до минус 50 дБ	$\pm 1,0$ дБ/ $\pm 6^\circ$
свыше 1 МГц до 8 ГГц	
от плюс 5 до плюс 15 дБ	$\pm 0,2$ дБ/ $\pm 2^\circ$
от минус 70 до плюс 5 дБ	$\pm 0,1$ дБ/ $\pm 1^\circ$
от минус 90 до минус 70 дБ	$\pm 0,2$ дБ/ $\pm 2^\circ$
от минус 110 до минус 90 дБ	$\pm 1,0$ дБ/ $\pm 6^\circ$
свыше 8 ГГц до верхней границы	
от плюс 5 до плюс 15 дБ	$\pm 0,2$ дБ/ $\pm 2^\circ$
от минус 60 до плюс 5 дБ	$\pm 0,1$ дБ/ $\pm 1^\circ$
от минус 80 до минус 60 дБ	$\pm 0,2$ дБ/ $\pm 2^\circ$
от минус 100 до минус 80 дБ	$\pm 1,0$ дБ/ $\pm 6^\circ$

На рисунке 1 показано Гауссовское (нормальное) распределение вероятностей с центром в нуле и среднеквадратичным отклонением (σ), равным 1,0. Значения вероятности определяются путем интегрирования площади под графиком между значениями σ . Общая площадь под графиком от минус бесконечности до бесконечности равна 1,0, или 100 %, а площадь от -1σ до $+1 \sigma$ равна 0,68, или 68 %. На практике среднее значение – пик кривой – может быть расположено на некотором ненулевом значении, а среднеквадратичное отклонение может иметь отличное от единицы значение.

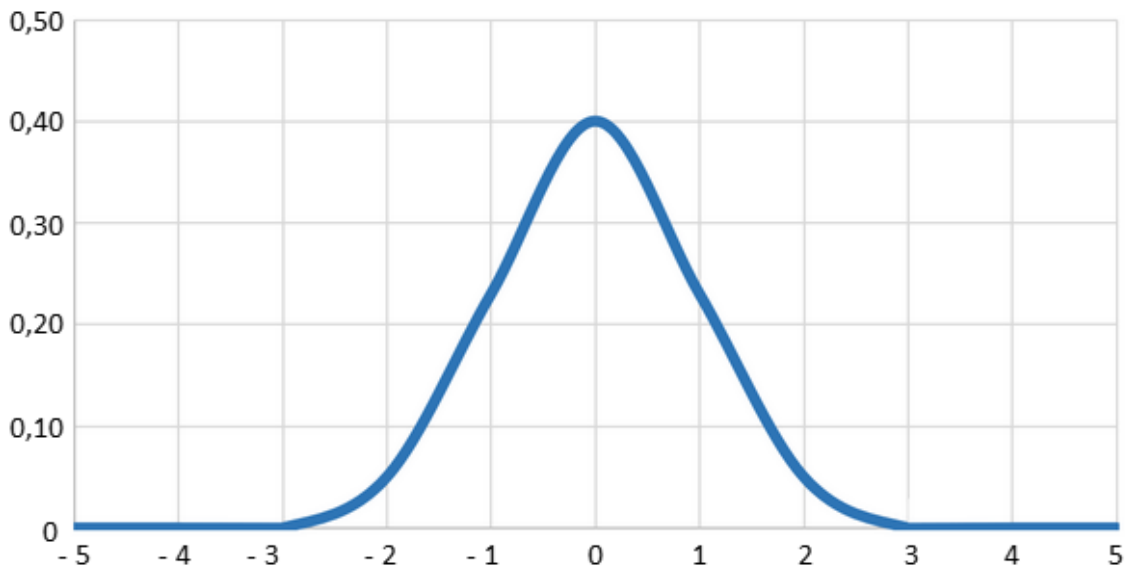


Рисунок 1 — Гауссовское распределение

Составляющие ошибок ВАЦ

Модель ошибок предполагает наличие исследуемого устройства (ИУ) с систематическими ошибками со стороны каждого из портов, которые затем измеряются ВАЦ. Как правило, отдается предпочтение 12-элементной модели ошибок, поскольку эти элементы соотносятся с реальными и понятными источниками ошибок. Эта модель показана ниже на графах на рисунках 2 и 3.

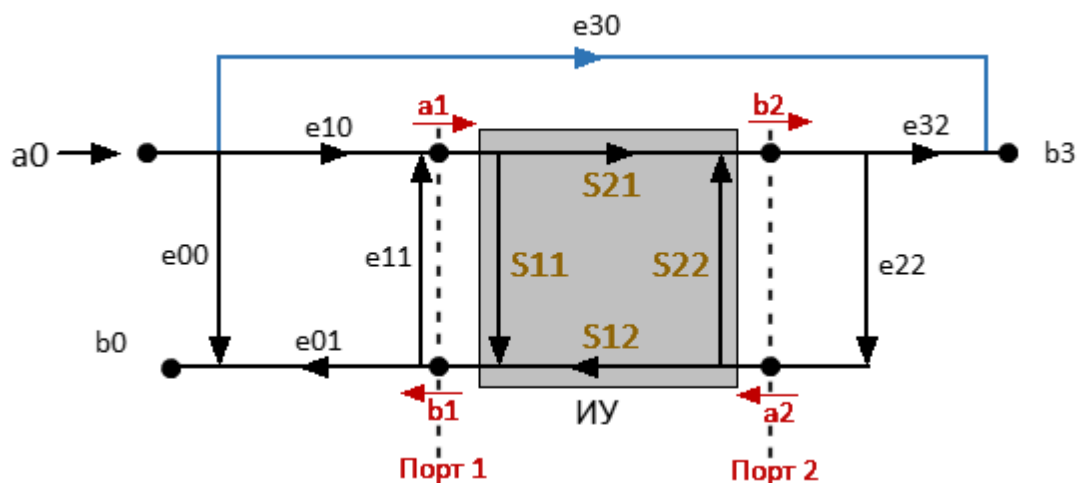


Рисунок 2 — 12-элементная модель ошибок (прямое направление измерения)

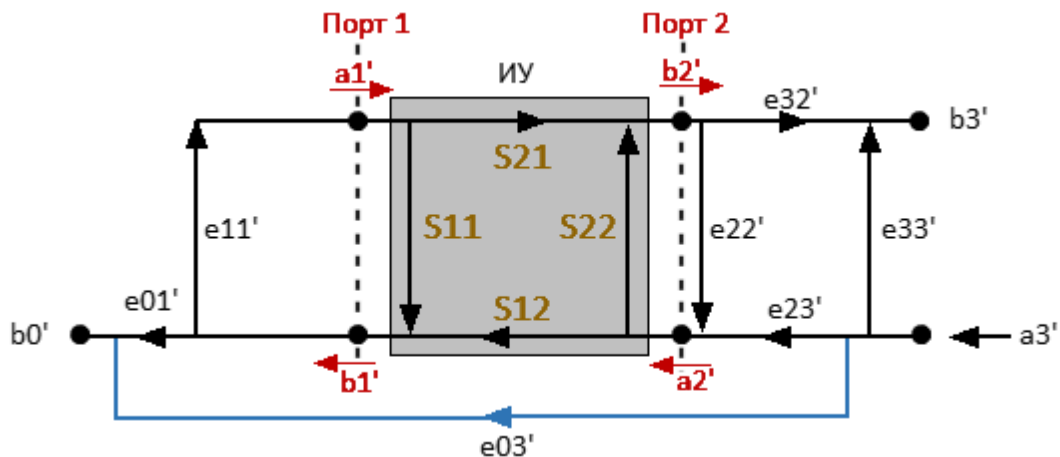


Рисунок 3 — 12-элементная модель ошибок (обратное направление измерения)

Обозначение и название элементов модели:

- ошибка направленности e_{00} , e_{33}'
- ошибка трекинга отражения $e_{10}e_{01}$, $e_{23}'e_{32}'$
- ошибка согласования источника e_{11} , e_{22}'
- ошибка трекинга передачи $e_{10}e_{32}$, $e_{23}'e_{01}'$
- ошибка согласования нагрузки e_{22} , e_{11}'
- ошибка изоляции e_{30} , e_{03}'

На графах на рисунке 1 и рисунке 2 стрелки указывают направление движения волн. Точки a_0 и b_0 , показанные на рисунке 1, не являются двумя отдельными соединениями. В действительности, они представляют собой один проводник. Сигналы e_{10} и e_{01} проходят по одному и тому же проводнику, но на диаграмме они разделены, чтобы подчеркнуть направление потоков. Рассматривая граф, можно сказать, что сигнал e_{11} добавляется к e_{10} и должен двигаться к точке a_1 . a_0 должен быть независимым источником, на который не влияют другие сигналы, поскольку к нему не направлен ни один вектор. Все остальные узлы должны зависеть от a_0 и S-параметров после него.

Ошибка направленности e_{00} обусловлена утечкой в направленном ответвителе ВАЦ. Два порта направленного ответвителя должны выдавать два чистых сигнала. Первый – образец падающего сигнала, выходящего из порта, и второй – образец отраженного сигнала, входящего в порт. На практике существует некоторая утечка падающего сигнала в порт отражения.

Ошибка трекинга отражения $e_{10}e_{01}$ учитывает потери, возникающие при выходе падающего сигнала из порта, прохождения через кабели и разъемы (e_{10}) и отражения от ИУ для повторного прохождения через них (e_{01}).

Ошибка согласования источника e_{11} учитывает комплексную ошибку в импедансе источника падающего сигнала, когда он появляется на входе ИУ.

Даже если импеданс источника стимула ВАЦ составляет идеальные 50 Ом, небольшие отклонения характеристического импеданса кабелей и соединителей будут несколько изменять его.

Ошибка трекинга передачи e_{10e32} аналогична ошибке трекинга отражения и включает первую часть (e_{10}). Однако она также включает ошибки в тракте к другому порту ВАЦ, e_{32} .

Ошибка согласования нагрузки e_{22} представляет собой отклонение импеданса нагрузки от 50 Ом на выходе ИУ и включает изменения импеданса, обусловленные выходным кабелем и соединителями, а также небольшую ошибку импеданса нагрузки через направленный ответвитель самого ВАЦ.

Ошибка изоляции e_{30} учитывает любой сигнал, который полностью минует ИУ. Либо за счет утечки в самом ВАЦ, что бывает редко, либо за счет электромагнитной связи между двумя соединениями ИУ, например, между щупами при измерениях с помощью зондовой станции.

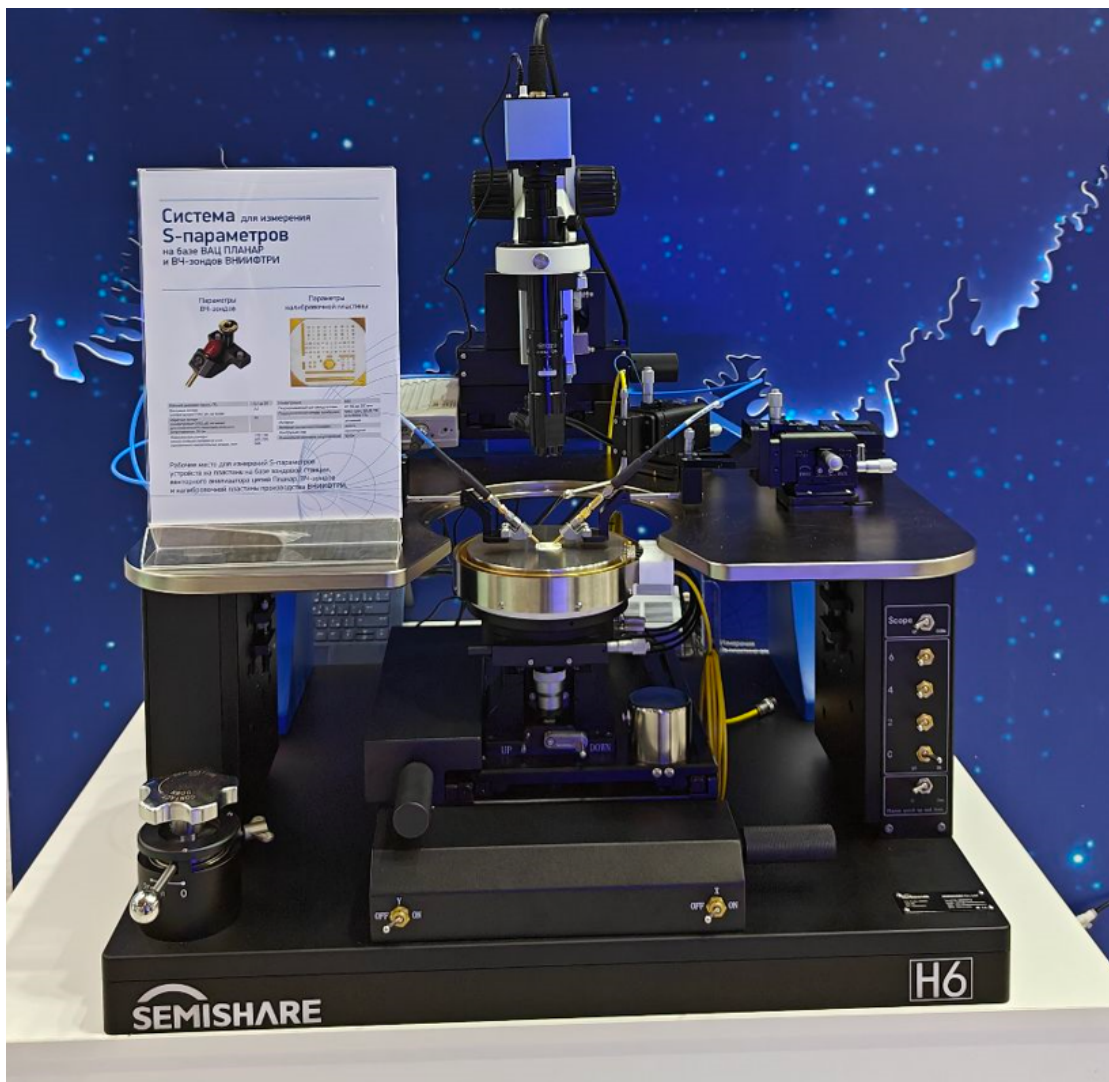


Рисунок 4 — Проведение калибровки ВАЦ Планар в плоскости игл на ручной зондовой станции

Обычно ошибка изоляции меньше, чем шум приёмника ВАЦ даже при самой узкой полосе пропускания фильтра ПЧ, и ей можно пренебречь.

Эти погрешности определяются и в основном устраняются путем измерения набора калибровочных мер с известными характеристиками и сравнения фактического измерения с погрешностью с ожидаемым измерением, основанным на эталонных данных.

Например, ошибка направленности связана с утечкой сигнала в направленном ответвителе ВАЦ. Когда сигнал выходит из ВАЦ и не отражается, на порту направленного ответвителя, выделяющего падающую волну, должен быть сигнал, а на порту, выделяющего отраженную – нет. К сожалению, всегда будет присутствовать небольшой сигнал утечки от падающего сигнала, как показано на рисунке 5.

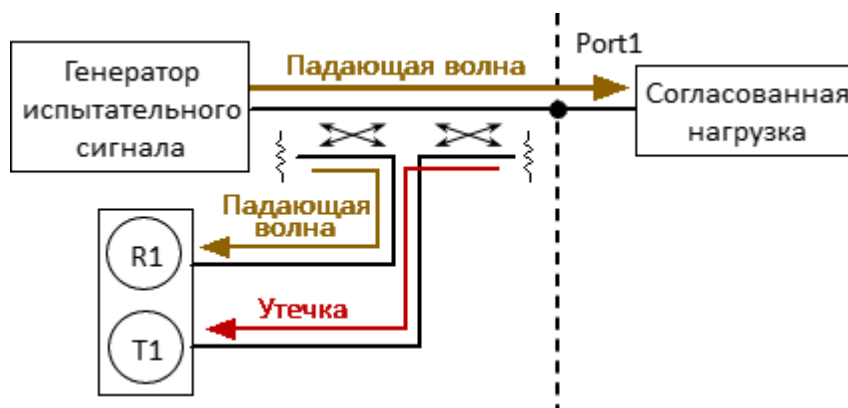


Рисунок 5 — Сигнал утечки, ошибка направленности

Чтобы измерить сигнал утечки, подключите к порту идеальную нагрузку, чтобы не было отражения. После того как сигнал утечки будет известен на всех частотах, его можно вычесть из измерений коэффициента отражения, чтобы исключить ошибку направленности.

К сожалению, идеальной нагрузки не существует. Например, калибровочная мера нагрузки 26,5 ГГц с соединитель 3,5 мм может иметь наихудшее отражение -30 дБ, которое появится на порту направленного ответвителя, выделяющего отраженную волну, вместе с сигналом утечки. Поэтому утечка может быть скорректирована только до этого уровня, а измерения отражения ниже -30 дБ бессмысленны. Калибровка с помощью скользящей нагрузки несколько улучшит ситуацию, но здесь она не рассматривается.

После измерения калибровочных мер и математического определения всех двенадцати ошибок, их можно в основном исключить из измерений. Полностью устранить погрешности невозможно; они значительно уменьшаются, но не исчезают. Эти небольшие оставшиеся ошибки называются остаточными. Например, исходная направленность направленного ответвителя ВАЦ до калибровки может составлять 18 дБ. После калибровки остаточная направленность может составлять 30 дБ при использовании механического

калибровочного набора 26,5 ГГц или 40 дБ при использовании модуля автоматической калибровки (АКМ).

Что такое SOLT калибровка?

Калибровка SOLT (Short-Open-Load-Thru) использует четыре хорошо охарактеризованные калибровочные меры. Каждая из мер измеряется по очереди, как показано на рисунке 6, и результаты сохраняются для расчета погрешностей измерений.

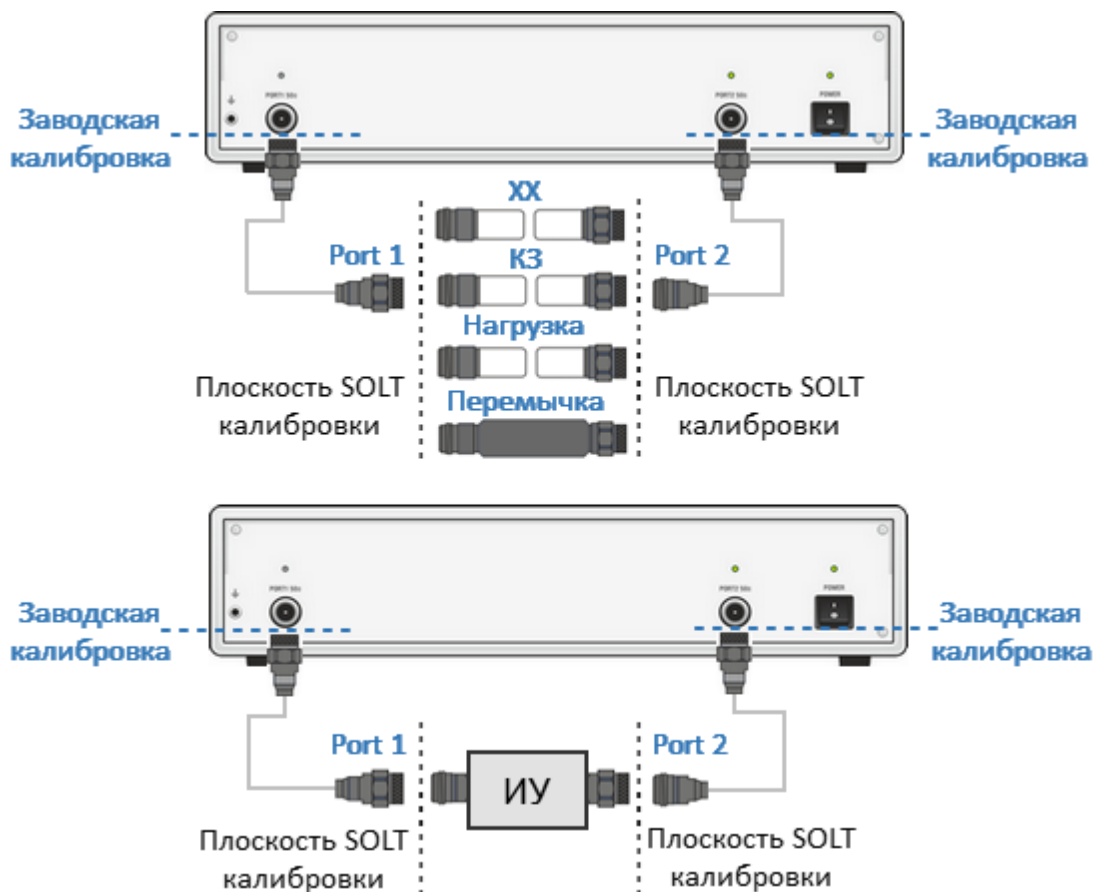


Рисунок 6 — SOLT калибровка

После измерения всех мер на концах измерительных кабелей (Open-Short-Load) и между кабелями (Thru), результаты измерений, вместе с известными параметрами каждой меры, используются для расчета всех двенадцати составляющих погрешности. Зная коэффициенты погрешности, можно определить коррекционную матрицу, которая математически скорректирует все измерения.

Характеристики калибровочных мер определяются одним из двух способов. Первый, и наиболее вероятный, когда характеристики определяются задержкой между соединителем и реальной мерой, а также полиномом третьего порядка, отражающим паразитные помехи. Задержка и полином будут одинаковыми для каждой калибровочной меры одной и той же модели одного производителя,

поэтому будет некоторая погрешность из-за производственных допусков. Второй, когда калибровочный набор может содержать файлы Touchstone для определения характеристик каждой меры. Этот вариант гораздо точнее, но требует индивидуальных измерений каждой меры и поэтому он более дорогостоящий.

Типичная запись определения калибровочного набора показана на рисунке 7 .

N	Мера			Частота		Смещение				Импеданс нагрузки	Смещение			
	Тип	Наименование		F min	F max	Задержка	Z0	Потери	Среда		H/W	C0-1e-15 Ф	C1-1e-27 Ф/Гц	C2-1e-36 Ф/Гц²
1	XX	OPEN -И-		0 Гц	999 ГГц	29.243 пс	50 Ω	2.2 ГΩ/с	Коакси		49.433	-310.13	23.168	-0.15966
2	XX	OPEN -F-		0 Гц	999 ГГц	29.243 пс	50 Ω	2.2 ГΩ/с	Коакси		49.433	-310.13	23.168	-0.15966
3	КЗ	SHORT -И-		0 Гц	999 ГГц	31.785 пс	50 Ω	2.36 ГΩ/с	Коакси		2.0765	-108.54	2.1705	-0.01
4	КЗ	SHORT -F-		0 Гц	999 ГГц	31.785 пс	50 Ω	2.36 ГΩ/с	Коакси		2.0765	-108.54	2.1705	-0.01
5	Нагр.	BROADBAND LOAD		0 Гц	999 ГГц	0 с	50 Ω	0 Ω/с	Коакси	50 Ω				
6	Пренч/Линия	THRU		0 Гц	999 ГГц	0 с	50 Ω	0 Ω/с	Коакси					
7	Неизв. пренч	UNK THRU		0 Гц	999 ГГц	ABTO			Коакси					

Рисунок 7 — Пример описания калибровочного набора в ПО S2VNA/S4VNA

Для каждой меры указана задержка, а коэффициенты полинома для паразитной емкости для меры XX и индуктивности для меры КЗ приведены в правой части на рисунке 7. С помощью этой информации ВАЦ может рассчитать характеристики каждой меры.

Что такое TRL калибровка?

Калибровка TRL или метод Thru-Reflect-Line использует линии передачи, КЗ или XX в качестве калибровочных мер. TRL не требует меры нагрузки, которая является самым слабым звеном в методе SOLT. Для калибровки методом TRL используются три калибровочных меры:

- перемычка, которая может быть нулевой длины, если разъемы на концах тестовых кабелей сопрягаются напрямую, или короткая коаксиальная линия
- мера отражения, которая может быть КЗ или XX
- линия, длина которой на четверть волны больше, чем длина линии на центральной частоте калибровки, f_c . Линия должна быть идеальной: с точным характеристическим импедансом и очень низким уровнем отражения. Потери в линии допустимы. В некоторых случаях линия может быть определена данными из файла Touchstone, если требуемые условия не могут быть выполнены

Калибровка TRL действительна в диапазоне частот, где линия на 20-160° длиннее линии перемычки, с центром в 90° на f_c . Если используемый диапазон составляет от f_1 до f_2 , то:

$$f_1 = \frac{4 \cdot 20 \cdot f_c}{360}, \quad f_2 = \frac{4 \cdot 160 \cdot f_c}{360}$$

Для более широкого диапазона частот можно использовать несколько линий с опцией multi-line для калибровки TRL. TRL всегда будет ограничена по полосе

частот по сравнению с SOLT. Низкие частоты требуют длинных линий для TRL, что может быть нецелесообразно.

Мерой отражения обычно является КЗ, поскольку его проще всего реализовать. Задержка между стандартным соединителем и фактическим КЗ приведет к изменению фазы в зависимости от частоты. Фаза меры отражения должна быть определена в пределах $\pm\lambda/4$, поэтому задержка обычно указывается в определении калибровочного набора TRL. Это требование вытекает из вычисления квадратного корня при расчете коррекции. Знак перед корнем неоднозначен без известной приблизительной фазы меры отражения, и, если этот знак выбран неверно, последующие скорректированные измерения будут демонстрировать ошибочный сдвиг фазы на 180° .

Наилучшая остаточная направленность, которая может быть достигнута с помощью калибровки SOLT, составляет около 47 дБ из-за неопределенности меры нагрузки. Однако, если для TRL используется механически точная линия с характеристическим сопротивлением, близким к эталонному, этот показатель может быть повышен до 60 дБ, что позволяет проводить точные измерения отражения ВАЦ до гораздо более низких уровней.

Коррекция TRL обуславливается 8-элементной моделью коррекции ошибок, которая не коррелирует напрямую с физическими источниками ошибок. Граф модели показан на рисунке 8.

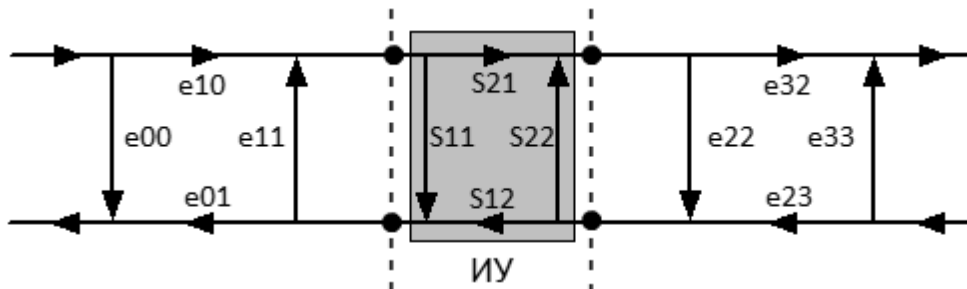


Рисунок 8 — 8-элементная калибровочная модель

Процесс нахождения восьми составляющих ошибки не рассматривается в рамках данного материала.

Заключение

Чтобы получить точные результаты, перед проведением измерений откалибруйте ВАЦ с помощью определенного калибровочного набора. Два наиболее распространенных метода, SOLT и TRL, были описаны здесь. Пользовательскую калибровку следует отличать от заводской калибровки. При заводской калибровке ВАЦ проверяется в сертифицированной испытательной лаборатории на соответствие метрологическим параметрам.

Техническая поддержка

+ 7 (351) 729-97-77 (многоканальный)
support@planarchel.ru

Представительства

г. Москва

ул. Одесская, д. 2 Башня «А», 18 этаж, офис 107
+7 (495) 645-01-94

г. Санкт-Петербург

ул. Блохина, д. 9, 3 этаж
+7 (812) 218-14-15

г. Новосибирск

ул. Добролюбова, д. 2а, офис 318
+7 (923) 229 0091



planarchel.ru
8 800 222 12 11
vna@planarchel.ru

г. Челябинск
ул. Елькина, д. 32
+7 (351) 72-99-777
