

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ МЕР КАЛИБРОВОЧНОГО НАБОРА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ОДНОПОРТОВОГО ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ

Губа В.Г., ЗАО «НПФ «Микран»

Дана классификация погрешностей измерений векторного анализатора цепей, рассмотрены варианты калибровки, представлены потенциальные проблемы при реализации мер. Получены формулы, связывающие точность характеристики мер и остаточные факторы – общее и частные для распространенных наборов мер решения.

1 Введение

Быстрый темп развития связной, радиолокационной, радионавигационной и космической индустрии привел к созданию стратегически важной аппаратуры нового поколения. Это вызвало ужесточение требований к достоверности радиотехнических измерений и перечню одновременно контролируемых параметров. Для решения многих измерительных задач используют векторный анализатор цепей (ВАЦ).

ВАЦ представляет собой комплексный прибор, который одновременно включает в себя источник зондирующего сигнала и сверхстабильный приемник. В его состав входит, кроме измерительного блока, ряд принадлежностей. При этом формируется целая измерительная система. Данная система является одной из наиболее сложных автоматизированных систем в области ВЧ и СВЧ радиотехники.

С помощью ВАЦ можно измерять матрицу S-параметров линейных устройств, параметры устройств с преобразованием частоты, интермодуляционные искажения, коэффициент шума, осуществлять анализ и фильтрацию во временной области, проводить нелинейный анализ цепей. Измерения возможны как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

ВАЦ проводит точные измерения, лишь в том случае, если устранена его систематическая погрешность, вызванная неидеальностью аппаратной реализации измерительного тракта.

В общем случае, погрешность измерений определяется качеством проведенной калибровки. То есть качеством используемых, выбранных специальным образом, мер отражения и передачи.

Калибровка – это процесс, в результате выполнения которого математически извлекаются оценки факторов систематической погрешности. Под факторами следует понимать некоторые комплексные величины, входящие в частные составляющие погрешности. Факторы имеют определенный физический смысл. Процесс исключения факторов при измерении – называют коррекцией [1].

Целью работы является получение аналитической зависимости между точностью характеристики мер калибровочного набора и остаточными факторами погрешности однопортового ВАЦ.

2 Классификация погрешности измерений ВАЦ

Погрешности измерений по закономерностям проявления делятся на три основные группы:

систематические

направленность (E_D), согласование источника сигнала (E_S), неравномерность тракта отраженного сигнала (E_R) в рамках 3-параметрической модели. После проведения калибровки и коррекции систематика будет определяться остаточными (эффективными) факторами.

нелинейность приемного устройства.

случайные

шум трактов ВЧ и ПЧ. Проявляется в виде флуктуации результата измерений в связи с кратковременной нестабильностью коэффициентов передачи опорного и измери-

тельного приемников. Зависит от уровня мощности, скорости измерений и чувствительности элементной базы к изменению амплитуды гетеродинных сигналов.

собственный шум приемников. Представляет собой сумму теплового шума и паразитных наводок, вызванных неидеальностью изоляционных свойств функциональных узлов. Ограничивает динамический диапазон измерений.

повторяемость при сочленении. Определяется конструкцией, материалами и качеством изготовления центральных и внешних проводников соединителей.

стабильность амплитудной и фазовой характеристик кабельных сборок при изменении их положения.

дрейф

изменение условий окружающей среды.

долговременная стабильность аппаратуры. Зависит от качества питающих напряжений, изменения температуры и вентиляционного потока воздуха. Дрейф определяет время сохранения калибровки без превышения погрешностей измерений пределов допустимых значений.



Рисунок 1

При выборе оптимальных параметров измерений ВАЦ, результирующая погрешность будет определяться лишь **эффективными факторами**, которые в свою очередь зависят от **точности описания** отдельных элементов набора калибровочных мер.

Информация по погрешности измерений ВАЦ приведена в [2, 3].

3 Математическая модель однопортового ВАЦ

Структурная схема однопортового ВАЦ приведена в [1]. Функциональные возможности измерений представлены на рисунке 2, где ОВ – отраженная волна, ПВ – падающая волна, КСВН – коэффициент стоящей волны по напряжению.

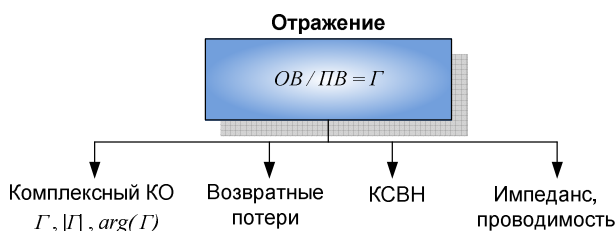


Рисунок 2

Измерение комплексного коэффициента отражения является важнейшей задачей в радиотехнике для оценки эффективности передачи электромагнитной энергии по коаксиальным и волноводным линиям [4].

Математическая модель ВАЦ состоит из идеального измерителя коэффициента отражения (КО) и виртуального линейного искажающего адаптера (ИА). Схематично модель показана на рисунке 3 [1, 3].

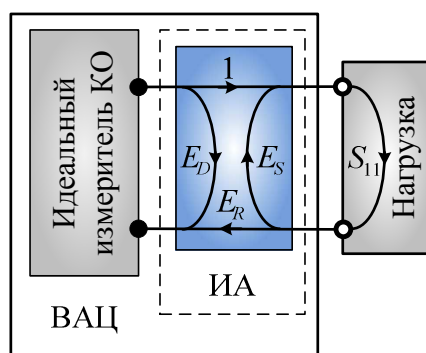


Рисунок 3

Систематическая погрешность измерения КО возникает из-за наличия искажающего адаптера. Свойства искажающего адаптера определены его S-параметрами, которые обозначены на рисунке 3 как E_D , E_R и E_S . S-параметры искажающего адаптера называют факторами погрешности.

Для устранения влияния факторов систематической погрешности на результаты измерений применяется процедура калибровки ВАЦ с последующей коррекцией измерений.

4 Калибровка и коррекция

Однопортовая калибровка ВАЦ предполагает получение оценок факторов E_D^* , E_R^* и E_S^* . Необходимо воспользоваться минимум тремя различными мерами, чтобы разрешить систему уравнений с тремя неизвестными.

Существует множество разнообразных калибровок ВАЦ [5]. Основными из них считаются:

- калибровка с использованием трех нагрузок короткозамкнутых (КЗ), имеющих определенный фазовый сдвиг относительно друг друга на частоте измерений;
- калибровка с использованием двух нагрузок КЗ и фиксированной или подвижной согласованной нагрузки (СН);
- калибровка с использованием нагрузок КЗ, холостого хода (ХХ) и СН;
- калибровка с использованием трех произвольных нагрузок с разными комплексными КО.

Характеристики каждой нагрузки должны быть известны. Для нагрузок КЗ существует достаточно строгая математическая модель, основанная на результатах геометрических измерений и выбранных материалах и покрытиях. Воздушные линии, предназначенные для сдвига участка короткого замыкания нагрузок КЗ и выступающие в качестве мер волнового сопротивления, используются свыше 1 ГГц в связи с сильным влиянием скин-эффекта на их модель. Фиксированные нагрузки обычно применяют в нижнем диапазоне частот (единицы гигагерц), где они имеют сосредоточенные параметры. Математическая модель нагрузок ХХ также действует в нижнем диапазоне частот.

В последнее время широкое распространение получило **табличное описание (характеризация)** мер при помощи более точных измерительных систем. Причем неопределенность описания соизмерима с неопределенностью измерений эталонного средства плюс неопределенность передачи единицы физической величины. Стало возможным использование **нагрузок различных типов и номиналов**, снижены требования к присоединительным размерам. Но все же, при применении нагрузок, отличных от граничных (КО равен минус 1, 1 и 0), **неточность описания имеет эффект усиления погрешности**.

В любом случае, предельные точностные характеристики достигаются при использовании воздушных линий и нагрузок КЗ, модель которых основана на сверхточных геометрических измерениях. На сегодняшний день в мире идет бурный прогресс в области измерений геометрических величин. Появились лазерные микрометры, интерферометры белого цвета,

измерительные системы и комплексы, позволяющие проводить измерения формы элементов конструкции, формируя отчет в 3D формате, прецизионные калибры и нутромеры.

Ниже приведен перечень потенциальных проблем при реализации мер [6]:

- неточность математической модели;
- предел механической точности изготовления и контроля параметров конструкции нагрузок;
- изготовление идеальной СН;
- стабильность подвижных нагрузок, непостоянство коэффициента отражения при перемещении поглотителя;
- скин-эффект воздушных линий (резкое увеличение вносимых потерь на низких частотах, вызывающих отклонение частотной характеристики от ее математической модели);
- расчет математической модели ФЧХ нагрузки ХХ в широком диапазоне частот из-за наличия паразитной краевой емкости, нежесткая конструкция из-за поддерживающего диэлектрического стержня, влияющая на износ;
- наличие лепестков соединителей розетка;
- зазоры в местах соединения центральных проводников, вызывающие перепады диаметров;
- временная стабильность мер.

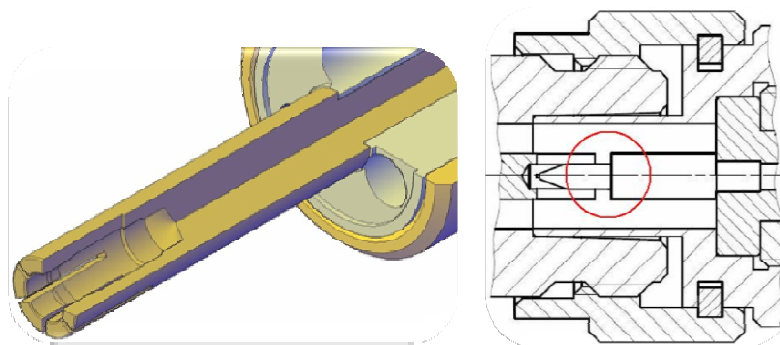


Рисунок 4 – Разрезная цанга соединителя розетка и образование зазора при сочленении

Некоторые из приведенных проблем практически решены. Разработаны и используются соединители розетки с безразрезными цангами, в которых не изменяется диаметр центрального проводника при контакте с ответной частью. Нагрузку ХХ можно описать таблично и не использовать математическую модель. Для прецизионных соединителей были увеличены требования к присоединительным размерам, и вклад зазоров в суммарную погрешность измерений стал незначительным.

После выполнения калибровки и коррекции, модель ВАЦ также можно представить также в виде идеального измерителя и искажающего адаптера [1]. Этот адаптер вносит значительно меньшие (остаточные) искажения, определяемые величинами E_D^{OCT} , E_S^{OCT} и E_R^{OCT} (см. рисунок 5).

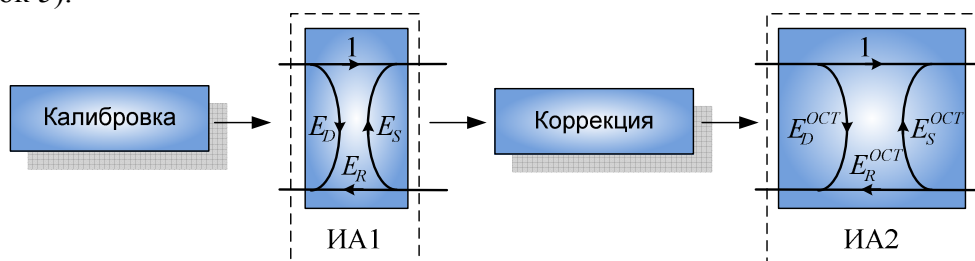


Рисунок 5

Выражение, определяющее измеренный КО, имеет вид:

$$S_{11}^* = E_D^{OCT} + E_R^{OCT} \cdot S_{11} / (1 - E_S^{OCT} \cdot S_{11}) = S_{11} + \Delta S_{11}, \quad (1)$$

5 Точность характеристики мер

Следует понимать, что любая мера, используемая при калибровке, имеет некоторую погрешность описания, т.е. **никогда не определена точно**. В зависимости от номинального значения меры могут иметь разную точность описания и по-разному влиять на результирующую погрешность.

Выражение (1), можно записать в виде:

$$S_i + \Delta S_i = E_D^{OCT} + E_R^{OCT} \cdot S_i / (1 - E_S^{OCT} \cdot S_i)$$

или

$$S_i + \Delta S_i = E_D^{OCT} + (E_R^{OCT} - E_S^{OCT} \cdot E_D^{OCT}) \cdot S_i + E_S^{OCT} \cdot S_i \cdot (S_i + \Delta S_i), \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3$ – порядковый номер меры;

S_i – истинное значение КО i -ой меры;

ΔS_i – погрешность описания КО i -ой меры.

При последовательном измерении трех мер с известными характеристиками, решение системы уравнений в матричной форме выглядит следующим образом [3, 7]:

$$\begin{bmatrix} E_D^{OCT} \\ E_R^{OCT} - E_S^{OCT} E_D^{OCT} \\ E_S^{OCT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_1 & S_1(S_1 + \Delta S_1) \\ 1 & S_2 & S_2(S_2 + \Delta S_2) \\ 1 & S_3 & S_3(S_3 + \Delta S_3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1 + \Delta S_1 \\ S_2 + \Delta S_2 \\ S_3 + \Delta S_3 \end{bmatrix}$$

В общем случае, каждый фактор является функцией от всех значений и погрешностей КО.

Решение системы в упрощенном виде:

$$E_D^{OCT} \approx V_1 \cdot S_2 \cdot S_3 + V_2 \cdot S_1 \cdot S_3 + V_3 \cdot S_1 \cdot S_2,$$

$$E_S^{OCT} \approx V_1 + V_2 + V_3 - S_1 \cdot V_1^2 - S_2 \cdot V_2^2 - S_3 \cdot V_3^2 + V_1 \cdot \Delta S_3 \cdot (S_1 + S_3) / (S_1 - S_3) + V_2 \cdot \Delta S_3 \cdot (S_3 + S_2) / (S_3 - S_2) + V_3 \cdot \Delta S_1 \cdot \Delta S_2 \cdot (S_1 + S_2) / (\Delta S_3 \cdot (S_1 - S_2)^2),$$

$$E_R^{OCT} \approx 1 - V_1 \cdot (S_2 + S_3) - V_2 \cdot (S_1 + S_3) - V_3 \cdot (S_1 + S_2),$$

$$V_1 = \Delta S_1 / [(S_2 - S_1) \cdot (S_3 - S_1)],$$

$$V_2 = \Delta S_2 / [(S_1 - S_2) \cdot (S_3 - S_2)],$$

$$V_3 = \Delta S_3 / [(S_1 - S_3) \cdot (S_2 - S_3)].$$

Вариант 1. Расчет проводится для самой распространенной конфигурации набора мер: XX (S_1), КЗ (S_2) и СН (S_3).

Параметры моделирования:

$$S_1 = 1, S_2 = -1, S_3 = 0.$$

$S_1^{МОД}$ – представляет собой векторную величину, модуль которой распределен равномерно от 0,995 до 1,005 в линейном масштабе, и фаза распределена равномерно от минус 1 до 1 градуса.

$$\Delta S_1 = S_1 - S_1^{МОД}.$$

$S_2^{МОД}$ – представляет собой векторную величину, модуль которой распределен равномерно от 0,995 до 1,005 в линейном масштабе, и фаза распределена равномерно в пределах (180 ± 1) градус.

$$\Delta S_2 = S_2 - S_2^{МОД}.$$

ΔS_3 – векторная величина, модуль которой имеет нормальную плотность вероятности с математическим ожиданием, равным погрешности измерений эталонного ВАЦ ($\Delta S_{ЭГ} =$

0,0063, $RL = 44$ дБ) и удвоенное CKO , равное повторяемости при сочленении ($2 \cdot rms = 8,413 \cdot 10^{-4}$, $RL = 55$ дБ); фаза считается равной 0 градусам; где RL – возвратные потери.

Формулы для расчета E_D^{OCT} , E_S^{OCT} и E_R^{OCT} с учетом выбранных мер и точного решения уравнения:

$$E_D^{OCT} = \Delta S_3,$$

$$E_S^{OCT} = (t/2 - \Delta S_3) / (1 - u/2),$$

$$E_R^{OCT} = 1 - (u/2 + \Delta S_1 \cdot \Delta S_2 - \Delta S_1 \cdot \Delta S_3 - \Delta S_2 \cdot \Delta S_3 + \Delta S_3^2) / (1 - u/2) \approx 1 - u/2 / (1 - u/2),$$

$$t = \Delta S_2 + \Delta S_1, u = \Delta S_2 - \Delta S_1.$$

Результаты моделирования:

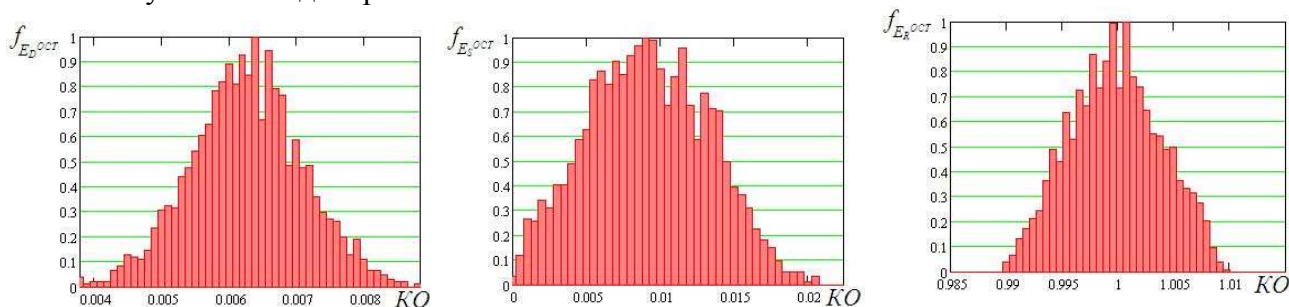


Рисунок 6 – Гистограммы плотностей вероятности факторов погрешности

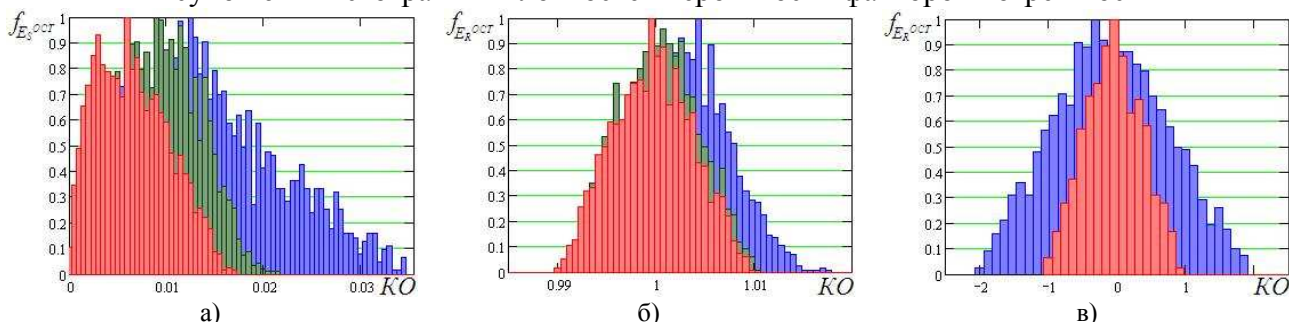


Рисунок 7 – Гистограммы плотностей вероятности факторов погрешности при различном описании мер: а) влияние точности описания фазы нагрузок КЗ и ХХ на модуль E_S^{OCT} (синяя гистограмма – погрешность ± 2 градуса; зеленая – ± 1 градус; красная – $\pm 0,25$ градусов); б) влияние на модуль E_R^{OCT} (синяя гистограмма – погрешность ± 5 градусов; зеленая – ± 2 градуса; красная – $\pm 0,25$ градусов); в) влияние на фазу E_R^{OCT} (синяя гистограмма – погрешность ± 2 градуса; красная – ± 1 градус)

Выводы:

1 Остаточный фактор E_D^{OCT} **зависит** только от погрешности описания согласованной нагрузки. А именно от точности эталонного ВАЦ и погрешности передачи единицы физической величины при электрическом описании фиксированной СН или точности определения геометрических размеров элементов конструкции подвижной СН. **Не зависит** от погрешности описания высокоуровневых нагрузок.

2 Остаточный фактор E_S^{OCT} в большей степени **зависит** от точности описания высокоуровневых нагрузок и особенно чувствителен к погрешности их фазы. Нижний предел фактора ограничен точностью описания СН.

3 Модуль и фаза остаточного фактора E_R^{OCT} имеют **треугольное распределение** с основанием практически равным погрешности описания. Модуль фактора имеет **слабую зависимость** с погрешностью описания фаз высокоуровневых нагрузок.

4 Предельные факторы при заданных параметрах получаются: $E_D^{OCT} \approx 42$ дБ, $E_S^{OCT} \approx 35$ дБ, $E_R^{OCT} \approx 0,07$ дБ. Для улучшения параметров, в первую очередь следует умень-

шать погрешность описания фаз высокоуровневых нагрузок и увеличивать точность описания СН.

Вариант 2. Расчет проводится для конфигурации набора мер: ХХ (S_1), КЗ (S_2) и рассогласованная нагрузка (S_3).

Параметры моделирования:

$$S_1 = 1, S_2 = -1, S_3 = 0,1 (0,333).$$

$\Delta S_1, \Delta S_2$ – моделируются аналогичным образом, приведенным в варианте 1.

$S_3^{МОД}$ – представляет собой векторную величину, модуль которой распределен равномерно от $(|S_3| - \Delta S_{ЭТ} - 2 \cdot rms)$ до $(|S_3| + \Delta S_{ЭТ} + 2 \cdot rms)$ в линейном масштабе, и фаза распределена равномерно от минус 5 до 5 градуса для нагрузки $S_3 = 0,1$ и от минус 2,5 до 2,5 градусов для нагрузки $S_3 = 0,333$.

$$\Delta S_3 = S_3 - S_3^{МОД}.$$

Формулы для расчета E_D^{OCT} , E_S^{OCT} и E_R^{OCT} с учетом выбранных мер и точного решения уравнения:

$$E_D^{OCT} = [S_3^2 \cdot (\Delta S_2 + \Delta S_1) + S_3 \cdot (\Delta S_1 - \Delta S_2 + \Delta S_2 \cdot \Delta S_3 + \Delta S_1 \cdot \Delta S_3 - 2 \cdot \Delta S_1 \cdot \Delta S_2) + \Delta S_3 \cdot (\Delta S_2 - \Delta S_1 - 2)] / [2 \cdot S_3^2 + S_3 \cdot (2 \cdot \Delta S_3 - \Delta S_1 - \Delta S_2) + (\Delta S_2 - \Delta S_1 - 2)] \approx [S_3^2 \cdot t - S_3 \cdot u - 2 \cdot \Delta S_3] / [2 \cdot S_3^2 + S_3 \cdot (2 \cdot \Delta S_3 - t) + u - 2],$$

$$E_S^{OCT} = (S_3 \cdot u + 2 \cdot \Delta S_3 - t) / (2 \cdot S_3^2 + S_3 \cdot (2 \cdot \Delta S_3 - t) + u - 2),$$

$$E_R^{OCT} = 1 + [S_3^2 \cdot (\Delta S_1 - \Delta S_2) + S_3 \cdot (\Delta S_1 \cdot \Delta S_3 - \Delta S_2 \cdot \Delta S_3) + \Delta S_2 - \Delta S_1 + 2 \cdot \Delta S_1 \cdot \Delta S_2 - \Delta S_1 \cdot \Delta S_3 - \Delta S_2 \cdot \Delta S_3] / [2 \cdot S_3^2 + S_3 \cdot (2 \cdot \Delta S_3 - \Delta S_1 - \Delta S_2) + (\Delta S_2 - \Delta S_1 - 2)] + E_D^{OCT} \cdot E_S^{OCT} \approx 1 + [u - S_3^2 \cdot u] / (2 \cdot S_3^2 + S_3 \cdot (2 \cdot \Delta S_3 - t) + u - 2).$$

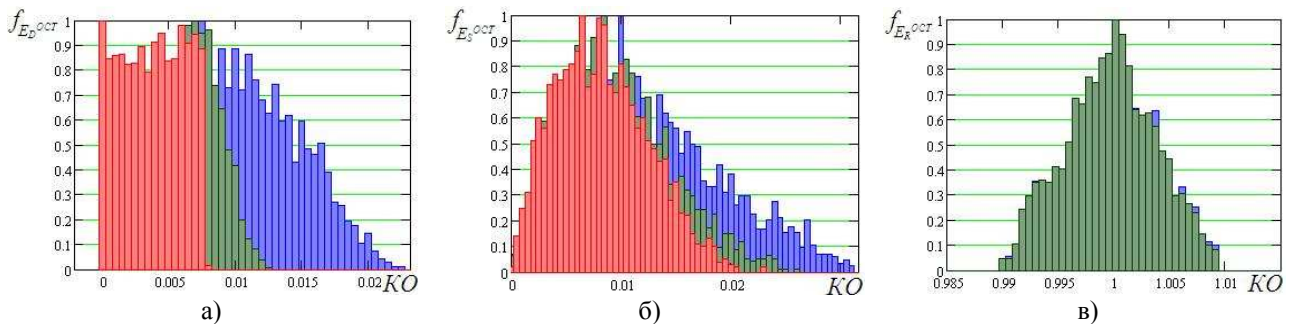


Рисунок 8 – Гистограммы плотностей вероятности факторов погрешности при различных мерах: а) влияние рассогласованной нагрузки на модуль E_D^{OCT} (синяя гистограмма – $S_3=0,333$; зеленая – $S_3=0,1$; красная – $S_3=0$); б) влияние на модуль E_S^{OCT} ; в) влияние на модуль E_R^{OCT}

Выводы:

1 Остаточный фактор E_D^{OCT} теперь **зависит** не только от **погрешности описания**, но и от **номинального значения низкоуровневой нагрузки**. $E_D^{OCT} = \Delta S_3 + kd(S_3)$, где $kd(S_3)$ – комплексная величина, характеризующая степень усиления погрешности и определяющая связь между погрешностями всех нагрузок. Чем больше модуль КО низкоуровневой нагрузки, тем сильнее влияет погрешность ее описания на фактор.

2 Остаточный фактор E_S^{OCT} также **зависит** не только от **погрешности описания**, но и от **номинального значения низкоуровневой нагрузки**. Нижний предел влияния модуля КО низкоуровневой нагрузки ограничен точностью описания ХХ и КЗ.

3 Низкоуровневая нагрузка практически **не влияет** на модуль и фазу остаточного фактора E_R^{OCT} .

4 **В качестве низкоуровневой нагрузки допускается использовать рассогласованную нагрузку (РН)**, но чем выше ее КСВН, тем жестче должны быть требования к погрешности ее описания.

Вариант 3. Расчет проводится для конфигурации набора мер с произвольными нагрузками: РН (S_1), РН (S_2) и РН (S_3).

Параметры моделирования:

$$S_1 = 0,333 \cdot e^{j\Phi_1}, S_2 = 0,333 \cdot e^{j\Phi_2}, S_3 = 0,1 \cdot e^{j\Phi_3}.$$

$S_i^{МОД}$ – представляет собой векторную величину, модуль которой распределен равномерно от $(|S_i| - \Delta S_{ЭГ} - 2 \cdot rms)$ до $(|S_i| + \Delta S_{ЭГ} + 2 \cdot rms)$ в линейном масштабе, и фаза распределена равномерно от минус 5 до 5 градуса относительно Φ для нагрузки $S_3 = 0,1$ и от минус 2,5 до 2,5 градусов относительно Φ для нагрузок $S_{1,2} = 0,333$.

$$\Delta S_i = S_i - S_i^{МОД}.$$

Для решения используются упрощенные формулы.

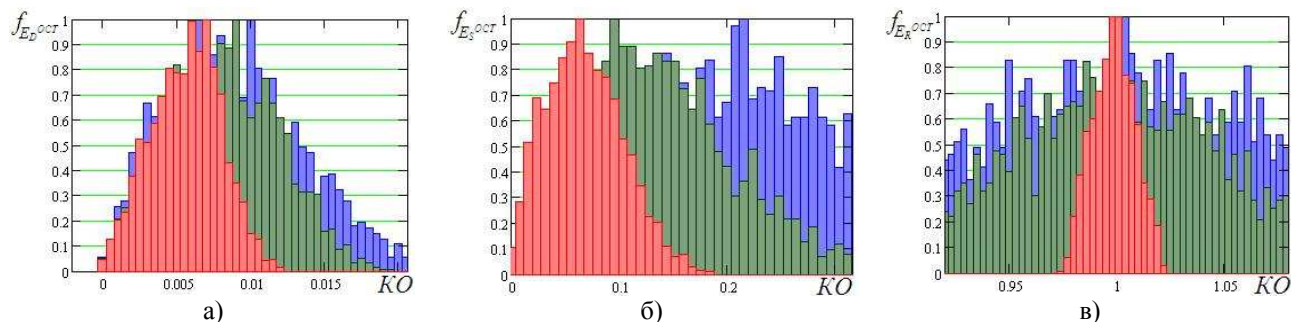


Рисунок 9 – Гистограммы плотностей вероятности факторов погрешности при различных мерах: а) влияние фазовых соотношений нагрузок на модуль E_D^{OCT} (синяя гистограмма – $\Phi_1=0, \Phi_2=\pi/6, \Phi_3=\pi/2$; зеленая – $\Phi_1=0, \Phi_2=\pi/3, \Phi_3=\pi/2$; красная – $\Phi_1=0, \Phi_2=\pi, \Phi_3=\pi/2$; б) влияние на модуль E_S^{OCT} ; в) влияние на модуль E_R^{OCT}

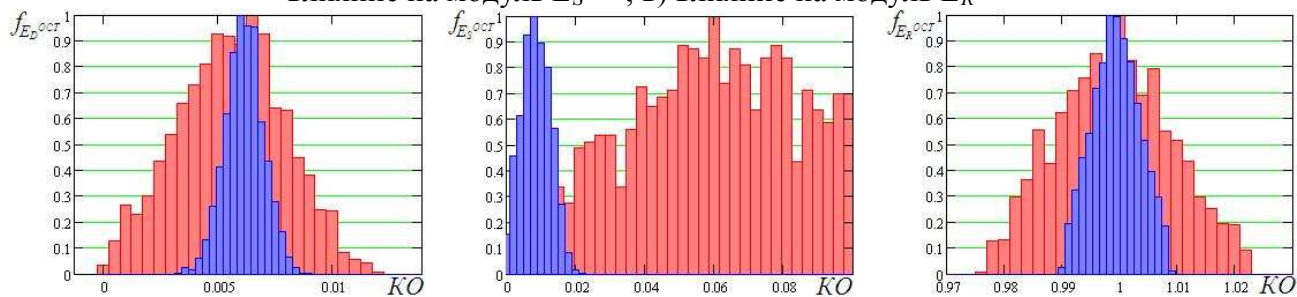


Рисунок 10 – Демонстрация ухудшения остаточных факторов по сравнению с вариантом XX, КЗ и СН

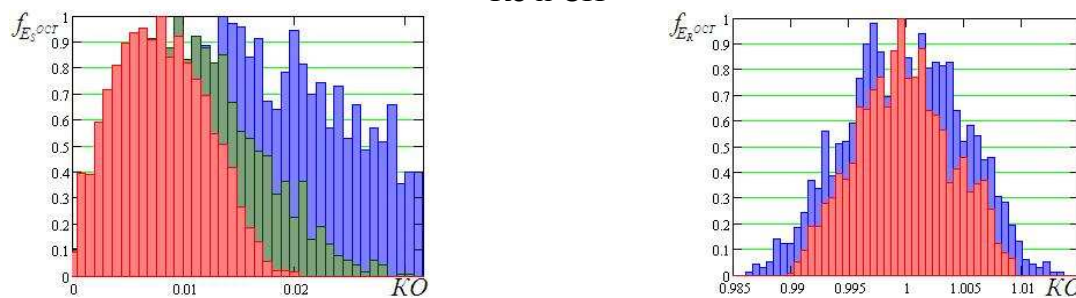


Рисунок 11 – Влияние фазовых соотношений между высокоуровневыми нагрузками для варианта КЗ, КЗ и СН с равномерными распределениями погрешности описания (синяя гистограмма – разность фаз равна $\pi/4$, зеленая – $\pi/2$, красная – π)

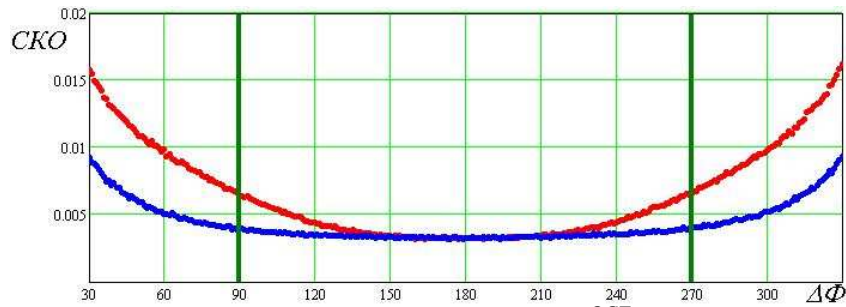


Рисунок 12 – Изменение СКО рядов модулей факторов E_R^{OCT} (красная кривая) и E_S^{OCT} (синяя кривая) при изменении разности фаз между нагрузками КЗ

Выводы:

1 Все остаточные факторы *зависят* от фазовых соотношений используемых нагрузок. Минимальные факторы получаются, если фазы всех нагрузок максимально отличаются друг от друга. Особенно важны фазовые соотношения нагрузок, модуль которых приблизительно одинаковый.

2 Все остаточные факторы получаются хуже, чем при использовании нагрузок с крайними значениями КО: 1, минус 1 и 0.

3 Для проведения калибровки **обязательно использовать нагрузки с модулем КО близким к единице в линейном масштабе. Разность фаз между высокоуровневыми нагрузками должна быть не менее 90 градусов.**

6 Максимальная систематическая погрешность измерений

После определения остаточных факторов E_D^{OCT} , E_S^{OCT} и E_R^{OCT} , можно рассчитать максимальные погрешности измерений модуля и фазы некоторой исследуемой нагрузки. Вывод формул приведен в [1].

$$\Delta|S_{11}|^{MAX} = |\Delta S_{11}^{MAX}| \approx |E_D^{OCT}| + |E_R^{OCT} - 1| \cdot |S_{11}| + |E_R^{OCT}| \cdot |E_S^{OCT}| \cdot |S_{11}|^2. \quad (3)$$

$$\Delta \arg S_{11}^{MAX} = \arcsin[|\Delta S_{11}^{MAX}| / |S_{11}|] = \arctg[|\Delta S_{11}^{MAX}| / |S_{11}^*|] \quad (4)$$

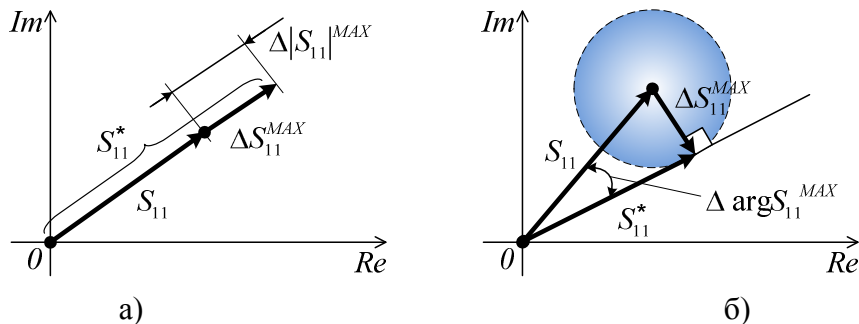


Рисунок 13 – Возможные варианты векторного сложения комплексных чисел S_{11} и ΔS_{11}^{MAX}
 а) формирование максимальной погрешности измерения модуля КО; б) формирование максимальной погрешности измерения фазы КО

7 Заключение

Дана классификация погрешностей измерений ВАЦ, рассмотрены варианты калибровки, представлены потенциальные проблемы при реализации мер. Получены **формулы**, связывающие точность характеристики мер и остаточные факторы – общее и частные для распространенных наборов мер решения. Приведены рекомендации по использованию нагрузок в составе наборов калибровочных мер. Представлены расчетные соотношения, позволяющие провести вычисления максимальной систематической погрешности измерения модуля и фазы КО.

Литература

- 1 Савин А.А., Губа В.Г. Определение уровня остаточной систематической погрешности измерений векторного анализатора цепей после выполнения однопортовой калибровки. Журнал «Вестник метролога». – 2009. – № 4.
- 2 Ballo D. Network analyzer basics [Электронный ресурс]. – Hewlett-Packard Company, ID документа 5965-7917E, 1998. – Режим доступа: <http://www.agilent.com>.
- 3 Rytting D. Improved RF hardware and calibration methods for network analyzers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://na.tm.agilent.com/faq/Document_list.html.
- 4 Пивак А.В. Измерения волнового сопротивления коаксиальных трактов [Электронный ресурс] // Журнал «Мир измерений». – 2007. – № 3. – Режим доступа: http://prist.ru/info.php/articles/impedance_co-ax_duct_meas.htm.
- 5 Rytting D. Network analyzer error models and calibration methods [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://na.tm.agilent.com/faq/Document_list.html.
- 6 Rytting D. Advances in microwave error correction techniques [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://na.tm.agilent.com/faq/Document_list.html.
- 7 Kwan G. Sensitivity of one-port characterized devices in VNA calibrations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.agilent.com/metrology/ncsli2002_kwan.shtml.