

Keysight Technologies

Как минимизировать погрешности измерений и оценить погрешность, вызванную рассогласованием

Рекомендации
по применению



1.0 Введение

Все измерения подвержены погрешностям, обусловленным измерительным прибором, измеряемым изделием, персоналом, проводящим измерение, либо условиями окружающей среды, в которой проводятся измерения. Возможно, самую большую долю в общей погрешности измерения РЧ/СВЧ-мощности составляет погрешность, обусловленная рассогласованием. Эта погрешность зачастую является результатом недостаточных знаний о фазах коэффициентов отражения источника сигнала и импедансов нагрузки, а также их взаимного соединения. Поскольку элемент рассогласования почти всегда имеет преобладающее влияние, он требует особого внимания специалистов, которые могут использовать простые процедуры для сведения к минимуму его влияния.

Измерительные приборы (например, анализатор спектра/сигналов или измеритель мощности) также серьезно влияют на погрешность измерения. Величина этой погрешности и определяющие её факторы зависят от характеристик применяемого прибора. Например, в анализаторе сигналов источниками погрешности могут быть частотная характеристика, погрешность входного аттенюатора, переключение полосы пропускания и калибратор.

Независимо от источника погрешности измерения, важно то, что она влияет на точность и достоверность измерения; чем больше погрешность, тем меньше уверенность в достоверности данного измерения. Поэтому очень важно быстро и точно рассчитать погрешность измерения и там, где это возможно, свести её к минимуму.

В данных рекомендациях по применению представлено несколько методов, которые могут быть использованы для минимизации погрешности, обусловленной рассогласованием. Здесь также представлены методы комбинирования погрешностей измерения и, в особенности, модели, которые могут быть использованы для определения погрешности рассогласования, когда фаза неизвестна. Одна из таких моделей – модель Релея (Rayleigh) – обеспечивает значительно более точную, но все же консервативную оценку стандартной (среднеквадратической) погрешности, обусловленной рассогласованием, по сравнению с обычно используемыми методами. Фактически, процедура на основе модели Релея обычно даёт в шесть раз более низкую оценку погрешности, чем популярный метод на основе U-образного распределения.

2.0 Проблема измерения: оценка погрешности

Оценка погрешности измерения и усилия по её минимизации могут оказаться сложной задачей, очень важной для решения вопроса об использовании меньшего поля допусков. По определению, поле допусков представляет разность между пределом, установленным для приёмочного испытания, и предельным значением характеристики, установленным в спецификации. Поле допусков принимает во внимание погрешности измерения, а также допустимые изменения характеристик, обусловленные внешней средой, дрейфом и любыми другими факторами, которые могут повлиять на эти характеристики. Применение поля допусков гарантирует с высокой степенью достоверности, что если характеристики изделия измерены и находятся в пределах, установленных для приёмочного испытания, это изделие будет соответствовать требованиям, заявленным в спецификации.

Чтобы применить меньшее поле допуска, и, в свою очередь, повысить достоверность измерений и увеличить выход годных изделий, погрешность измерения должна быть точно оценена. Хотя для решения этой задачи могут быть использованы различные методы (например, большее усреднение или более узкая полоса пропускания на ПЧ), они часто приводят к нежелательным последствиям, например, к увеличению времени измерения. Современным специалистам нужен более простой и быстрый способ оценки погрешности измерения и, в особенности, погрешности, обусловленной рассогласованием, – способ достаточно консервативный, который позволит использовать меньшее поле допусков.

3.0 Погрешность, обусловленная рассогласованием

Имеется несколько простых и усовершенствованных методов, которые в настоящее время можно использовать для уменьшения погрешности рассогласования. Чтобы лучше понять эти методы, сначала следует принять во внимание, что погрешность рассогласования, или погрешность потерь рассогласования, определяется величиной мощности (выраженной в дБ), не достигающей выхода линии передачи из-за отражений сигнала и рассогласования импедансов. Если линия передачи правильно нагружена, в ней не возникают отражения и, следовательно, потери рассогласования.

Здесь Γ_l коэффициент отражения, часто выраженный в терминах модуля ρ_l и фазы, ϕ_l . Γ_g – коэффициент отражения в обратном направлении к генератору, подключённому к измерителю мощности (преобразователю) и выраженный в терминах его модуля, ρ_g , и фазы, ϕ_g . Обе величины – модуль и фаза – коэффициентов Γ_l и Γ_g редко бывают полностью известны. Обычно измеряются или указываются только модули ρ_l и ρ_g are usually measured or specified. Этот недостаток информации о фазе не позволяет точно рассчитать чистую мощность, передаваемую генератором в нагрузку, P_{gl} и отношение максимальной доступной мощности, P_{av} к P_{gl} . Однако минимальное и максимальное значения могут быть найдены.

Максимальное и минимальное значения величины $10 \log |1 - \Gamma_g \Gamma_\ell|^2$ называются пределами погрешности потерь рассогласования (M_u). Максимум величины имеет место, когда $\Gamma_g \Gamma_\ell$ находятся в фазе, что даёт:

$$M_{u \max} = 10 \log (1 + \rho_g \rho_\ell)^2 \quad (1)$$

Максимальный предел всегда положителен и не может быть больше 6 дБ, что имеет место при $\rho_l = \rho_g = 1$. Минимальное значение погрешности потерь рассогласования имеет место, когда $\Gamma_g \Gamma_\ell$ комбинируются со значениями, равными “единице” и находятся точно в противофазе, что даёт:

$$M_{u \min} = 10 \log (1 - \rho_g \rho_\ell)^2 \quad (2)$$

Минимальный предел всегда отрицателен и по абсолютному значению больше максимального предела, но обычно на очень небольшую величину.

Следует заметить, что пределы погрешности из-за потерь рассогласования могут быть указаны в процентах отклонения от “единицы” вместо значения в дБ. Это определяется следующим уравнением:

$$\%M_u = 100 [(1 \pm \rho_g \rho_\ell)^2 - 1] \quad (3)$$

При рассогласовании меньше 2% можно использовать следующее приближённое выражение:

$$M_u > \pm 200 \rho_g \rho_\ell \% \quad (4)$$

Современные электронные вычислительные средства, используемые при разработке, имеют программы для вычисления пределов погрешности из-за потерь рассогласования в терминах коэффициента стоячей волны (КСВ) или коэффициента отражения ρ . Модели систем автоматизированного проектирования часто содержат программы, обеспечивающие такие вычисления для линий передачи.

3.1 Простые методы уменьшения погрешности рассогласования

Для управления погрешностью рассогласования можно использовать несколько методов. Первый метод предполагает выбор испытательного оборудования с самыми низкими характеристиками КСВ. В этом случае управление погрешностью рассогласования заключается в уменьшении коэффициента отражения в любых линиях передачи или компонентах, являющихся частью испытательной установки. Другие шаги, которые можно предпринять, чтобы не допустить ухудшения характеристик испытательной системы, включают следующие:

- Максимально сократите длину кабелей и число адаптеров. На низких частотах (например, ниже 300 МГц) длина линий передачи должна быть сведена к минимуму, чтобы уменьшить изменения фазы в зависимости от частоты. Для более высоких частот этот метод непригоден, поскольку даже короткие кабели могут составлять значительную часть длины волны. Используйте только высококачественные кабели. Если испытанию подвергается множество устройств, соединители должны быть рассчитаны на сотни циклов подключения-отключения.

Кроме того, может оказаться невозможным устранить переходы, используемые для сопряжения различных семейств соединителей, но их количество должно быть сведено к минимуму. Переходы должны включаться непосредственно между соединителями, не следует использовать несколько последовательно включённых переходов. Следует также проявлять осторожность при сопряжении разнотипных соединителей. Например, соединители APC-3,5 и SMA внешне выглядят очень похожими, но детали механического сопряжения у них различны. Между соединителями APC-3,5 и SMA рекомендуется использовать прецизионный адаптер (для защиты соединителя).

- Прилагайте одинаковые усилия при затяжке резьбовых соединений, для чего используйте динамометрический ключ и прилагайте соответствующий вращающий момент. При этом следует избегать слишком слабой или слишком тугой затяжки резьбовых соединителей. Применение динамометрического ключа позволит обеспечить небольшие вариации степени затяжки, когда эту работу будут выполнять другие операторы.
- Учитывайте характеристики кабелей, соединителей и адаптеров. Наилучший способ проверки характеристик кабелей и адаптеров заключается в использовании векторного анализатора цепей и регистрации результатов при очередной проверке испытательной станции. Наилучший способ поддержания постоянства характеристик прецизионных соединителей заключается в их регулярной чистке и контроле размеров. Контроль размеров осуществляется с помощью специального измерителя с круговой шкалой, позволяющего убедиться, что соединитель не имеет механических повреждений. Повреждённый соединитель может испортить сопрягаемую с ним ответную часть.

3.2 Усовершенствованные методы уменьшения погрешности рассогласования

Когда характеристики испытательной установки недостаточны для выполнения работы, можно использовать ряд более сложных методов для уменьшения погрешности рассогласования и, в свою очередь, повышения точности. Эти методы включают следующие:

- Добавьте аттенюатор на одном конце линии передачи для улучшения КСВ испытательной установки. Использование фиксированного аттенюатора для улучшения равномерности характеристики линии передачи предполагает, что обратные потери аттенюатора меньше, чем у источника сигнала или нагрузки. Аттенюатор обычно устанавливается на конце линии с наихудшими обратными потерями. Чтобы при этом поддерживать постоянство уровня сигнала на нагрузке, нужно увеличить уровень сигнала генератора. Поэтому этот метод применим только для средних уровней мощности.
- Используйте вентили для уменьшения отражений от нагрузки. Вентили применяются при высоких уровнях мощности, там где затраты, связанные с потерей мощности в аттенюаторе, могли бы оказаться слишком высокими, и при очень низких уровнях мощности, там где сигнал может быть замаскирован тепловым шумом. Вентили являются узкополосными устройствами и, вероятно, более дорогими, чем аттенюаторы.
- Используйте метод с делителем мощности. Здесь для создания импеданса Z_0 в средней точке делителя, применяется контур выравнивания. В результате выходной импеданс генератора является эквивалентом хорошо согласованного СВЧ-резистора во втором плече делителя. Контур выравнивания использует низкочастотную обратную связь для улучшения согласования действующего источника с линией. Для этого требуется двухрезисторный делитель мощности или направленный ответвитель. Выходной сигнал генератора измеряется измерителем мощности, и генератор настраивается таким образом, что индицируемая мощность имеет нужный уровень. Для этого метода требуется измеритель мощности, который согласован лучше, чем генератор, и точно согласованный двухрезисторный делитель мощности или направленный ответвитель.

При повышении частоты измеряемого сигнала очень важно поддерживать низкий КСВ линии передачи. Хотя погрешность рассогласования нельзя исключить полностью, эти практические меры позволят удерживать КСВ на минимальном уровне.

4.0 Инструментальные погрешности

Погрешность измерительного прибора представляет ещё один фактор, вносящий свой вклад в общую погрешность измерения. Для измерения мощности в РЧ- и СВЧ-диапазоне часто используются два прибора: анализатор сигналов и измеритель мощности. Каждый из них имеет свои собственные источники погрешностей.

4.1 Анализатор сигналов

На рисунке 1 показана упрощенная структурная схема типичного анализатора сигналов. Некоторые элементы этой схемы вносят погрешность в результаты измерения амплитуды. Эти составляющие амплитудной погрешности, свойственные большинству анализаторов сигналов, перечислены в таблице 1. Диапазон значений для каждой составляющей перекрывает множество анализаторов сигналов. Для большинства анализаторов сигналов в их спецификациях указываются абсолютные и относительные погрешности.

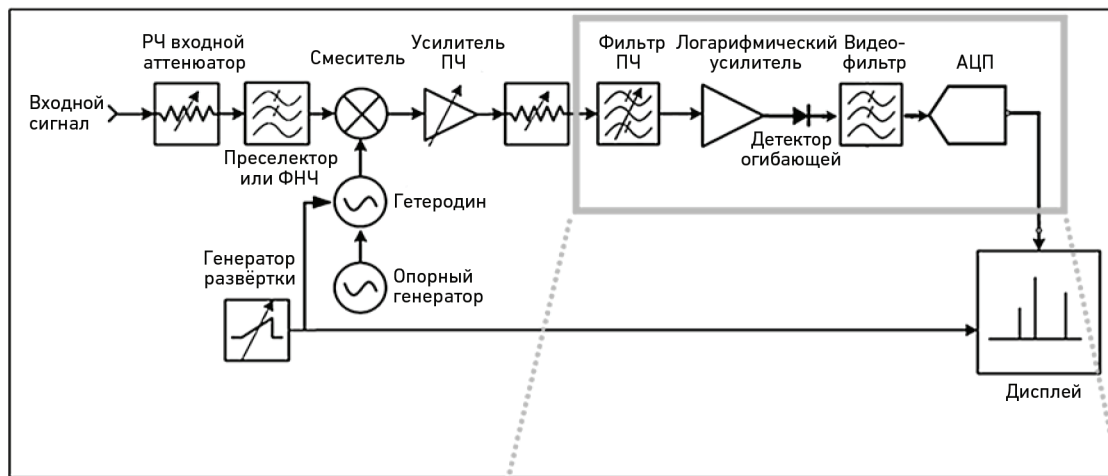
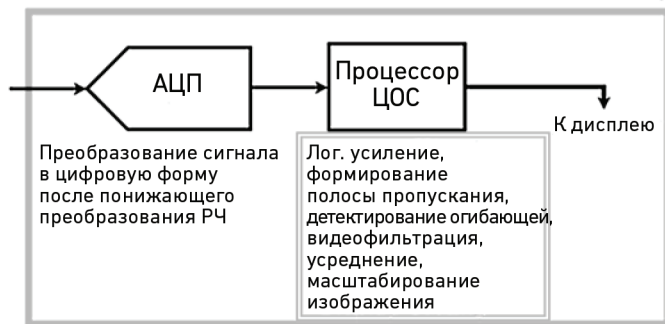


Рисунок 1 – Здесь показаны элементы типичного супергетеродинного анализатора сигналов. Как видно из структурной схемы, функции, выполняемые процессором цифровой обработки сигнала (ЦОС), включают: усиление с логарифмической характеристикой, формирование фильтров полосы пропускания, детектирование огибающей, фильтрацию в полосе видео тракта, усреднение и масштабирование изображения.



Относительные погрешности влияют как на относительную, так и на абсолютную точность измерения. Ниже рассмотрены некоторые факторы, влияющие на относительную погрешность измерения.

- Неравномерность частотной характеристики. Частотная характеристика анализатора сигналов часто является единственным и самым существенным фактором, вносящим вклад в погрешность измерения. Этот вклад определяется неравномерностью частотной характеристики входного аттенюатора, потерями преобразования смесителя и неравномерностью характеристики преселектора (если он используется). Неравномерность зависит от диапазона частот и определяется как $\pm n$ дБ в пределах диапазона частот при данной установке аттенюатора. Частотная характеристика влияет на отображаемые амплитуды сигналов на различных частотах. Это влияние обычно нормируется как для относительных, так и для абсолютных измерений.

Относительная погрешность, обусловленная частотной характеристикой, представляет самую большую возможную амплитудную погрешность в диапазоне частот, определяемую относительно средней точки между минимальным и максимальным значениями амплитудной характеристики в данном диапазоне частот. Заявленные в спецификации нормы на относительную неравномерность (погрешность) частотной характеристики для данного диапазона частот имеют тенденцию быть ниже, чем нормы на абсолютную погрешность частотной характеристики в том же диапазоне. Чтобы определить относительную погрешность измерения амплитуды в полосе частот, обусловленную неравномерностью частотной характеристики, нужно удвоить заявленное в спецификации значение относительной неравномерности (погрешности) частотной характеристики. Это необходимо, чтобы учесть её размах между пиковыми значениями (что часто бывает больше, чем абсолютная погрешность характеристики, указанная в спецификации). Для некоторых анализаторов сигналов требуется “поднять” частотную характеристику преселектора в области высоких частот, чтобы значения неравномерности, заявленные в спецификации, были достоверными.

Анализаторы сигналов в низкочастотной части РЧ диапазона могут иметь относительную погрешность частотной характеристики $\pm 0,5$ дБ. СВЧ-анализаторы, работающие в области 20 ГГц, имеют погрешность, превышающую ± 4 дБ.

- Переключение полос. Использование преобразования частоты на гармониках гетеродина позволяет выполнять измерения в очень широком диапазоне частот. Каждая гармоника гетеродина используется в определённом поддиапазоне частот в пределах полного диапазона частот анализатора. Когда измеряются сигналы в различных измерительных поддиапазонах, при переключении анализатора с одной полосы на другую возникают дополнительные погрешности. В некоторых анализаторах сигналов точки переключения полос можно видеть по нарушению непрерывности отображаемого шумового порога. Обратившись к характеристикам анализатора, определяющим полосы частот для каждой гармоники, оператор всегда может проверить, включают ли его измерения более одной полосы. Хотя это и не всегда указывается в характеристиках, типовая погрешность при переключении полосы составляет ± 1 дБ.

Относительная погрешность	$\pm$ дБ
Неравномерность частотной характеристики	От 0.5 до 4
Переключение полосы	От 0.5 до 1
Точность шкалы	От 0.5 до 2
Опорный уровень (усиление ПЧ)	От 0.1 до 1
Переключение входного аттенюатора	От 0.5 до 2
Переключение полосы пропускания	От 0.1 до 1
Переключение шкалы дисплея	От 0.0 до 1
Абсолютная погрешность	$\pm$ дБ
Неравномерность частотной характеристики	От 0.5 до 4
Калибратор	От 0.2 до 1

- Переключение входного аттенюатора. Входной аттенюатор имеет собственную погрешность, которая ухудшает точность опорного уровня, но только тогда, когда установка аттенюатора изменяется при переключении между калибровкой опорного уровня и измерением. Поскольку входной аттенюатор работает во всём диапазоне частот анализатора, точность шага его установки зависит от частоты. На низких частотах аттенюатор работает достаточно хорошо. На 20 ГГц – не очень. Типовая погрешность от переключения входного аттенюатора составляет ± 1 дБ.
- Переключение полосы пропускания. Различные полосы пропускания (RBW) имеют различные характеристики вносимых потерь, которые могут быть причиной изменений амплитудных показаний, когда один и тот же сигнал измеряется при различных установках полосы пропускания. Изменение установки полосы пропускания между измерениями амплитуды ухудшает точность. Типичная погрешность, вызываемая переключением полосы пропускания, составляет $\pm 0,4$ дБ.

Абсолютные измерения выполняются относительно калибровочного сигнала с известной амплитудой. Большинство анализаторов сигналов имеют встроенный калибратор, который выдаёт сигнал с известной амплитудой на одной частоте. Типичный калибратор имеет погрешность амплитуды $\pm 0,3$ дБ. Калибратор обеспечивает абсолютную калибровку уровня верхней линии масштабной сетки на экране дисплея. Поскольку калибратор обычно работает на одной частоте, перенос результатов калибровки на другие частоты и амплитуды должен происходить с учётом относительной погрешности анализатора.

Если измеряемый сигнал имеет частоту, отличную от частоты калибратора, настройка частоты анализатора должна быть изменена. Если сигнал имеет амплитуду, отличную от амплитуды калибратора, установка опорного уровня также должна быть изменена, чтобы подвести сигнал к верхней линии масштабной сетки для достижения наилучшей точности (если погрешность коэффициента усиления ПЧ меньше погрешности шкалы). Такие изменения вносят относительную погрешность в измерение амплитуды.

4.2 Измеритель мощности

Измерители мощности (включая первичные преобразователи) часто используются при измерении мощности РЧ- и СВЧ-сигналов. Ниже рассмотрены некоторые факторы, влияющие на погрешность измерения в измерителях мощности.

- Калибровка измерителя мощности. В калибровке измерителя мощности участвуют множество эталонов и процессов. Каждый может быть подвержен различным факторам, таким как квалификация персонала, проводящего калибровку, или состояние окружающей среды – температура, влажность – которые вносят свой вклад в погрешность измерения.
- Измеритель мощности. Инструментальная погрешность является результатом комбинации таких факторов, как ошибки слежения измерителя, нелинейность цепей, погрешность аттенюатора с переключаемыми пределами и погрешность коэффициента усиления усилителя. Инструментальная погрешность включает также очень небольшие составляющие, возникающие из-за влияния таких факторов, как термоэлектрическое напряжение, создаваемое температурными градиентами внутри электронных цепей, переключение кабелей или субъективная интерпретация оператором показаний измерителя. Производитель измерительного прибора гарантирует, что эта суммарная погрешность находится в определённых пределах.

- Дрейф измерителя мощности. Дрейф, или долговременная нестабильность, вызывает изменение показаний измерителя за длительное время (обычно за один час) при постоянных мощности на входе, температуре и напряжении питания. Главным образом дрейф порождается первичными преобразователями мощности. В большинстве случаев дрейфу подвержена установка нуля. При измерении на верхних пределах дрейф вносит очень незначительную величину в общую погрешность измерения. На более чувствительных пределах он может быть уменьшен до пренебрежимо малого уровня путём установки нуля непосредственно перед снятием показания.
- Коэффициент калибровки преобразователя. Коэффициент калибровки (K_b) представляет комбинацию коэффициента преобразования преобразователя мощности и потерь рассогласования. Точное измерение K_b представляется довольно сложным и выполняется в основном метрологическими лабораториями и производителями. Большинство современных измерителей мощности позволяют корректировать свои показания путём установки цифрового значения K_b на дисковой шкале или клавиатуре. Погрешность коэффициента K_b (возникающая из-за неточности его измерения производителем, Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) или метрологическими лабораториями) указывается поставщиком услуг калибровки.
- Линейность преобразователя мощности. Линейность измерения мощности является основной характеристикой преобразователя. Отклонение от идеальной линейности обычно возникает на верхнем пределе измерения преобразователя мощности или вблизи его нормированных пределов. Для термопарных преобразователей нелинейность пренебрежимо мала, за исключением верхнего предела измерения мощности от +10 до +20 дБм, где указанное отклонение составляет $\pm 3\%$.
- Установка нуля измерителя мощности. При любом измерении мощности прежде всего должна быть выполнена установка нуля при отсутствии РЧ-сигнала на входе преобразователя. Это достигается внутри измерителя мощности путём введения напряжения смещения, которое принудительно устанавливает измеритель на нулевой отсчёт. На это напряжение смещения накладываются помехи от нескольких источников, включая шумы преобразователя и окружающих цепей. На более высоких пределах измерения мощности ошибки в установке нуля малы по сравнению с измеряемым сигналом.
- Шумы измерителя мощности и преобразователя. Шумы (или кратковременная нестабильность) порождаются источниками внутри преобразователя мощности и его электронными схемами. Их уровень определяется по изменению показаний измерителя за короткий интервал времени (обычно одна минута) при постоянных мощности на входе, температуре и напряжении в сети питания. Одной из причин появления шума является хаотическое движение свободных электронов, обусловленное конечным значением температуры компонентов. Отсчёт мощности может проводиться в момент времени, когда хаотические флуктуации создают максимальное показание, или, возможно, минимальное.

5.0 Определение полной погрешности измерения

Хотя до сих пор мы рассматривали только отдельные составляющие погрешности, вносимые анализатором сигналов и измерителем мощности, необходимо также вычислять полную погрешность в некоторой точке. Это можно сделать с помощью традиционных аналитических методов, подобных вычислению методом наихудшего случая, корня квадратного из суммы квадратов (RSS), или с использованием модели релейевского распределения, которая обеспечивает большую точность и, кроме того, даёт умеренную оценку погрешности, обусловленной рассогласованием. Чтобы лучше понять различие между этими методами, сначала нужно

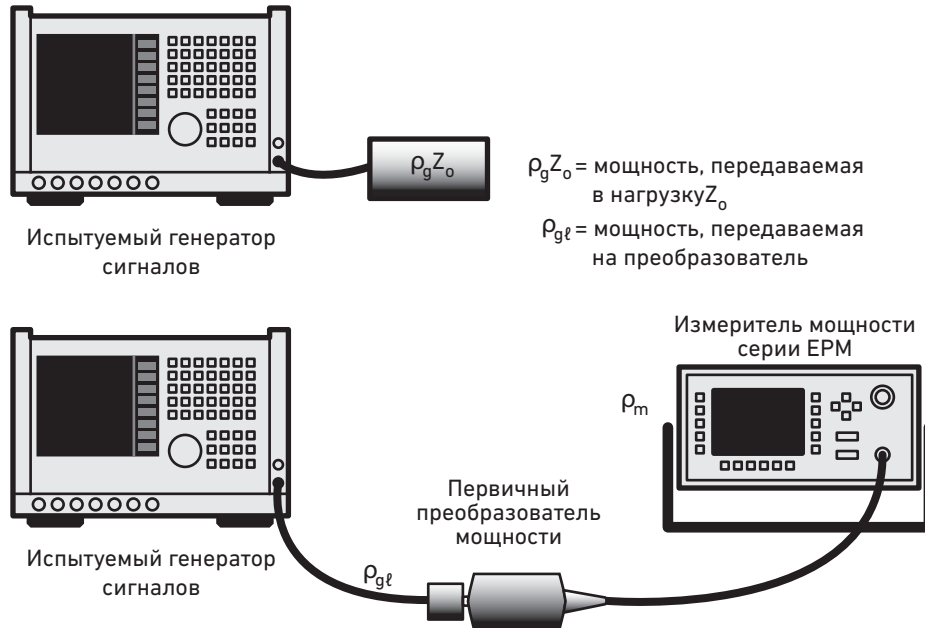


Рисунок 2 – Измеренная выходная мощность должна быть P_{gzo} , но результат измерения показывает P_m .

рассмотреть схемы, приведённые на рисунке 2, которые используются для вывода уравнения, показывающего, как отсчёт по измерителю мощности, P_m , соотносится с мощностью сигнала генератора, передаваемой к нагрузке Z_o , P_{gzo} . Это уравнение показывает, какой вклад вносят индивидуальные погрешности вразность между P_m и P_{gzo} . Уравнение измерения мощности имеет следующий вид.

$$P_{gzo} = \frac{M_u(P_m - t)}{K_b m} \quad (5)$$

Где P_{gzo} – чистая мощность, поступающая на преобразователь, M_u – член, определяющий погрешность рассогласования, t – полная погрешность смещения, K_b – калибровочный коэффициент, m – усиление.

При идеальной измерительной ситуации, M_u и K_{bm} равны единице, а t равно нулю. В идеальных условиях показание измерителя мощности P_m даёт истинное значение P_{gzo} .

5.1 Погрешность по методу худшего случая

Метод худшего случая определения полной погрешности измерения мощности состоит в линейном суммировании отдельных её составляющих. Это справедливо, когда все возможные источники ошибки имеют экстремальные значения и действуют в таком направлении, что их суммирование вполне оправдано и даёт максимально возможную величину расхождения между P_m и P_{gzo} .

В качестве примера можно рассмотреть условия измерения, перечисленные в верхней части таблицы 2, которая представляет карту различных составляющих ошибки измерения мощности по схеме рисунка 2. Условия и погрешности, перечисленные в таблице, типичны, а вычисления выполнены только для иллюстрации, так как они не показывают, что можно получить при использовании более точного метода. Вычисления выполнены с точностью до четырёх десятичных знаков, из-за трудности вычисления с несколькими числами почти такого же формата.

Таблица 2 – Карта погрешностей для типичного измерения абсолютной мощности. Большинство перечисленных здесь ошибок взято из перечня технических данных производителя.

Условия измерения	$P_m = 50$ мкВт	Полная шкала (F.S.) = 100 мкВт		
	$\rho_t \leq 0.091$ (SWR ≤ 1.2) $K_b = 93\% \pm 3\%$ (наихудший случай), $\pm 1.5\%$ (RSS)	$\rho_g \leq 0.2$ (SWR _g ≤ 1.5)		
Ошибка	Описание	Значения в наихудших случаях		Компонента RSS
		$P_{gzo \max}$	$P_{gzo \min}$	$(\Delta X/X)^2$
M_u	$(1 \pm P_g P_t)^2$	1.0367	0.9639	$(0.0367)^2$
Погрешность K_b	$\pm 3\%$ (наихудш. случай), $\pm 1.5\%$ (RSS)	1.03	0.97	$(0.015)^2$
Компоненты m				
Погр. опорн. генерат.	$\pm 0.6\%$ (за 2 года $\pm 10^\circ\text{C}$ value)	1.006	0.994	$(0.006)^2$
M_u опорн. генерат.	SWR _g = 1.05, SWR _t = 1.1	1.002	0.998	$(0.002)^2$
Инструментальная	$\pm 0.5\%$ от полной шкалы	1.01	0.99	$(0.01)^2$
Полное m		1.018	0.982	
Компоненты t				
Установка нуля	$\pm 0.5\%$ F.S. (low range)	+0.05 мкВт	−0.05 мкВт	$(0.001)^2$
Перенос нуля	$\pm 0.2\%$ of F.S	+0.2 мкВт	−0.2 мкВт	$(0.004)^2$
Шум	$\pm 0.025 \mu\text{W}$	+0.025 мкВт	−0.025 мкВт	$(0.0005)^2$
Полное t		+0.275 мкВт	−0.275 мкВт	
Выражения полной погрешности				
$P_{gzo \max}$	$P_{gzo \max} = \frac{M_{u \max} (P_m - t_{\min})}{K_{b \min} m_{\min}}$	54.7170 мкВт		
$P_{gzo \min}$	$P_{gzo \min} = \frac{M_{u \min} (P_m - t_{\max})}{K_{b \max} m_{\max}}$	45.7111 мкВт		
ΔP_{gzo}		4.7170 мкВт	−4.2889 мкВт	
$\Delta P_{gzo} / P_m$		+9.43%	−8.58%	$(0.001729)^{1/2}$
				$\pm 4.2\%$
				+0.1769 дБ
Погрешность, дБ		0.3915 дБ	−0.3895 дБ	−0.1844 дБ

Инструментальная погрешность, i , часто указывается в процентах от полной шкалы (P_{fs}). Вклад в увеличение погрешности, m , определяется формулой:

$$m_i = \frac{(1 + i) P_{fs}}{P_m} \quad (6)$$

Погрешности, вносящие вклад в увеличение полной погрешности, складываются так же, как коэффициенты усиления в каскадных усилителях. Минимальное возможное значение m получается, когда каждая из его составляющих минимальна. Минимальное значение m (0,9762) равно произведению индивидуальных составляющих ($0,988 * 0,998 * 0,99$). Составляющие, которые вносят вклад в полную погрешность смещения, t , складываются как напряжения последовательно включённых источников, то есть, суммируются. Когда значение t найдено, вклад в дБ может быть вычислен по формуле:

$$t_{dB} = 10 \log \left(1 \pm \frac{t}{P_m} \right) \quad (7)$$

Максимальное и минимальное значения $P_{g_{zo}}$ могут быть вычислены с помощью уравнения (5) по данным взятым из таблицы 2. В этом случае $P_{g_{zo} \max}$ равно $1.0943 P_m$ а $P_{g_{zo} \min}$ равно $0.9142 P_m$. Следует заметить, что погрешность в $P_{g_{zo}}$ может быть также определена как абсолютная разность мощностей, относительное отклонение, процент от показания измерителя или отклонение в децибелах от показания измерителя (которое может быть определено путём суммирования отдельных составляющих ошибки, выраженных в дБ).

На рисунке 3 графически показаны вклады отдельных составляющих в погрешность для наихудшего случая, где погрешность рассогласования представляет самую большую отдельную составляющую полной погрешности. Это типично для большинства измерений мощности. Погрешности усиления и смещения проще всего оценить по данным спецификаций, и часто только оценённые таким образом погрешности вносят вклад менее одной трети полной погрешности.



Рисунок 3 – График отдельных вкладов в полную погрешность для наихудшего случая.

5.2 Метод среднеквадратической (RSS) погрешности

Определение погрешности в наихудшем случае даёт заведомо завышенную оценку погрешности, в то время как метод среднеквадратической погрешности предлагает более реалистичный способ сложения отдельных составляющих. Этот метод основывается на том, что большинство ошибок измерения мощности, хотя и являются систематическими, а не случайными, взаимно независимы, и, следовательно, их индивидуальные составляющие могут комбинироваться по среднеквадратическому (RSS) принципу.

Нахождение среднеквадратической погрешности требует, чтобы каждая составляющая была выражена относительной величиной. Среднеквадратическая погрешность измерения мощности (5) определяется выражением::

$$\frac{\Delta P_{g_{zo}}}{P_{g_{zo}}} = \left[\left(\frac{\Delta M_u}{M_u} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K_b}{K_b} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{P_m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

Если каждый из членов этого уравнения заранее неизвестен, он может быть найден как корень квадратный из суммы квадратов (RSS) нескольких составляющих:

$$\frac{\Delta M_1}{m} = \left[\left(\frac{\Delta M_1}{m_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (9)$$

Здесь m_1 , m_2 , и так далее представляют погрешности опорного генератора, инструментальную погрешность и другие элементы из таблицы 2. Крайняя правая колонка таблицы 2 содержит компоненты, используемые для нахождения полной среднеквадратической погрешности. Результат составляет $\pm 4,3\%$, что значительно меньше, чем погрешность по методу наихудшего случая, равная + 10,1 и минус 9,1 процента. Одна особенность метода среднеквадратической погрешности заключается в том, что окончательный результат всегда больше одной самой большой составляющей погрешности.

5.3 Погрешность для модели рассогласования

Когда известен коэффициент отражения, его амплитуда и фаза, можно скорректировать погрешность рассогласования, используя известную погрешность. Когда фаза неизвестна, определение погрешности рассогласования требует другой модели. Стандартная погрешность выражения рассогласования, $u(M_u)$, предполагающего отсутствие данных о фазе, зависит от статистического распределения, которое наилучшим образом представляет модули коэффициентов отражения, Γ_g и Γ_l .

Мощность, рассеиваемая на нагрузке, когда Γ_l не равен нулю, определяется выражением::

$$P_d = P_{g_{zo}} \frac{1 - |\Gamma_l|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_l|^2} \quad (10)$$

В этом случае числитель представляет потери рассогласования, тогда как знаменатель – погрешность рассогласования, M_u , усиление или ослабление, обусловленное многократными отражениями между генератором и нагрузкой. Если модули и фазы коэффициентов Γ_g и Γ_l известны, M_u можно определить точно. Оценка модулей обычно имеется, тогда как фазы Γ_g и Γ_l неизвестны.

Когда коэффициенты отражения генератора и нагрузки неизвестны, можно оценить вероятности погрешностей рассогласования в соответствии с шестью тестовыми случаями таблицы 3.

Таблица 3 – Тестовые случаи, используемые для оценки вероятностей погрешностей рассогласования.

Случай	$u(M_u)$	Распределение	Тип
A	$\frac{1}{\sqrt{2}} \times \Gamma_{\max_g} \times \Gamma_{\max_\ell} $	–	Круг/Круг (равномерное распределение внутри круга)
B	$\sqrt{2} \times \Gamma_g \times \Gamma_\ell $	U-образное	Кольцо/Кольцо (фикс. точки)
C	$\frac{\sqrt{2}}{\ln(20)} \times \Gamma_{95_g} \times \Gamma_{95_\ell}$	Колоколообразное	Релея/Релея
D	$ \Gamma_{\max_g} \times \Gamma_\ell $	–	Круг/Кольцо
E	$\sqrt{\frac{2}{\ln(20)}} \times \Gamma_{95_1} \times \Gamma_2$	–	Кольцо/Релея
F	Использовать уравнение ISO GUM	–	–

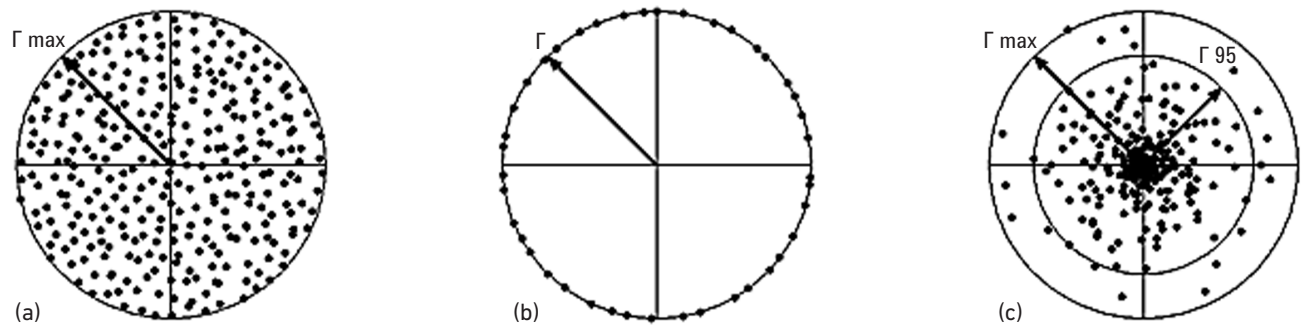


Рисунок 4 – Когда коэффициенты отражения генератора и нагрузки неизвестны, вероятности погрешностей рассогласования можно оценить, используя три модели: первая модель использует измеренные значения модуля коэффициента отражения, в основе второй модели лежит распределение Релея, когда модуль коэффициента отражения должен иметь предполагаемое (расчётное) значение, и третья модель использует комбинацию измеренного и расчётного значений.

Случай А. Два круговых распределения Γ (известных также как равномерное распределение внутри круга)

На рисунке 4 (а) генератор и нагрузка имеют коэффициенты отражения Γ с известными максимальными значениями модулей. Для каждой компоненты величина вектора Γ имеет равную вероятность нахождения в любом месте внутри круга, ограниченного окружностью максимального модуля. Здесь имеет место равномерное распределение абсолютной фазы, так же как и относительной фазы, между двумя компонентами. Функция распределения вероятности (PDF) погрешности рассогласования для этой комбинации иллюстрируется гистограммой на рисунке 5. Уравнение для стандартного отклонения (стандартной погрешности) для этого распределения имеет вид:

$$u(M_u) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times |\Gamma \max_g| \times |\Gamma \max_\ell| \quad (11)$$

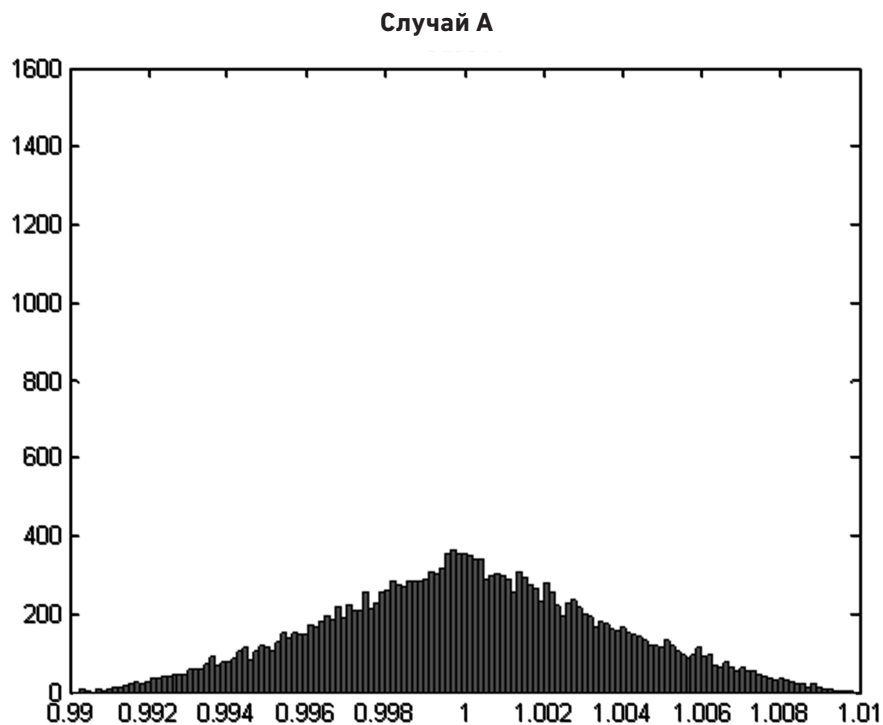


Рисунок 5 – Гистограмма M_u для случая А, полученная моделированием по методу Монте-Карло для $\Gamma_1 \max = 0.1$ и $\Gamma_2 \max = 0.05$.

Случай В. Два кольцевых распределения Γ (известных также как фиксированные)

На рисунке 4 (b) генератор и нагрузка имеют коэффициенты Γ с известными модулями. И генератор, и нагрузка имеют равномерно распределённые абсолютные фазы, так же как и относительные фазы между двумя компонентами. Функция распределения вероятности погрешности рассогласования для этой комбинации иллюстрируется гистограммой на рисунке 6, которая хорошо известна как U-образное распределение. Уравнение для стандартного отклонения (стандартной погрешности) для этого распределения имеет вид:

$$u(M_u) = \sqrt{2} \times |\Gamma_g| \times |\Gamma_\ell| \quad (12)$$

Случай В

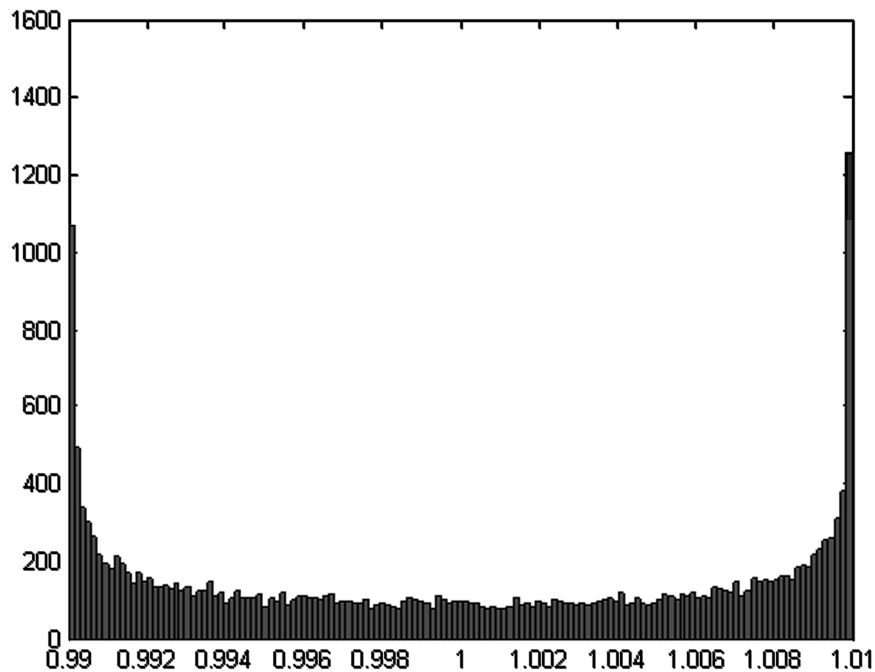


Рисунок 6 – Гистограмма M_u для случая В (два кольцевых распределения), полученная моделированием по методу Монте-Карло для $\Gamma_1 = 0.1$ и $\Gamma_2 = 0.05$.

Случай С. Два релеевских распределения коэффициентов |Г|

На рисунке 4 (с) оба коэффициента отражения Γ имеют релеевские распределения модулей с известным 95-м процентилем, Γ_{95} . Функция распределения вероятности для этого случая показана на рисунке 7. Стандартная погрешность рассогласования определяется выражением:

$$u(M_u) = \frac{\sqrt{2}}{\ln(20)} \times \Gamma_{95_g} \times \Gamma_{95_e} \quad (13)$$

Следует обратить внимание, что Γ_{95} меньше $\Gamma_{\max}$. Если $\Gamma_{\max}$ фактически является модулем Γ , соответствующим 0,27% потерям в производстве (эквивалентно характеристике “3 сигма” для гауссова распределения), то $\Gamma_{95} = 0,712 \times \Gamma_{\max}$. Практически $\Gamma_{\max}$ обычно превышает Γ_{95} в большем соотношении, чем показано здесь. То есть, этот метод является консервативным методом оценки. Типично случай С даёт в три раза более низкие значения погрешностей, чем случай А, и в шесть или более раз, чем случай В.

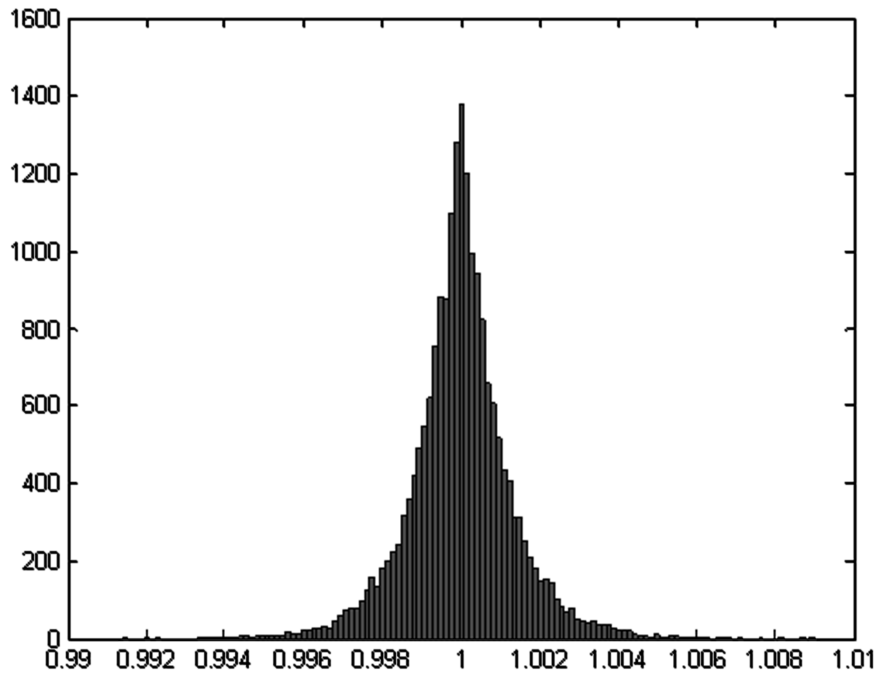
Случай С

Рисунок 7 – Гистограмма M_u для случая С, два релеевских распределения модуля имеют колоколообразную форму

Случай D. Одно круговое и одно кольцевое распределения Γ

Здесь один из коэффициентов Γ имеет известный модуль, а другой имеет известное значение 95-го перцентиля модуля. И генератор, и нагрузка имеют абсолютные фазы с равномерным распределением, так же, как и относительные фазы между двумя компонентами. Функция распределения вероятности этой погрешности рассогласования иллюстрируется гистограммой на рисунке 9. Форма этой гистограммы значительно меняется в зависимости от соотношения величин двух коэффициентов Γ . Уравнение для стандартного отклонения (стандартной погрешности) для этого распределения имеет вид:

$$u(M_u) = |\Gamma \max_g| \times |\Gamma_\epsilon| \quad (14)$$

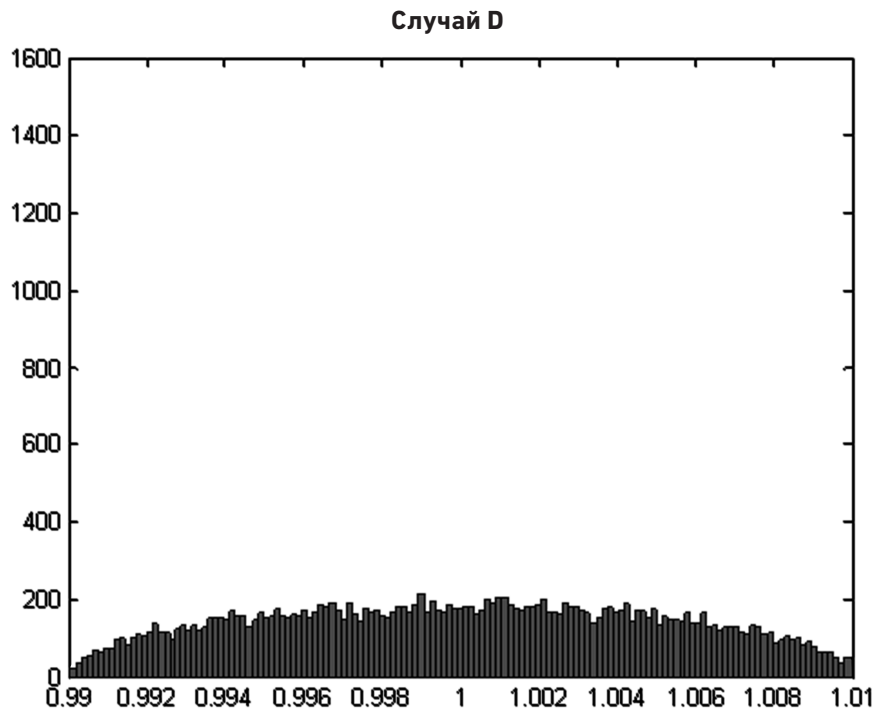


Рисунок 8 – Гистограмма M_i для случая D (одно круговое и одно кольцевое распределение), полученная моделированием по методу Монте-Карло для $\Gamma_1 = 0,1$ и $\Gamma_2 = 0,05$.

Случай Е. Одно кольцевое распределение коэффициента Γ и одно релеевское распределение $|\Gamma|$

Здесь один из коэффициентов Γ имеет известный модуль, а другой имеет известное значение 95-го перцентиля модуля. И генератор, и нагрузка имеют абсолютные фазы с равномерным распределением, так же, как и относительные фазы между двумя компонентами. Функция распределения вероятности этой погрешности рассогласования иллюстрируется гистограммой на рисунке 9. Форма этой гистограммы значительно меняется в зависимости от соотношения величин двух коэффициентов Γ . Уравнение для стандартного отклонения (стандартной погрешности) для этого распределения имеет вид:

$$u(M_v) = \sqrt{\frac{2}{\ln(20)}} \times \Gamma_{95_1} \times \Gamma_2 \quad (15)$$

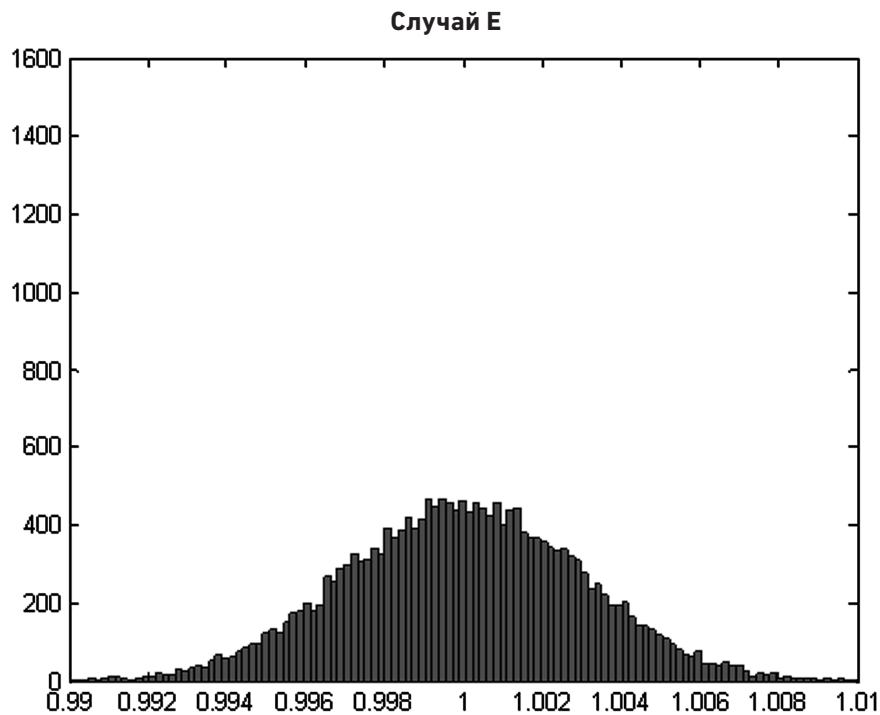


Рисунок 9 – Гистограмма M_v для случая Е (одно кольцевое и одно релеевское распределение), полученная моделированием по методу Монте-Карло для $\Gamma_1 = 0,1$ и $\Gamma_2 = 0,05$.

Случай F. Известный модуль Γ , известная фаза (и для генератора, и для нагрузки)

Когда и модуль, и фаза для генератора и нагрузки известны, для получения более точного результата может быть использована коррекция измерения. В этом случае погрешность составляющей рассогласования можно определить, используя модель ISO (GUM). Здесь стандартная погрешность рассогласования определяется выражением:

$$M_u = |1 - \Gamma_g \Gamma_\ell|^2 \quad (16)$$

и может быть вычислена, где $u(M_u)$ – стандартная погрешность, определяемая выражением:

$$u(M_u)^2 = (u(\Gamma_g)|1 - \Gamma_g \Gamma_\ell| - \Gamma_\ell|^2 + (u(\Gamma_\ell)|1 - \Gamma_g \Gamma_\ell| - \Gamma_g|^2) \\ u(M_u) = \sqrt{(u(\Gamma_g)|1 - \Gamma_g \Gamma_\ell||\Gamma_\ell|)^2 + (u(\Gamma_\ell)|1 - \Gamma_g \Gamma_\ell||\Gamma_g|)^2}$$

Здесь $u(\Gamma) = \Gamma$ – стандартная погрешность преобразователя мощности, которая может быть получена из отчёта об измерении или из руководства по эксплуатации.

Анализ погрешности рассогласования представляет собой сложный процесс. Исторически большинство специалистов приняли на вооружение метод на основе U-образного распределения, который даёт в результате завышение погрешности. Для специалистов, стремящихся минимизировать риск занижения погрешности, это может быть приемлемо. Однако распределение Релея представляет более подходящее решение и даёт более реалистичные результаты.

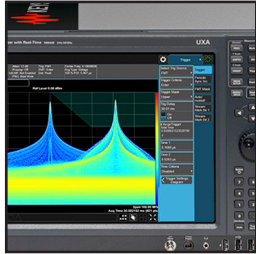
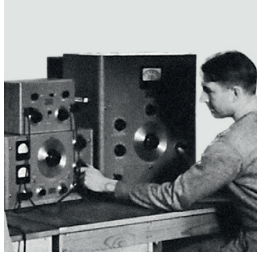
6.0 Заключение

Вычисление погрешности является ответственной и необходимой частью любого измерения. Несмотря на то, что измерительные приборы вносят свой вклад в полную погрешность измерения, самым весомым является, вероятно, вклад, обусловленный рассогласованием. Для уменьшения погрешности рассогласования можно использовать несколько методов. Анализ погрешности рассогласования является сложным и трудоёмким процессом. Несмотря на то, что для выполнения этой задачи можно использовать несколько методов, модель Релея обеспечивает быструю и точную оценку стандартной погрешности, обусловленной рассогласованием. Этот метод даёт приблизительно в шесть раз более низкую оценку погрешности, чем популярный метод, использующий U-образное распределение. Для современных специалистов выигрыш от такого подхода очевиден – более низкая погрешность измерения означает более высокую точность и большую уверенность в результатах данного испытания.

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированная подборка только нужной вам информации.

http://www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомлениям о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами

www.keysight.com/find/ad

Российское отделение
Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб.,
52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России
бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб.,
52,

стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-16-10-14)



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.

Сертифицировано DEKRA на соответствие
стандарту ISO 9001:2015

Система управления качеством