



Основы Векторного Анализа Цепей

Андрей Крылов
Руководитель инженерной группы
andrey.krylov@planarchel.ru

ПРОГРАММА СЕМИНАРА

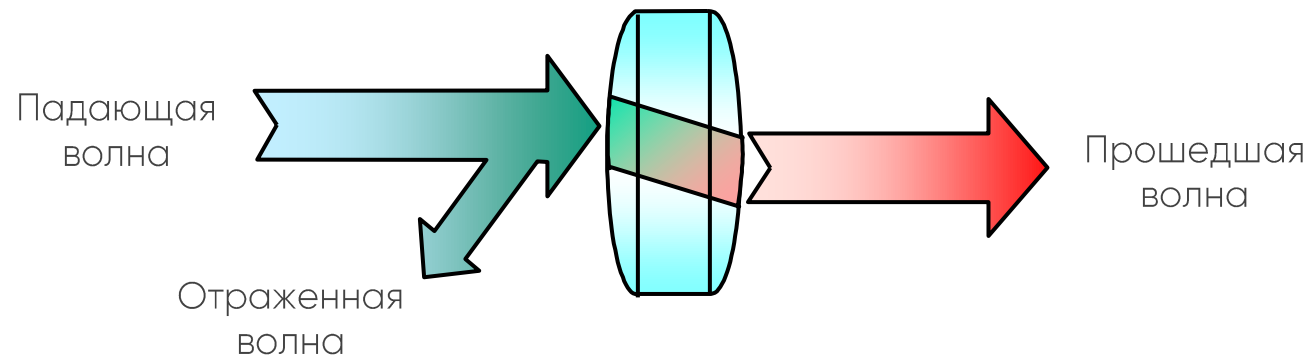
- Введение в теорию Векторного Анализа Цепей
 - Типы измеряемых устройств
 - Основы теории линий передач
 - Терминология
 - S-параметры
- Структура Векторных Анализаторов Цепей
- Составляющие погрешности и калибровка ВАЦ
- Обзор измерительных возможностей современных ВАЦ
- Основы автоматизации измерений



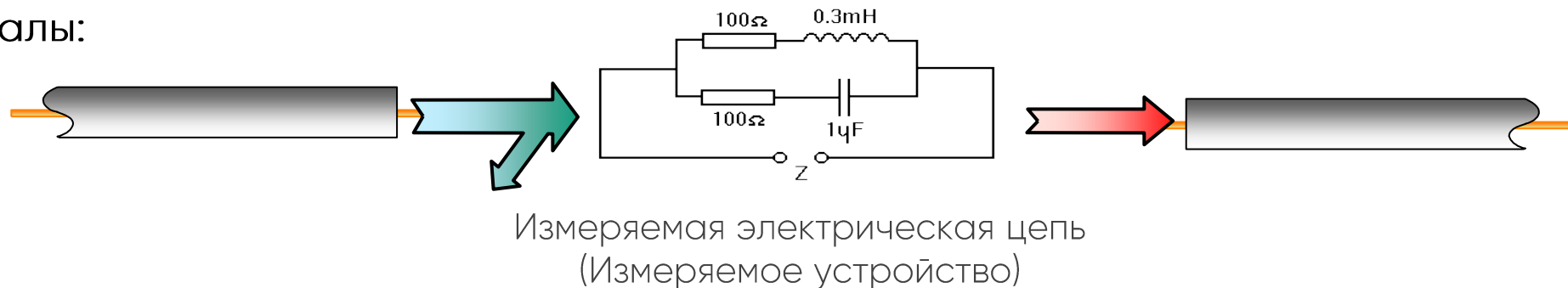
ЧТО ТАКОЕ ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ

Анализатор цепей – это прибор для измерения параметров электрических цепей с высокой точностью
Система построена на принципе «воздействие–отклик»

Оптика:



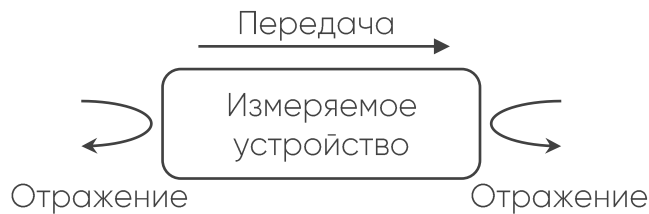
СВЧ сигналы:



ВОЗМОЖНОСТИ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ

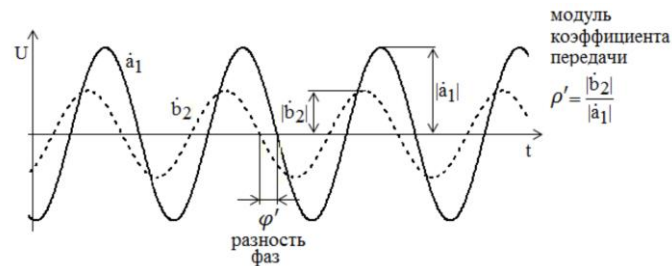
Характеризует

Отражение сигнала от входа/выхода и прохождение сигнала через измеряемое устройство



Оценивает

Неравномерность амплитуды и линейность фазы



Обеспечивает

Высокую скорость измерений
Высочайшую точность измерений



ТИПЫ ИЗМЕРЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ НА ВАЦ



Диаграмма измерений

Измерительный прибор	Постоянный ток	Фиксир. частота	Перестр. частота	Перестр. мощность	Шум	Многомод. сигнал	Цифровые модуляции	Импульсный сигнал
	Радиотестер						BER EVM ACPR Сигнальное созвездие	
	Осциллограф							
	Анализатор сигналов		Гармонич. искажения Подавление ЗК			Коэффициент шума	ИМИ	
	ВАЦ			Усиление Фаза, ГВЗ S-параметры Импеданс	Компрессия АМ-РМ Смесители Балансн.			
	Измеритель импеданса	LCR/Z						
	Параметрическ. анализатор	I-V						
	Измеритель мощности	Абсолютная мощность						
Тип воздействия								

ЗАЧЕМ ТЕСТИРОВАТЬ КОМПОНЕНТЫ

Проверка характеристик "блоков"

Радиочастотных систем различной сложности

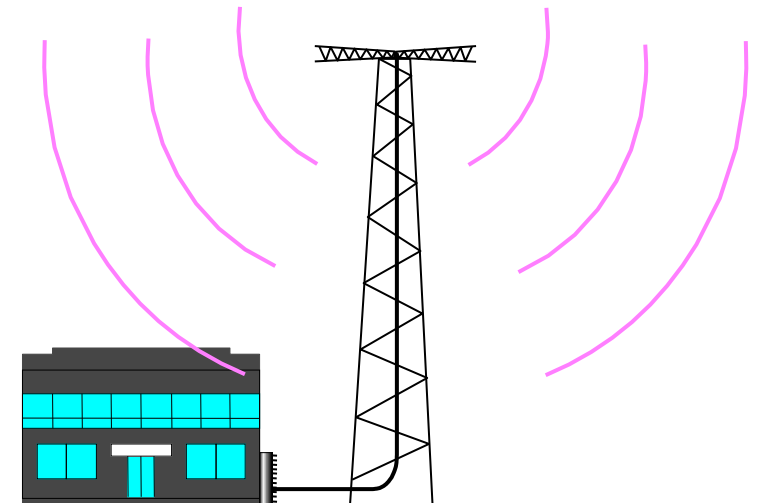
Проверка передачи сигналов

Нелинейная область: гармоники, интермодуляция, компрессия

Линейная область: постоянство амплитуды, линейность фазы, равномерность ГВЗ

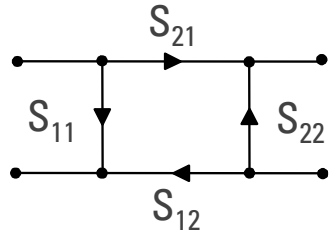
Проверка качества согласования

В том числе антенных систем

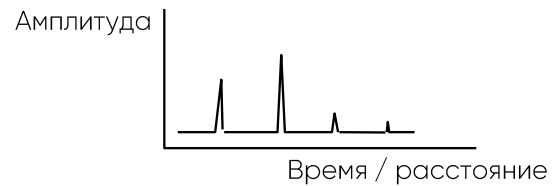


ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ

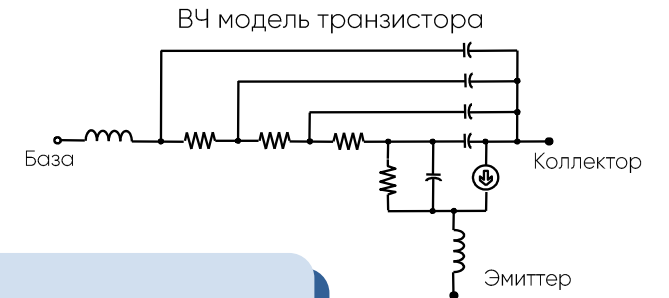
Полная характеристика линейной цепи



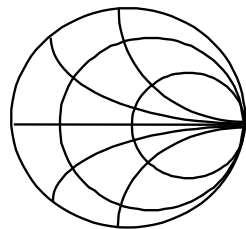
Анализ во временной области



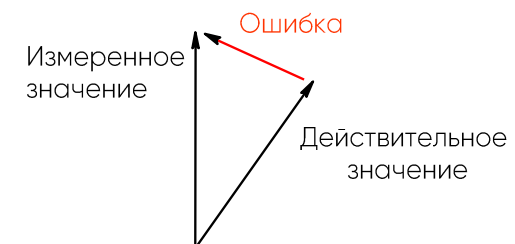
Моделирование с учетом комплексных величин



Создание цепей согласования с учетом комплексного импеданса



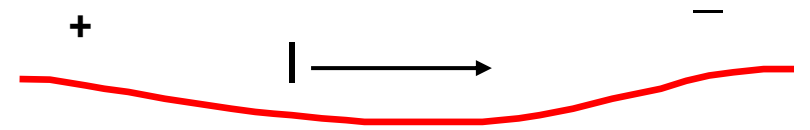
Векторная коррекция для повышения точности



ТЕОРИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ

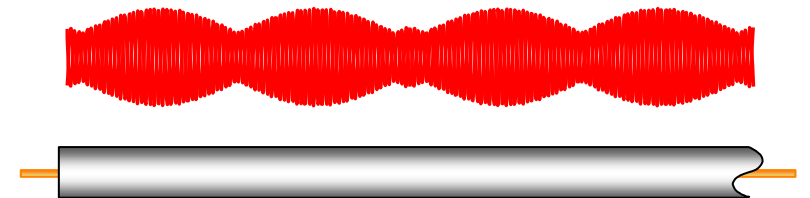
Низкие частоты

- Длина волны \gg физической длины проводника
- Величина напряжения и ток практически не отличаются на всей длине провода и не зависят от места измерения



Высокие частоты

- Длина волны сопоставима или \ll длины линии передач
- Согласование импедансов необходимо для эффективной передачи мощности и минимизации отражений
- Измеряемое напряжение зависит от места, выбранного для измерения

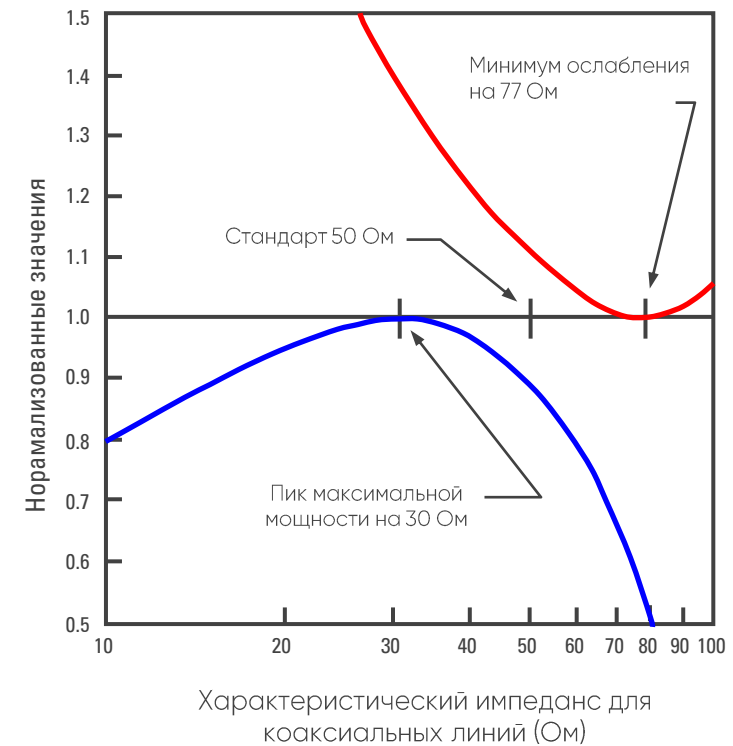
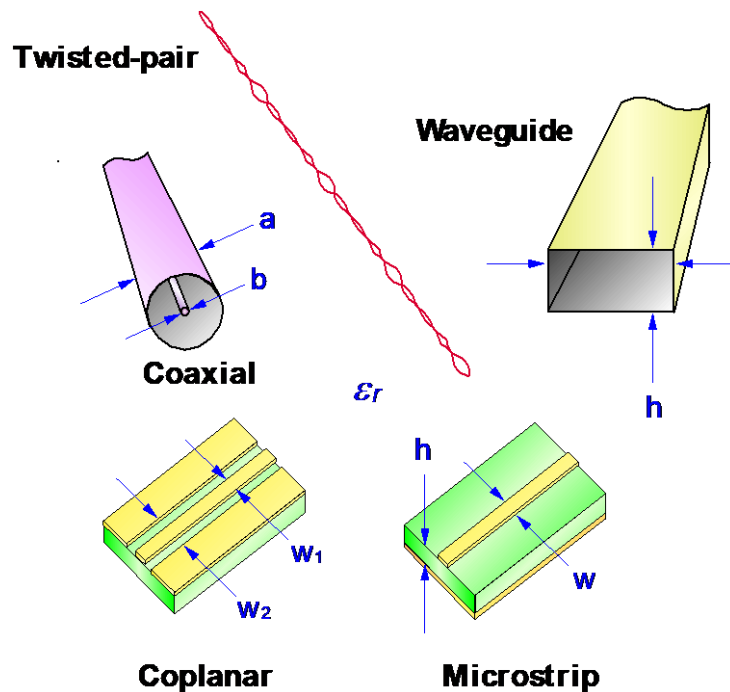


ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ ИМПЕДАНС ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

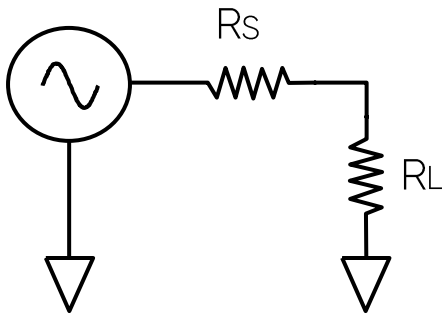
Z_0 определяет соотношение между волной напряжения и волной тока бегущей волны

Z_0 есть функция физических размеров и параметров материала (ϵ_r)

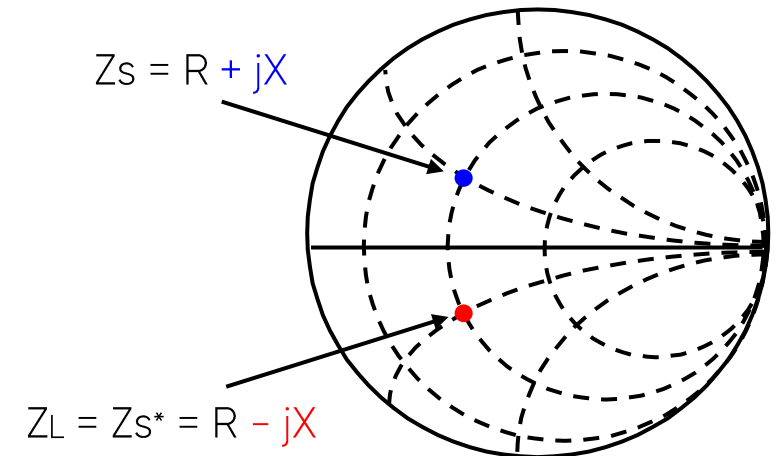
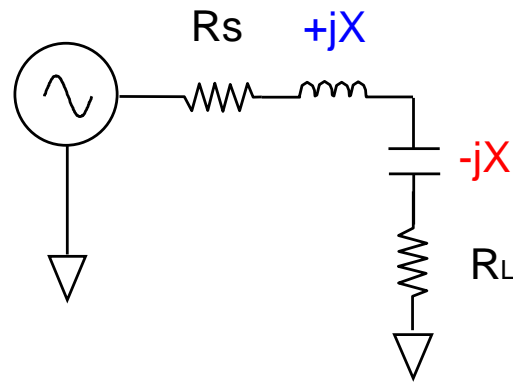
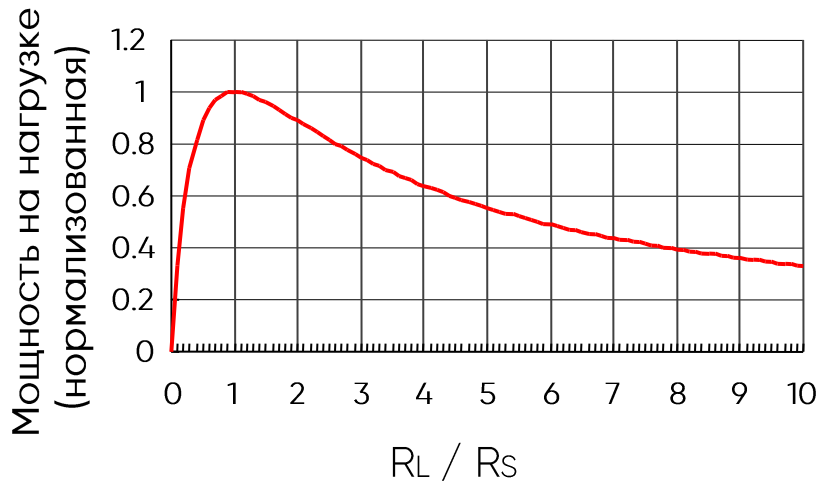
Z_0 обычно не реактивный импеданс (50 Ом либо 75 Ом)



УСЛОВИЕ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ

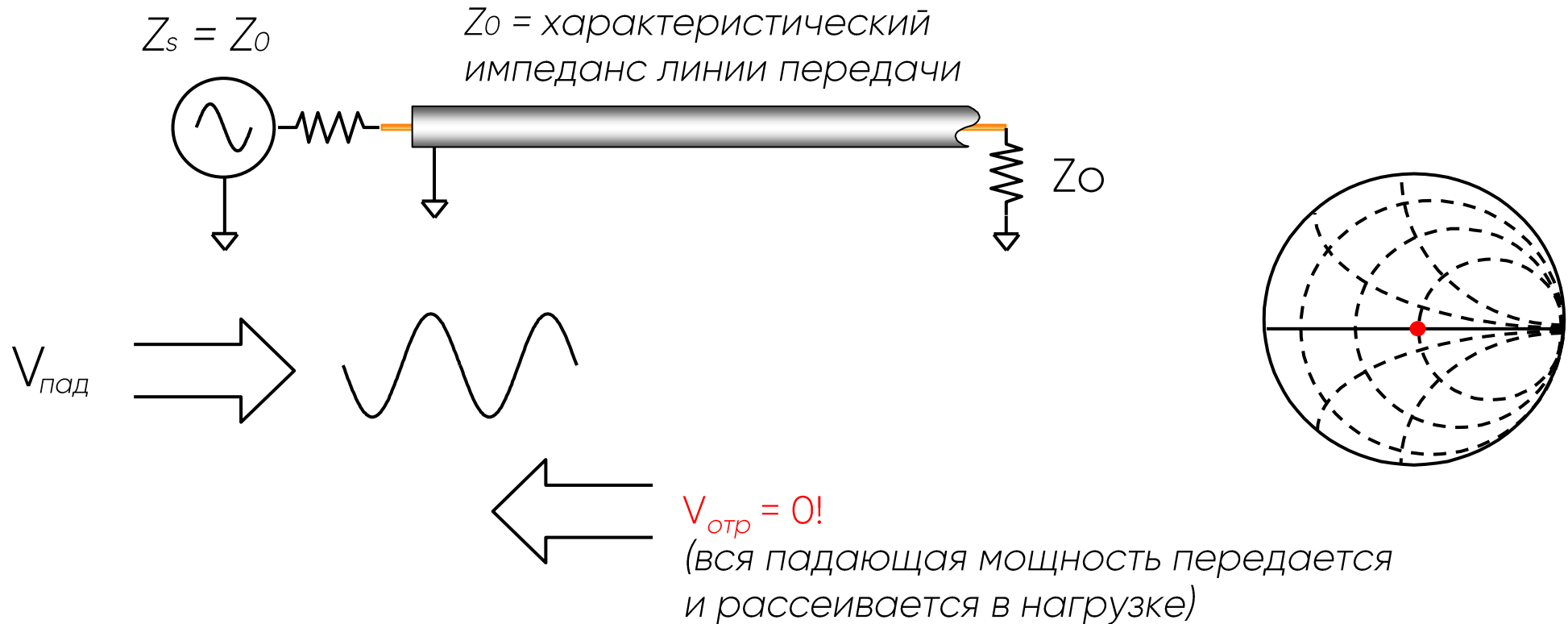


Для комплексного импеданса, максимум мощности передается при условии $Z_L = Z_S^*$ (комплексно-сопряженный импеданс)



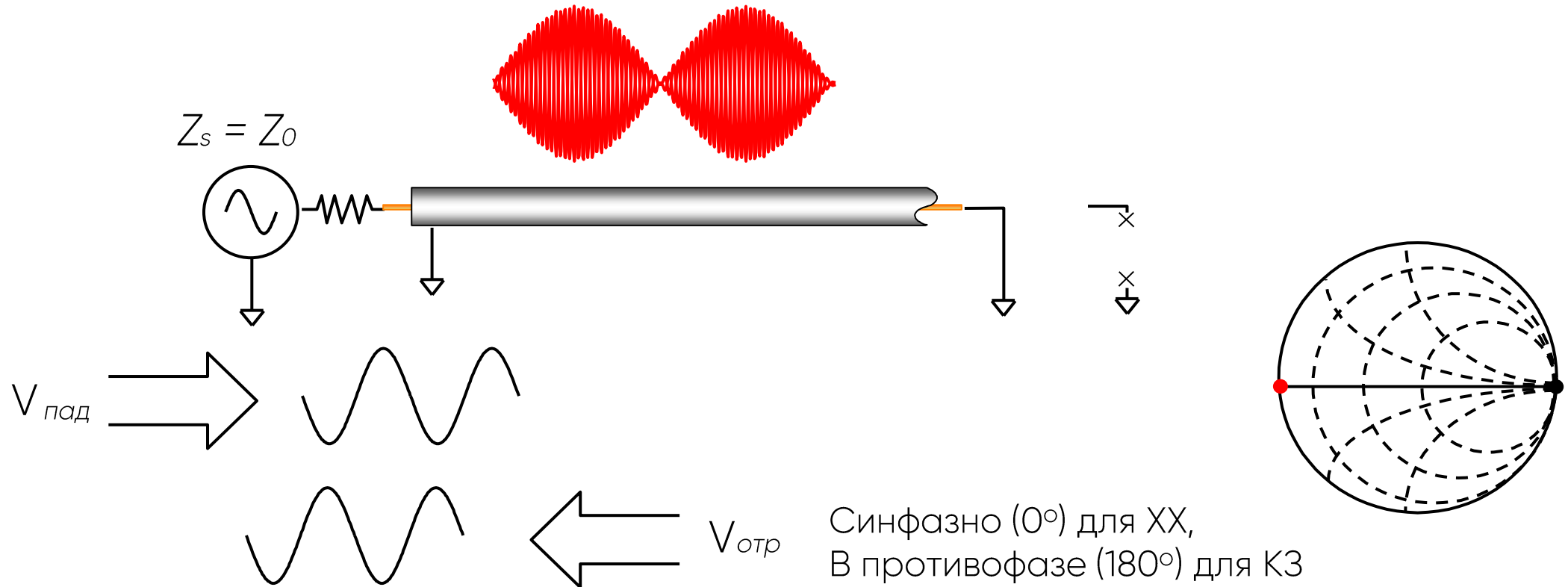
Максимальная мощность передается от источника в нагрузку при $R_L = R_s$

ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ, НАГРУЖЕННАЯ НА Z_0



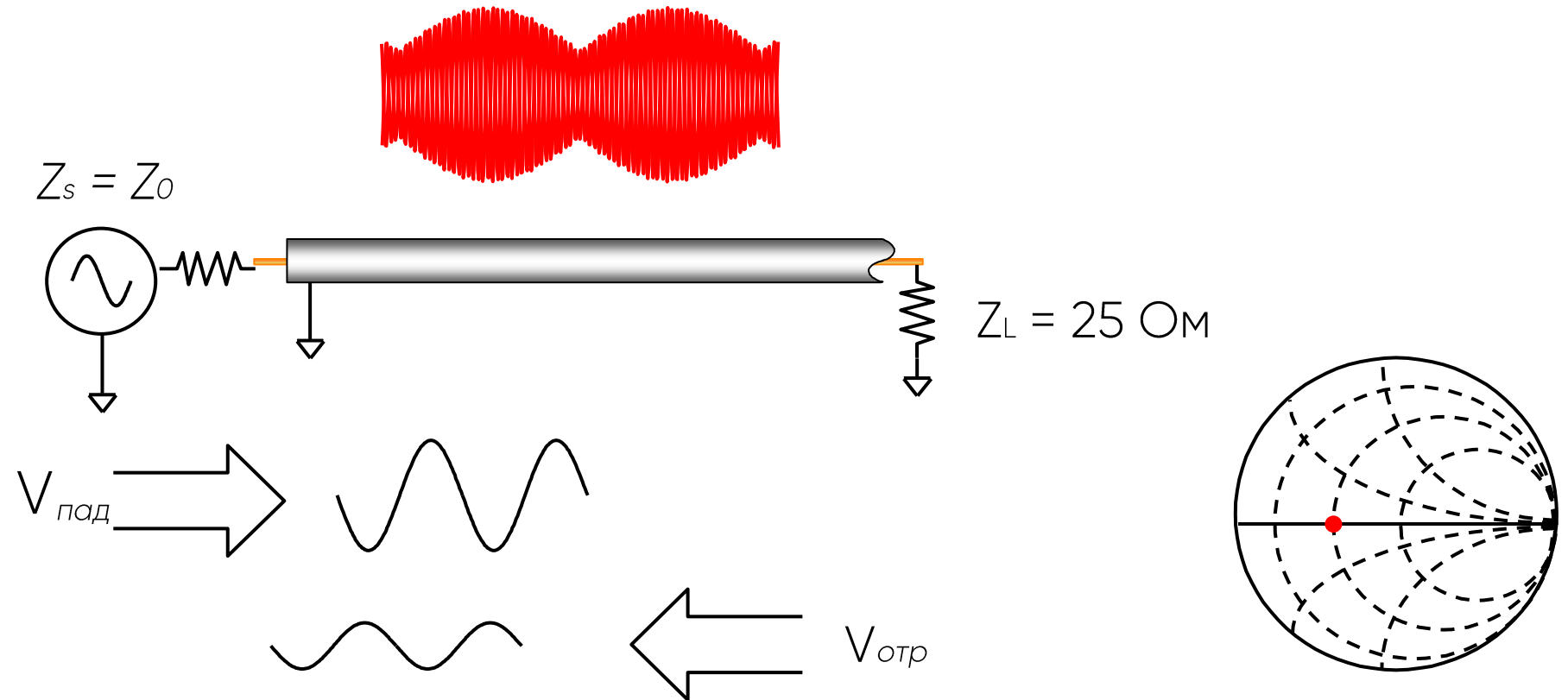
Для отражения, линия передачи, нагруженная на Z_0 представляет собой бесконечно длинную линию

ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ, НАГРУЖЕННАЯ ХХ, КЗ



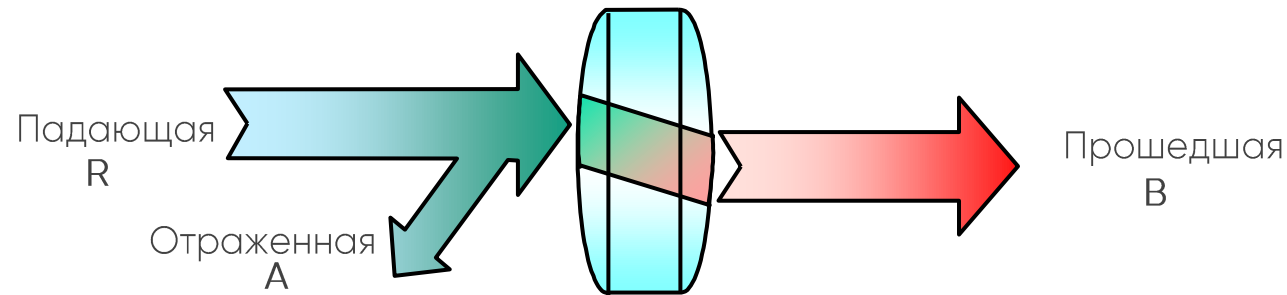
Если линия передачи нагружена на ХХ или КЗ, то вся мощность отражается обратно в источник

ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ, НАГРУЖЕННАЯ НА 25 ОМ



Амплитуда стоячей волны ни в какой точке линии не равна 0, как при нагрузке на ХХ или КЗ

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СВЧ УСТРОЙСТВ



Отражение

$$\frac{\text{Отраженная}}{\text{Падающая}} = \frac{A}{R}$$

KCBH (VSWR)

S-параметры
 S_{11}, S_{22}

Коэффициент отражения (Reflection coefficient)
 Γ, ρ

Возвратные потери (Return Loss)

Импеданс, Проводимость (Impedance, Admittance)
 $R+jX, G+jB$

Передача

$$\frac{\text{Прошедшая}}{\text{Падающая}} = \frac{B}{R}$$

Gain / Loss (Усиление/ Потери)

S-Параметры
 S_{21}, S_{12}

Transmission Coefficient (Коэффициент передачи)
 T, t

Групповое Время Запаздывания (Group Delay)

Набег фазы (Insertion Phase)

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Коэффициент отражения

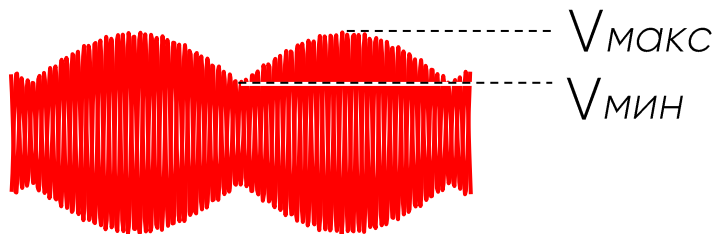
$$\Gamma = \frac{V_{\text{отр}}}{V_{\text{пад}}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = p \angle \varphi$$

Возвратные потери

$$RL = -20 \log(p), \text{ где } p = |\Gamma|$$

Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВн)

$$\text{КСВн} = \frac{V_{\text{макс}}}{V_{\text{мин}}} = \frac{1 + p}{1 - p}$$



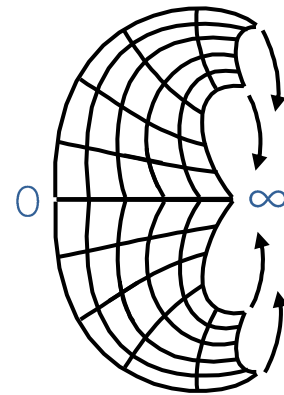
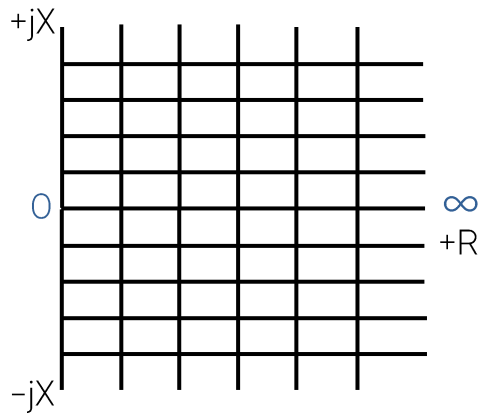
Согласование
 $Z_L = Z_0$

Полное отражение
($Z_L = \infty$, КЗ)

0	r	1
$-\infty$	Возвратные потери (RL)	0 дБ
1	КСВн	∞

ДИАГРАММА ВОЛЬПЕРТА – СМИТА

Прямолинейная плоскость импеданса



Полярная диаграмма

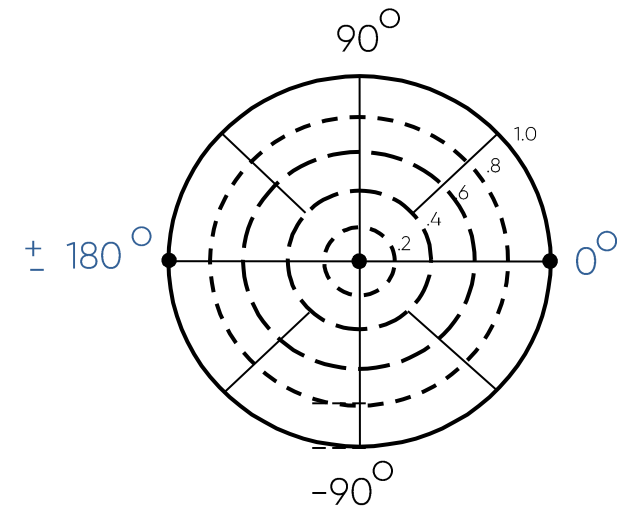
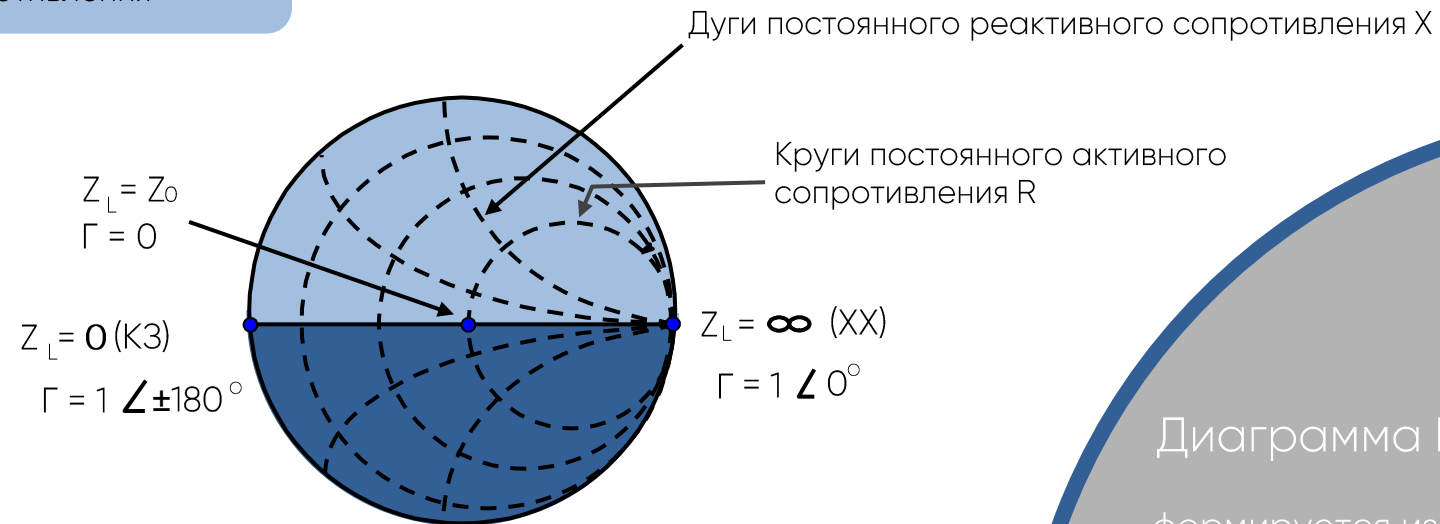


ДИАГРАММА ВОЛЬПЕРТА – СМИТА

Область индуктивного
реактивного сопротивления

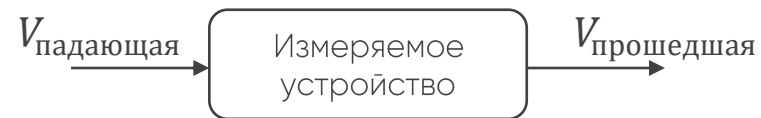


Область емкостного
реактивного сопротивления

Диаграмма Вольперта-Смита

формируется из прямолинейной
комплексной плоскости импеданса
сворачиванием области с положительным
сопротивлением в единичный круг

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ



Коэффициент передачи

$$T = \frac{V_{\text{прошедшая}}}{V_{\text{падающая}}} = \tau \angle \varphi$$

Вносимые потери (дБ)

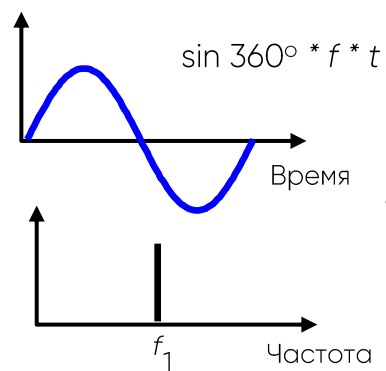
$$-20 \log \left| \frac{V_{\text{прошедшая}}}{V_{\text{падающая}}} \right| = -20 \log(\tau)$$

Усиление (дБ)

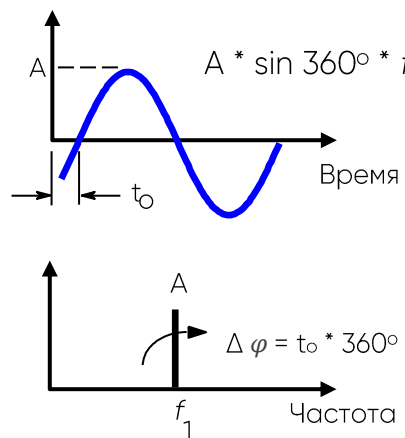
$$20 \log \left| \frac{V_{\text{прошедшая}}}{V_{\text{падающая}}} \right| = 20 \log(\tau)$$

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СХЕМЫ

Линейный режим



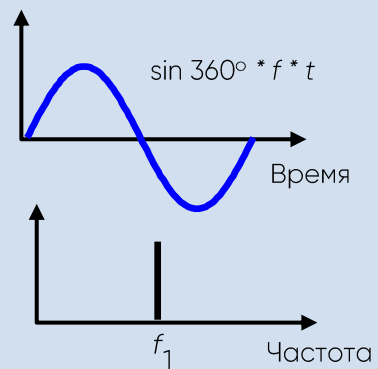
Измеряемое устройство



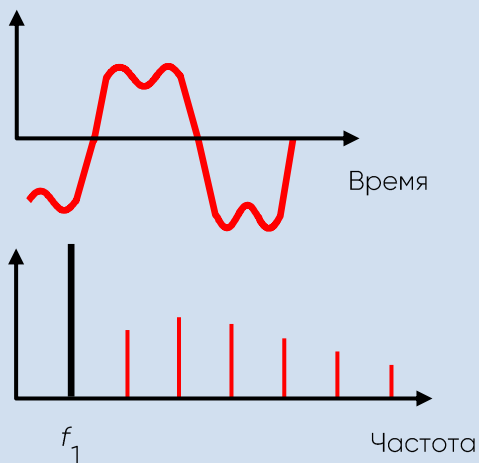
Частота на входе и выходе совпадает

Сигнал на выходе ИУ получает амплитудный и фазовый сдвиг

Нелинейный режим



Измеряемое устройство



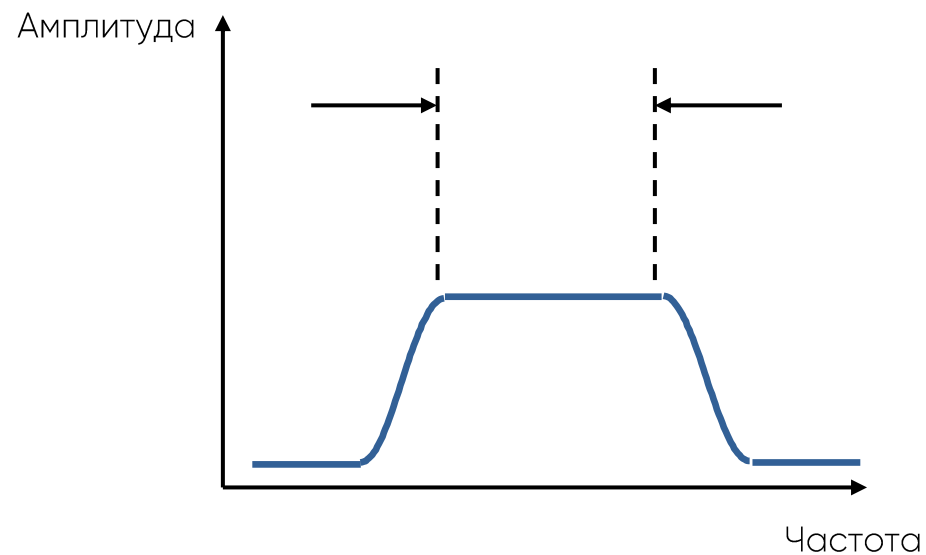
Частота на выходе может сдвигаться (например, на выходе смесителя)

Генерируются дополнительные частоты (гармоники, интермодуляционные составляющие)

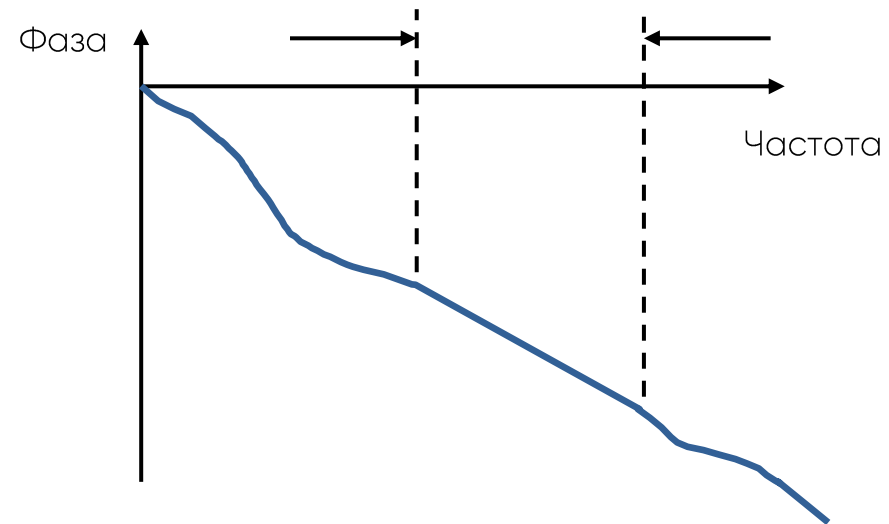
ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ БЕЗ ИСКАЖЕНИЙ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

Два ключевых условия

Постоянство амплитуды
в рабочей полосе частот

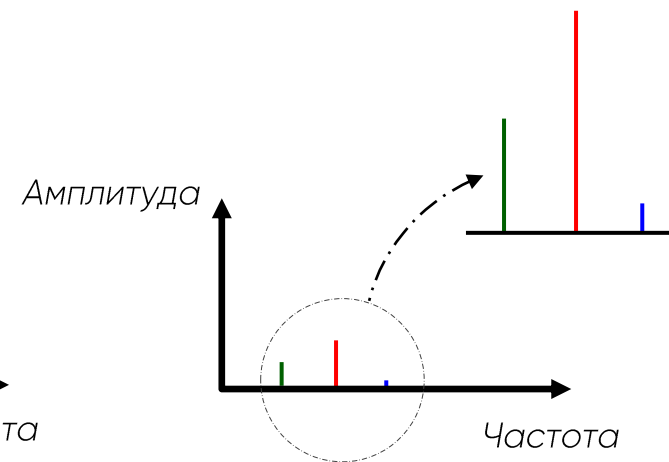
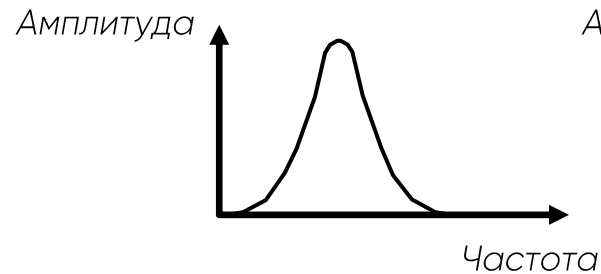
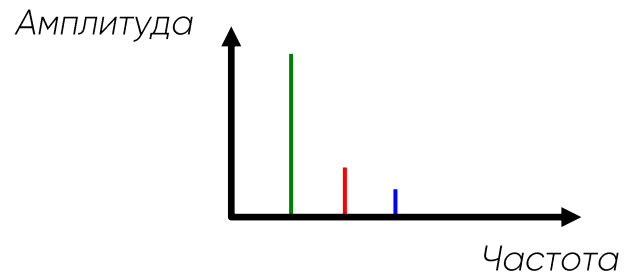
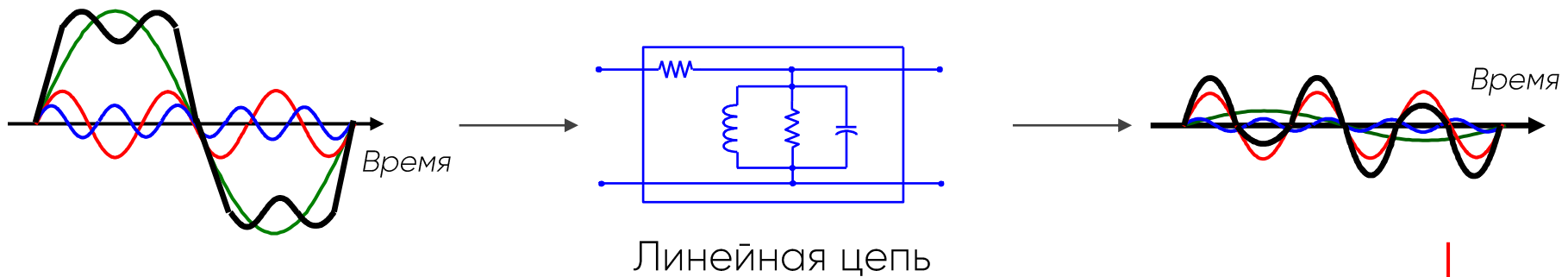


Линейность фазы
в рабочей полосе частот



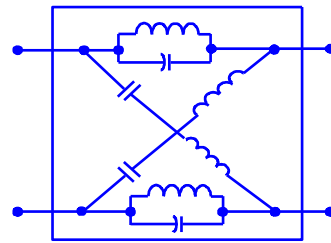
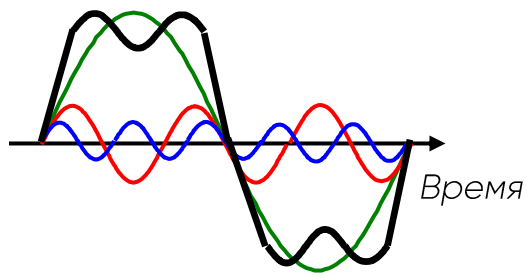
ИЗМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА

$$F(t) = \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t$$

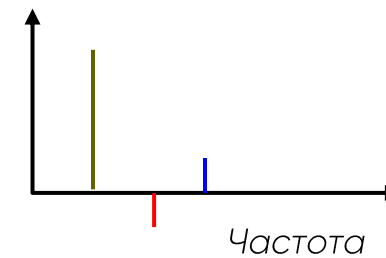
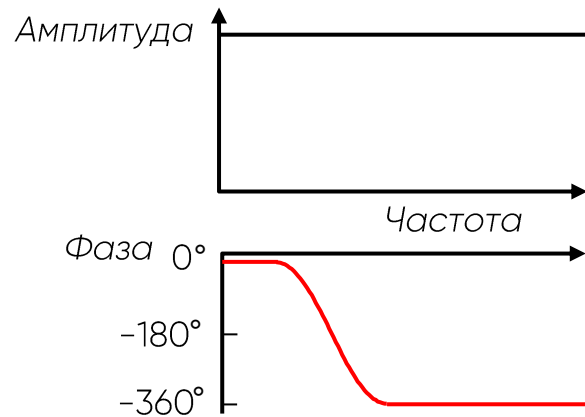
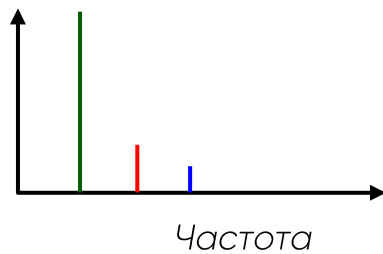
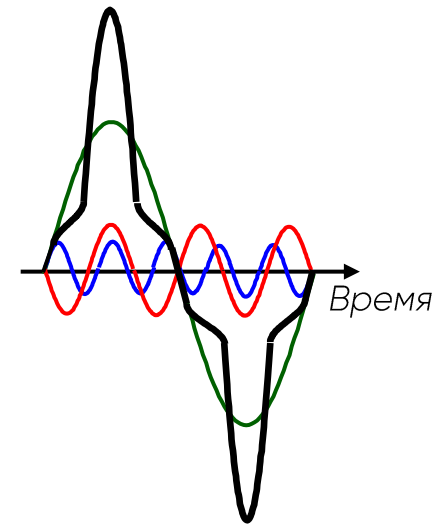


ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗЫ СИГНАЛА

$$F(t) = \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t$$



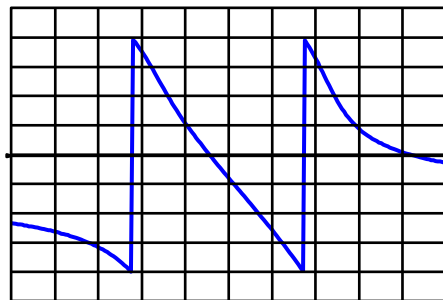
Линейная цепь



ОТКЛОНЕНИЕ ФАЗЫ ОТ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ

Фаза 45° /дел.

Отклик ВЧ
фильтра

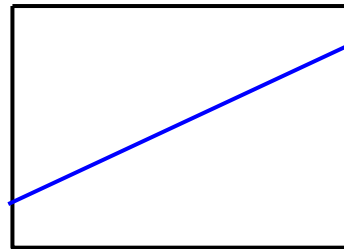


Частота

Низкое разрешение

Добавление линейной
электрической длины
(Функция электрической
задержки)

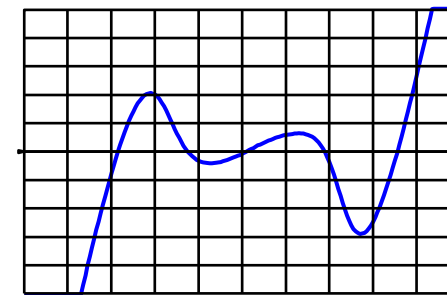
+



Частота

=

Отклонение от
линейной фазы



Частота

Высокое разрешение

Фаза 1° /дел.

Рекомендация:

Используйте электрическую задержку для компенсации линейной составляющей отклика фазы

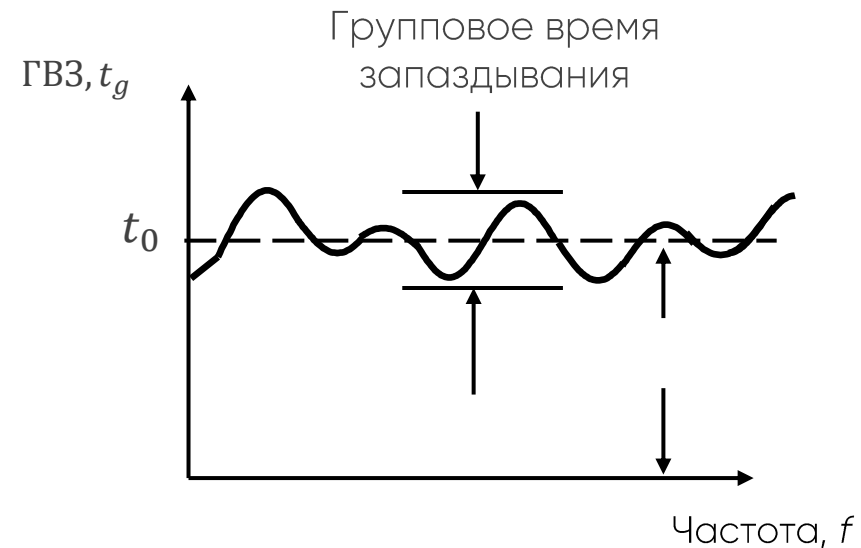
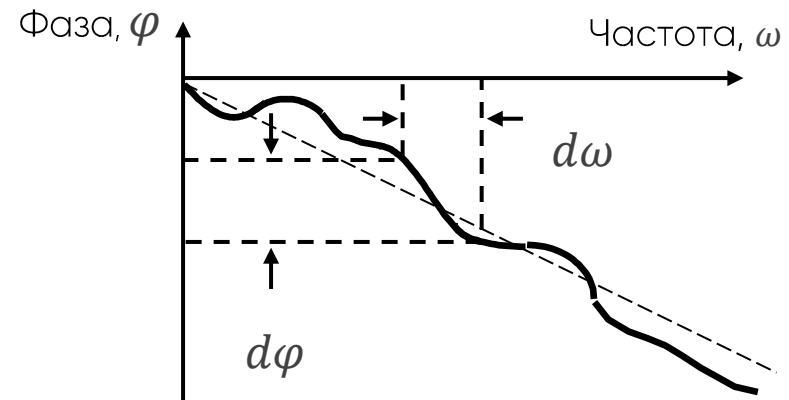
ГРУППОВОЕ ВРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ (ГВЗ)

Расчет ГВЗ

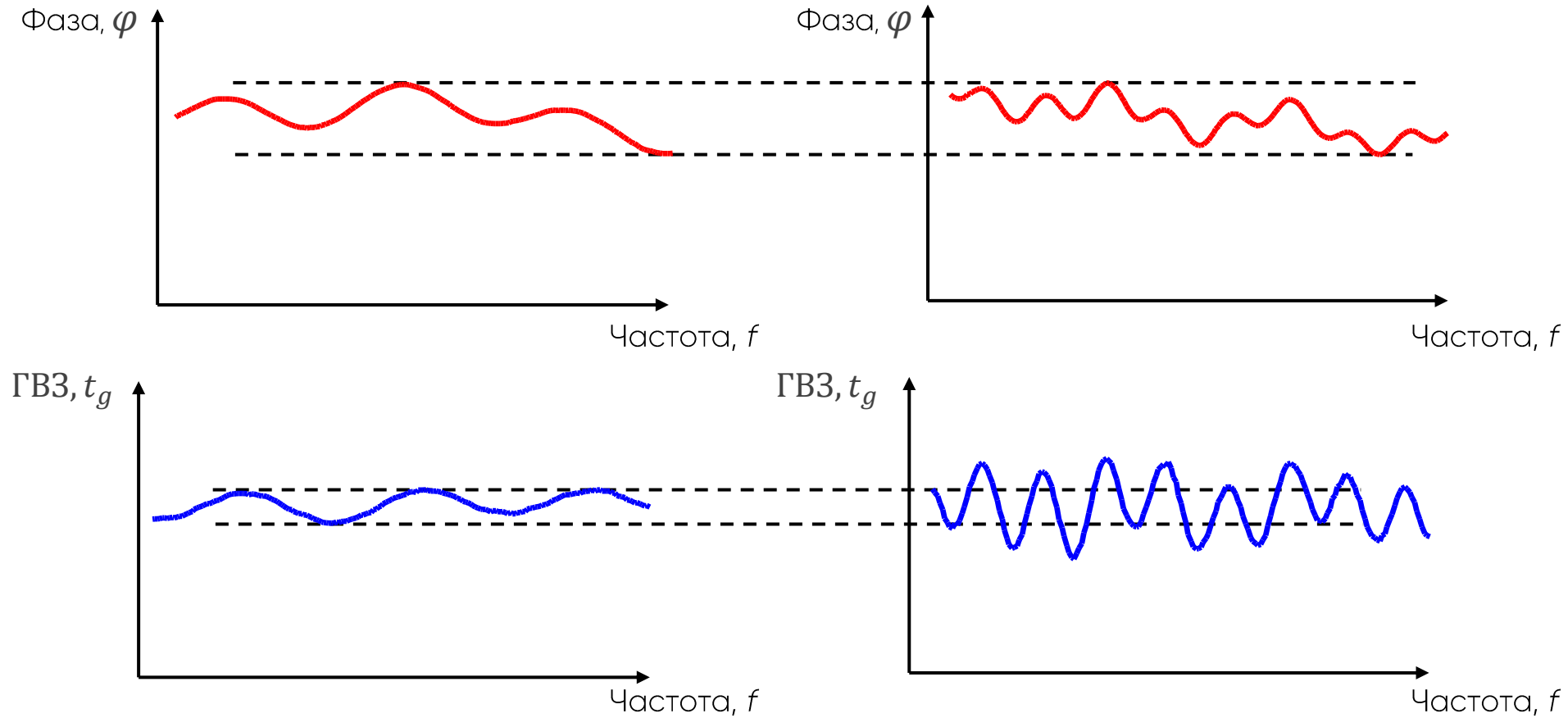
$$t_g = \frac{-d\varphi}{d\omega} = \frac{-1}{360^\circ} \cdot \frac{d\varphi}{df}$$

φ в радианах
 ω в рад / с
 f в Герцах ($\omega = 2\pi f$)

- Неравномерность ГВЗ указывает на фазовые искажения сигнала
- Среднее значение задержки указывает на электрическую длину ИУ
- Апертура измерений ($d\omega$) крайне важна



ВАЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ГВЗ



Одна и та же неравномерность фазы (пик-пик) может приводить к различному ГВЗ

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Для описания устройств используются различные параметры (H, Y, Z, S) :

- Линейная поведенческая модель для ИУ
- Требуется измерять параметры (например, напряжение и ток) в зависимости от частоты при различных параметрах источника и нагрузки (ХХ и КЗ)
- Вычисление параметров устройства из измеренных данных
- Описание работы цепи при любых параметрах источника и нагрузки

H-параметры

$$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2$$

Y-параметры

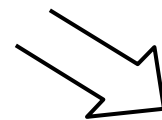
$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$$

Z-параметры

$$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2$$

$$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2$$



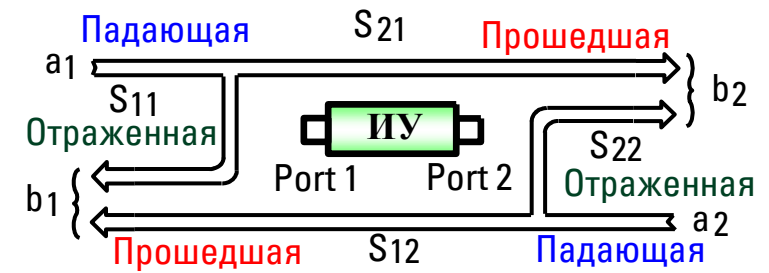
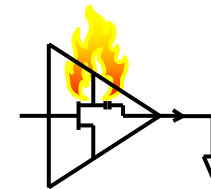
$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} \quad (\text{при КЗ на входе})$$

$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} \quad (\text{при ХХ на входе})$$

ПОЧЕМУ ИСПОЛЬЗУЮТ S-ПАРАМЕТРЫ

S-параметры

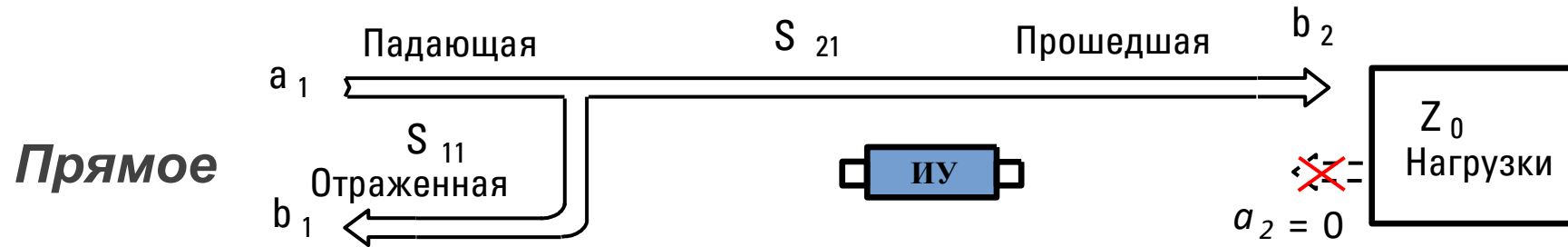
- Относительно легко могут быть определены на высоких частотах
 - Измерение параметров волн напряжения при помощи ВАЦ
 - Не требуют КЗ и ХХ (что может вывести из строя исследуемое устройство)
- Коррелируют с известными параметрами (усиление, потери, отражение ...)
- Каскадируемы
- Могут быть источником для расчета H, Y и Z-параметров
- Удобно использовать в САПР при моделировании



$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

ИЗМЕРЕНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ

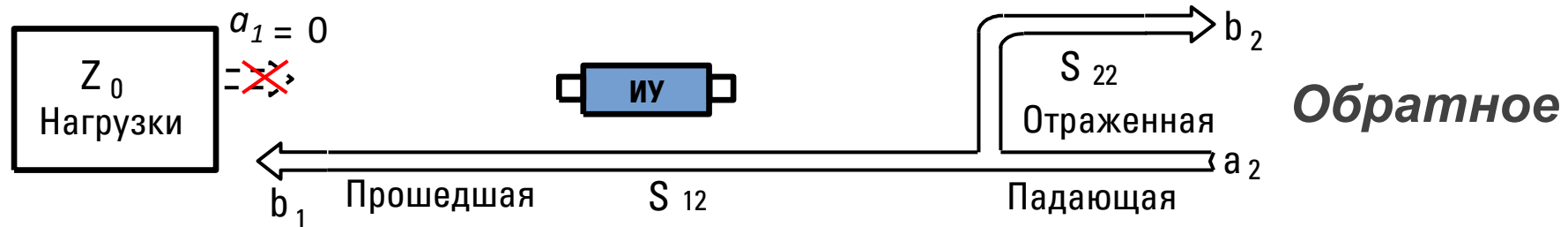


$$S_{11} = \frac{\text{Отраженн.}}{\text{Падающая}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2 = 0}$$

$$S_{21} = \frac{\text{Прошедшая}}{\text{Падающая}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2 = 0}$$

$$S_{22} = \frac{\text{Отраженн.}}{\text{Падающая}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1 = 0}$$

$$S_{12} = \frac{\text{Прошедшая}}{\text{Падающая}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1 = 0}$$



КОРРЕЛЯЦИЯ S-ПАРАМЕТРОВ И НАИБОЛЕЕ УПОТРЕБИТЕЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ

S_{11} = прямой коэффициент отражения (согласование по входу)

S_{22} = прямой коэффициент отражения (согласование по выходу)

S_{21} = прямой коэффициент передачи (усиление или потери)

S_{12} = обратный коэффициент передачи (изоляция)

ПРОГРАММА СЕМИНАРА

- Введение в теорию Векторного Анализа Цепей
- Структура Векторных Анализаторов Цепей (ВАЦ)
 - Функциональные блоки
 - Типы детектирования
 - Блоки измерения T/R и S-параметров
 - Каналы, окна, графики
- Составляющие погрешности и калибровка ВАЦ
- Обзор измерительных возможностей современных ВАЦ
- Основы автоматизации измерений

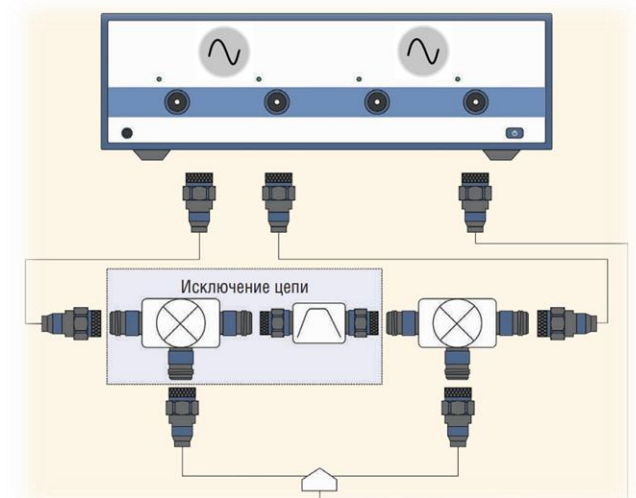
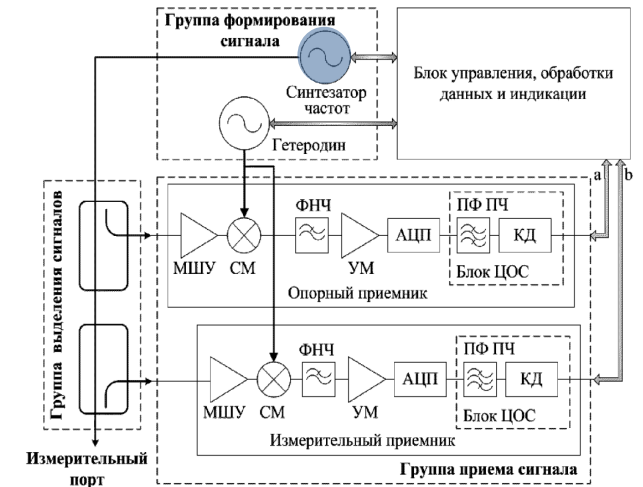


ОБЩАЯ БЛОК-СХЕМА ПАНОРАМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ



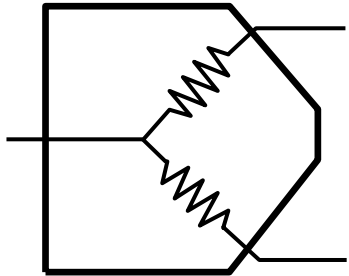
СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ

- Обеспечивает формирование зондирующего сигнала в диапазоне рабочих частот ВАЦ
- Может осуществлять перестройку по частоте или мощности
- Традиционно анализатор цепей имеет один источник
- Современный анализатор цепей может иметь второй встроенный источник и/или возможность управлять внешним источником сигнала
 - Данный функционал позволяет управлять внешним источником, выступающим в роли гетеродина при измерении устройств с преобразованием частоты частоты
- Применимо для таких измерений смесителей как ГВЗ

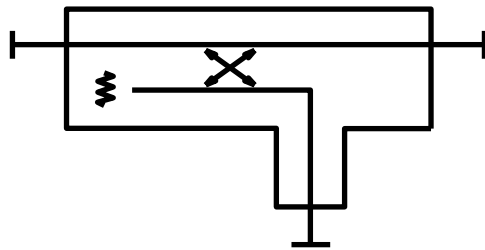


БЛОК ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

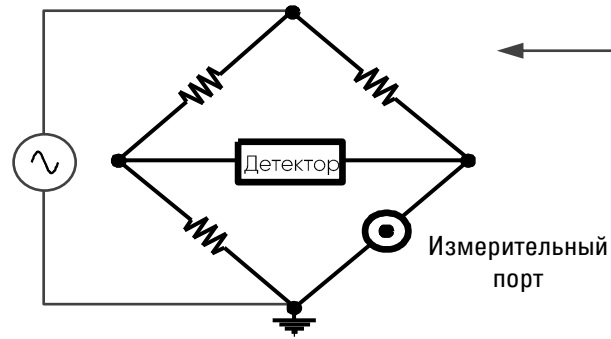
- Измерение падающей волны в качестве опорного сигнала
- Разделение падающей и отраженной волн



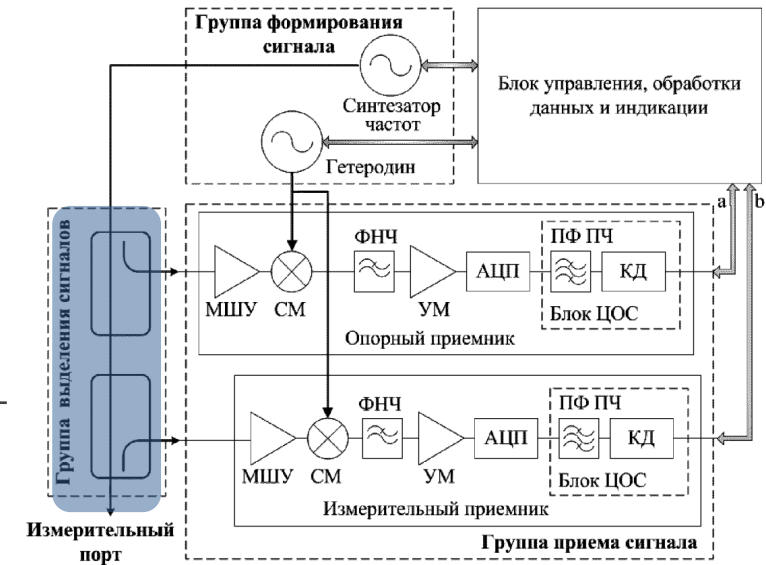
Делитель мощности
(двухрезисторная схема)



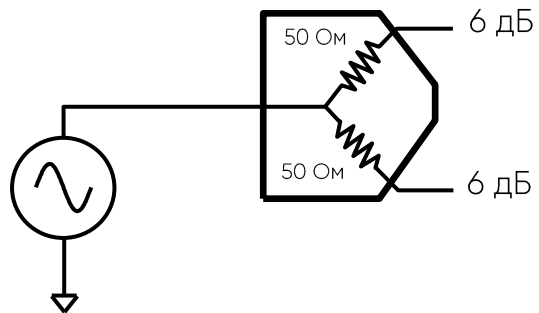
Направленный
ответвитель



Мост

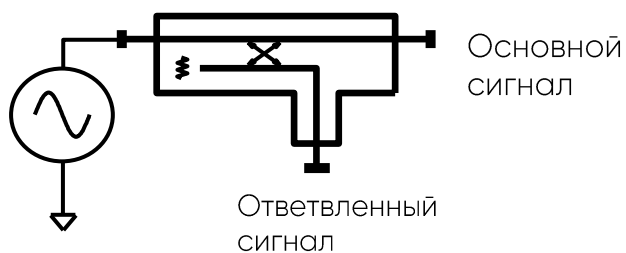


БЛОК ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ



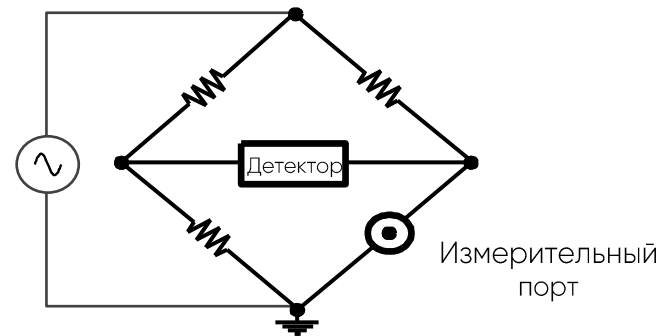
Делитель мощности

- Обычно резистивный
- Ненаправленный
- Широкополосный
- Большие потери



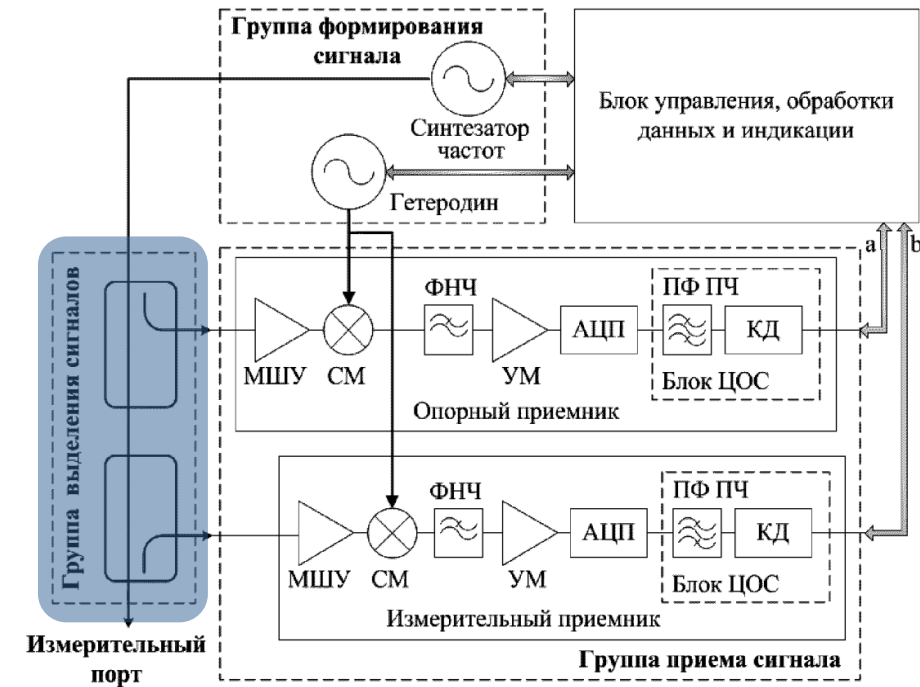
Направленный ответвитель

- Имеет направленность
- Малые потери на высоких частотах
- Хорошая развязка
- Высокие потери на низких частотах



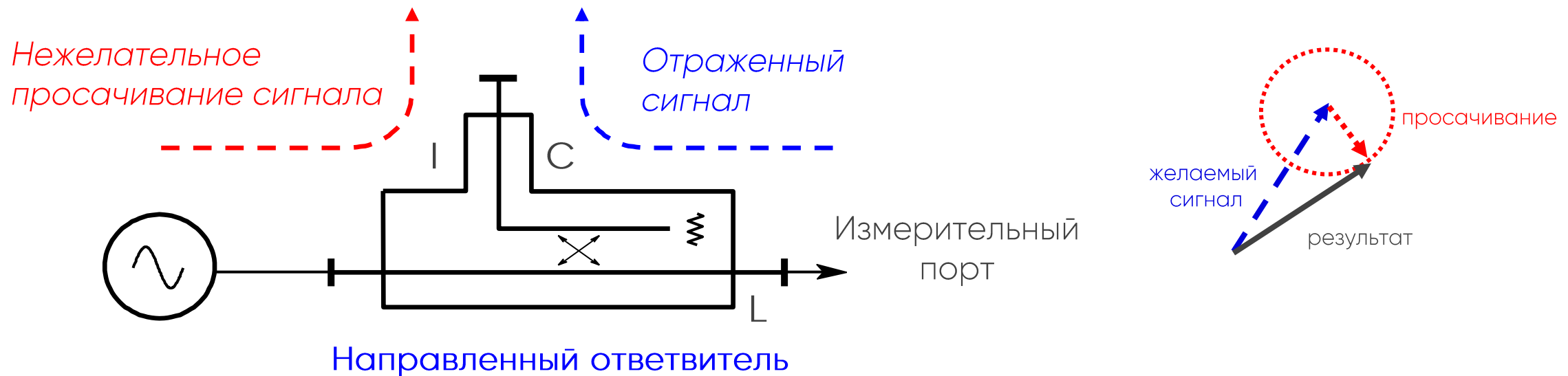
Направленный мост

- Имеет направленность
- Малые потери на низких частотах
- Большие потери на высоких частотах



НАПРАВЛЕННОСТЬ

Направленность определяет насколько хорошо ответвитель может разделять сигналы, проходящие через него в противоположных направлениях



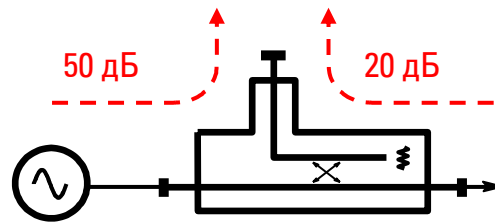
$$\text{Направленность (дБ)} = \text{Развязка (I)} - \text{Ответвление (C)} - \text{Вносимые потери (L)}$$

НАПРАВЛЕННОСТЬ

$$\text{Направленность} = \frac{\text{Ответвление (обратн)} \times \text{Потери (основное плечо)}}{\text{Развязка (обратн)}}$$

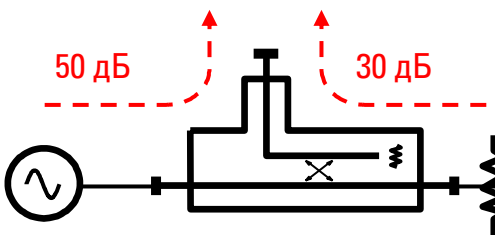
$$\text{Направленность (дБ)} = \text{Развязка (дБ)} - \text{Ответвление (дБ)} - \text{Потери (дБ)}$$

Примеры:



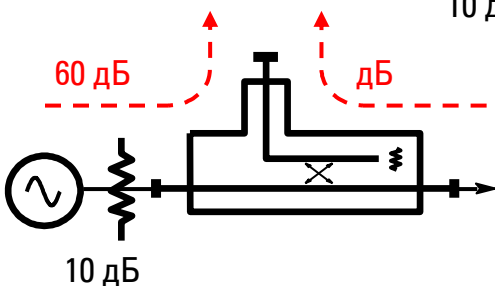
Измерительный порт

$$\text{Направленность} = 50 \text{ дБ} - 20 \text{ дБ} = 30 \text{ дБ}$$



Измерительный порт

$$\text{Направленность} = 50 \text{ дБ} - 30 \text{ дБ} - 10 \text{ дБ} = 10 \text{ дБ}$$

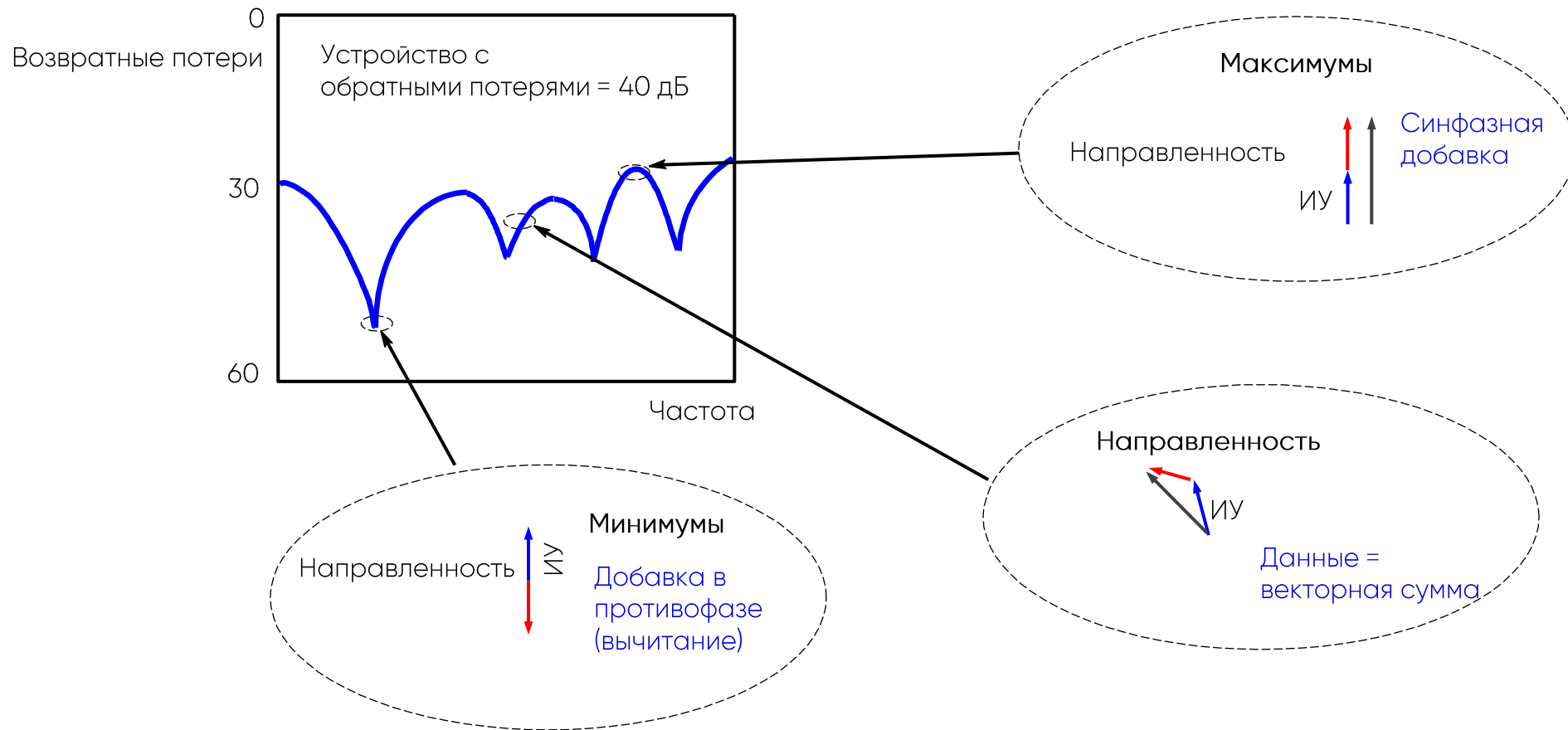


Измерительный порт

$$\text{Направленность} = 60 \text{ дБ} - 20 \text{ дБ} - 10 \text{ дБ} = 30 \text{ дБ}$$

ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ОТ НАПРАВЛЕННОСТИ

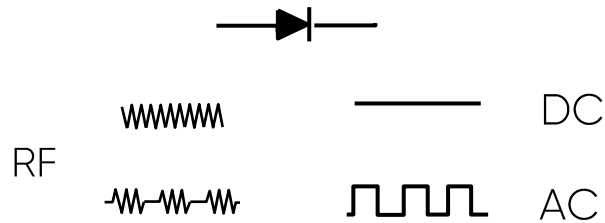
Без коррекции ошибок



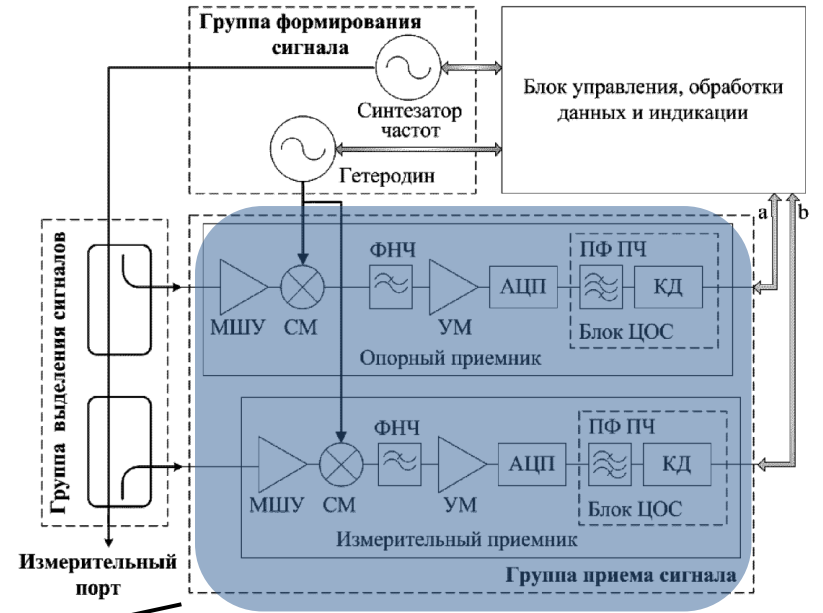
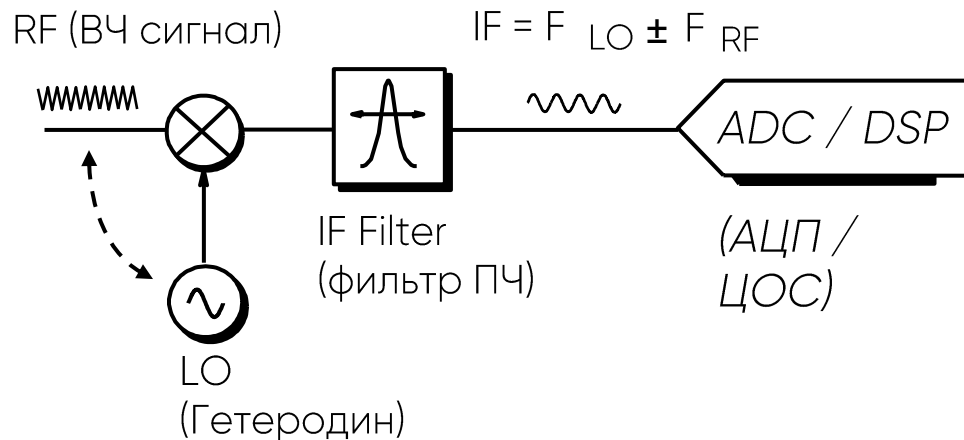
ТИПЫ ДЕТЕКТОРОВ

- Диодный детекетор

Скалярный и широкополосный
(отсутствует информация о фазе)



- Перестраиваемый приемник

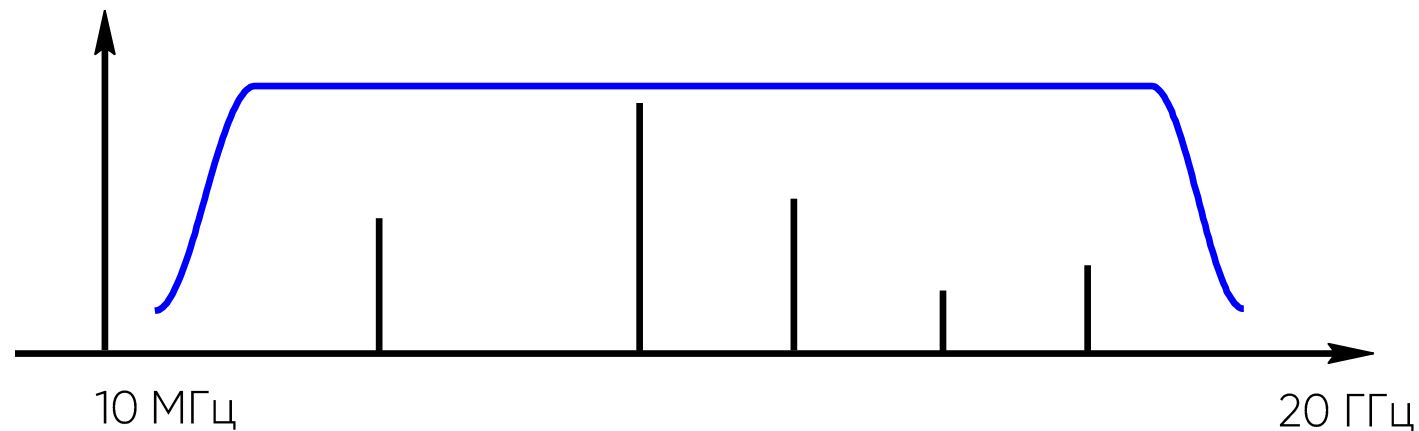
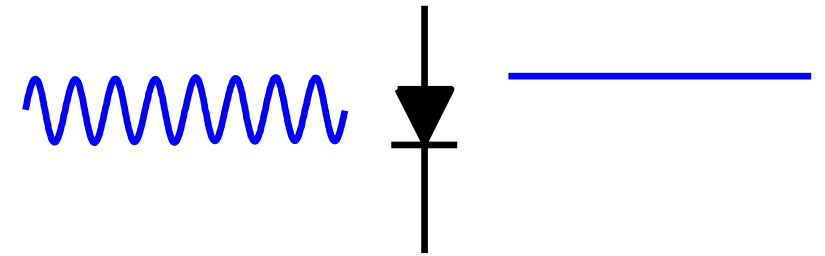


Скалярный узкополосный
(отсутствует информация о фазе)

Векторный узкополосный
(измерение амплитуды и фазы)

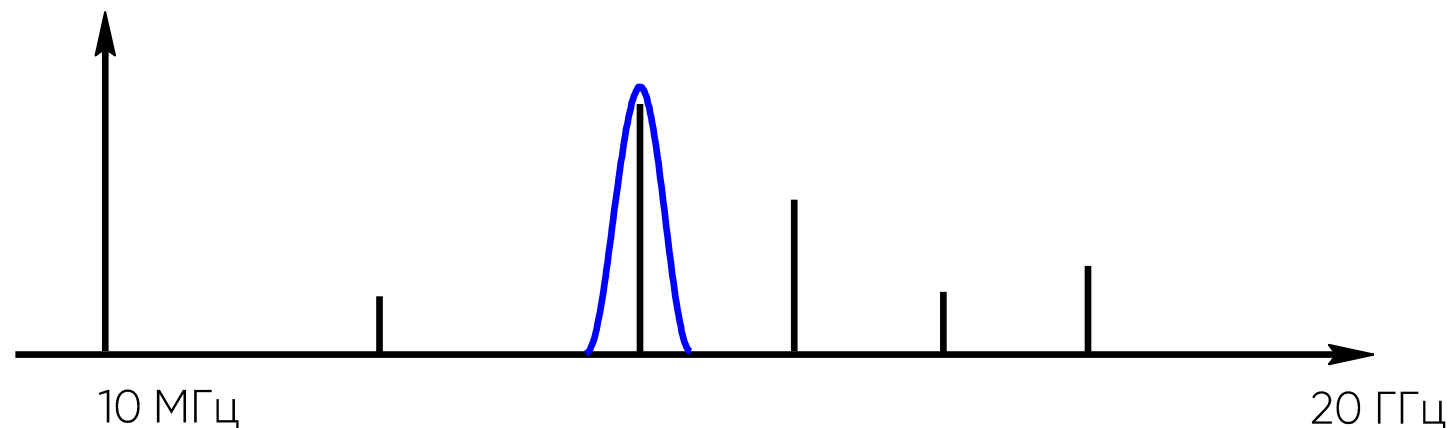
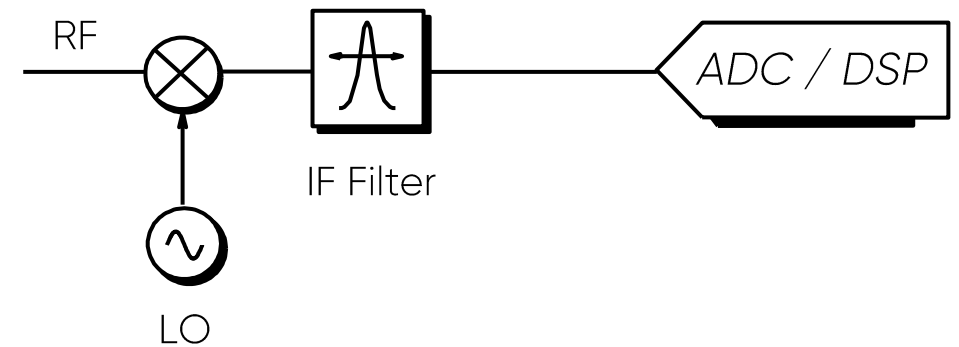
ШИРОКОПОЛОСНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ – ДИОДНЫЙ ДЕТЕКТОР

- Проще выполнить измерения в широкой полосе частот
- **Меньше стоимость** по сравнению с перестраиваемым приемником
- Удобен при измерении устройств с преобразованием частоты
- Расширение динамического диапазона при увеличении уровня входной мощности
- Средняя чувствительность (-50 дБм) и динамический диапазон (60 дБ)

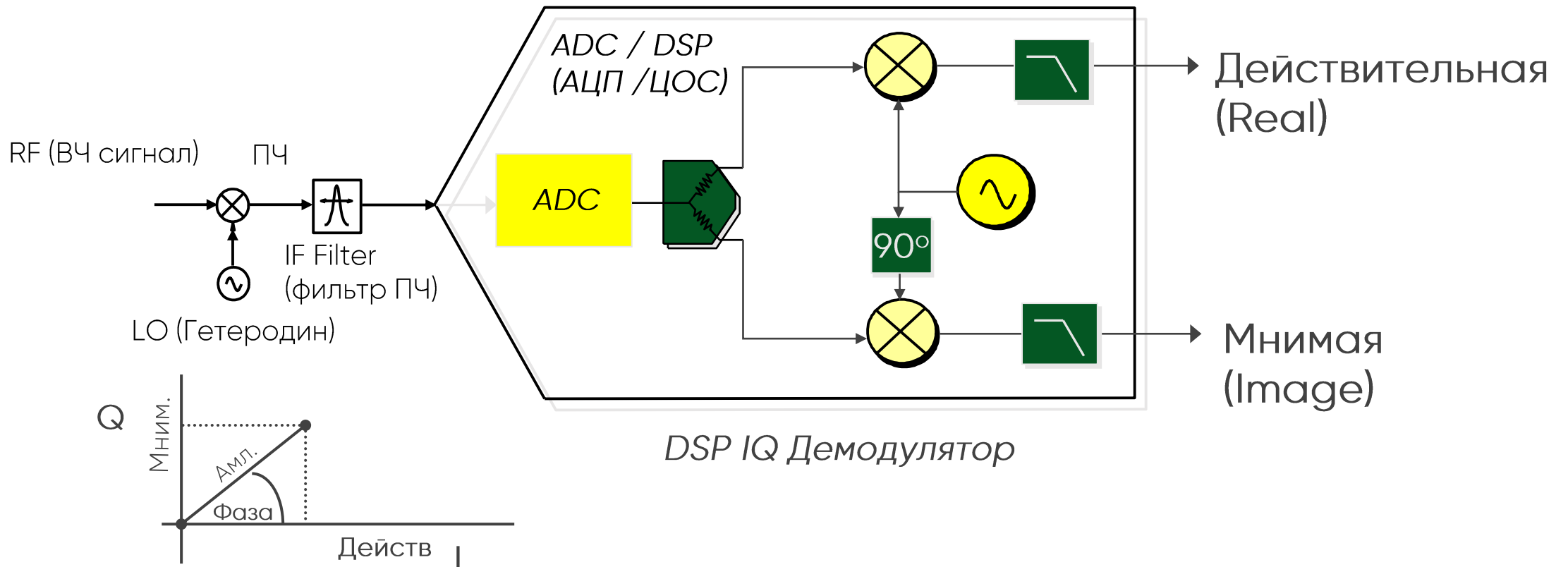


УЗКОПОЛОСНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

- Лучшая чувствительность / динамический диапазон
- Обеспечение подавления гармоник / побочных составляющих
- Увеличение динамического диапазона за счет увеличения мощности, уменьшения полосы пропускания ПЧ или усреднения
- Компромисс между уровнем шума и скоростью измерений

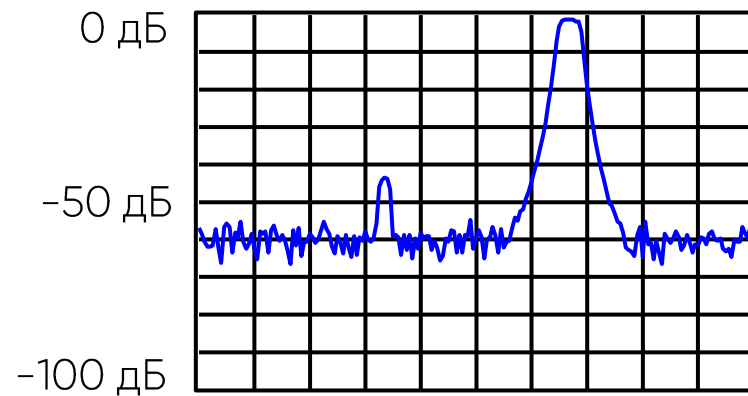


ВЕКТОРНЫЙ ПРИЁМНИК



СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

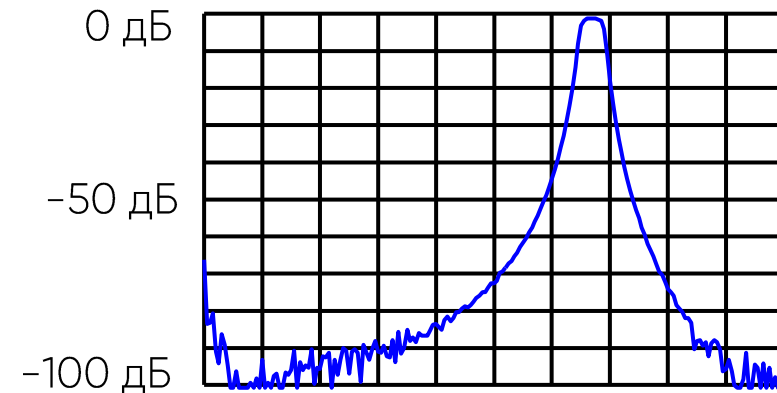
Широкополосное детектирование
(диодное)



-60 дБм Чувствительность

- Выше уровень собственных шумов
- Ложные отклики сигналов

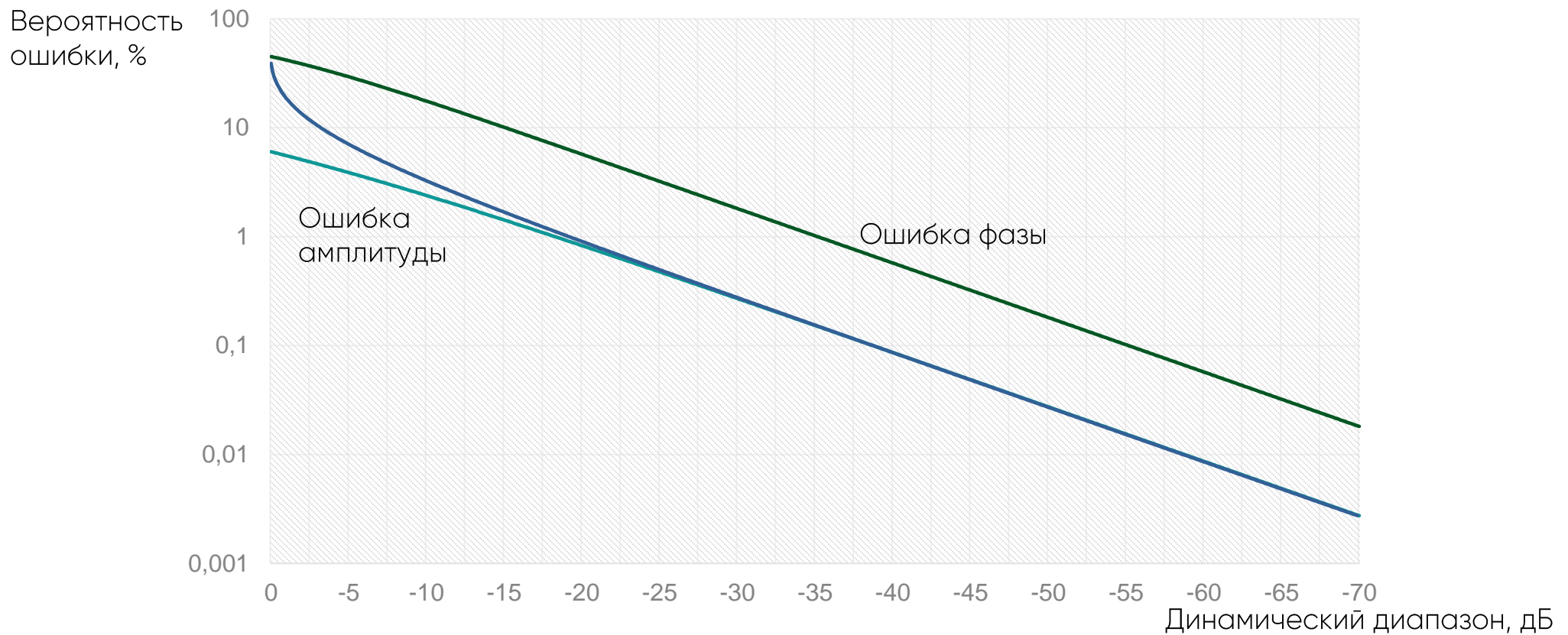
Узкополосное детектирование
(перестраиваемый приемник)



< -100 дБм Чувствительность

- Высокий динамический диапазон
- Избирательность

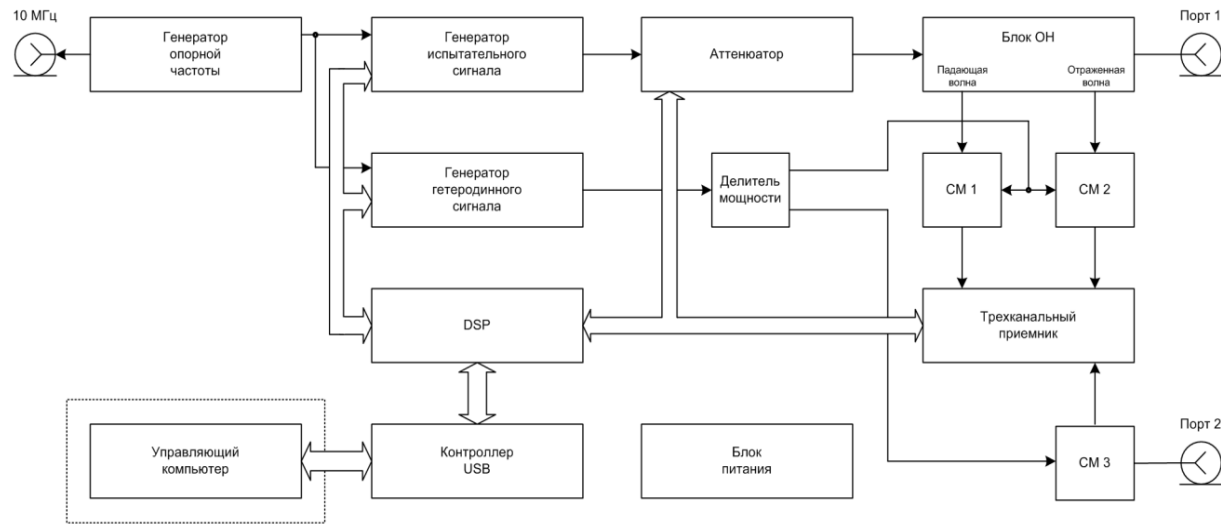
ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН И ТОЧНОСТЬ



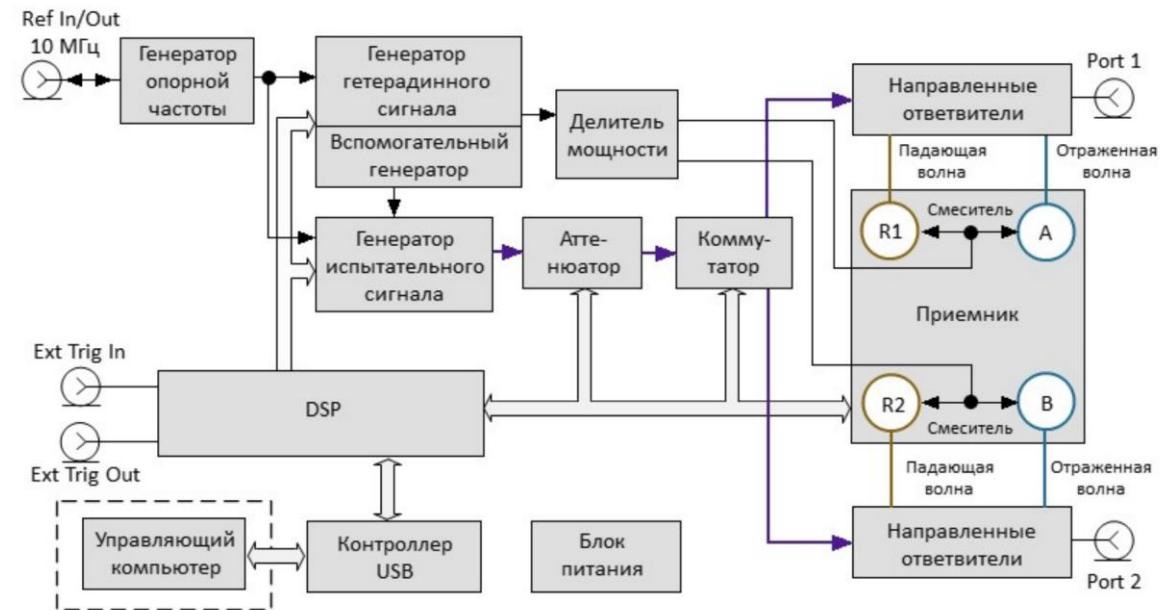
Ширина динамического диапазона очень важна для повышения точности измерений

БЛОКИ ИЗМЕРЕНИЯ T/R И S-ПАРАМЕТРОВ

«TR5048», «TR7530» и «Обзор TR1300/1»



«S50x5», «S50180», «S50x44»



Блок измерения параметров передачи и отражения (T/R):

- Сигнал подается только с одного порта
- Второй порт выступает только приемником

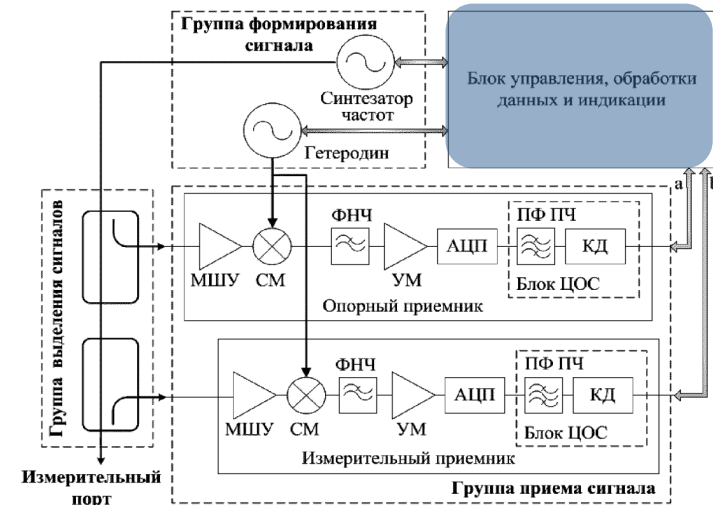
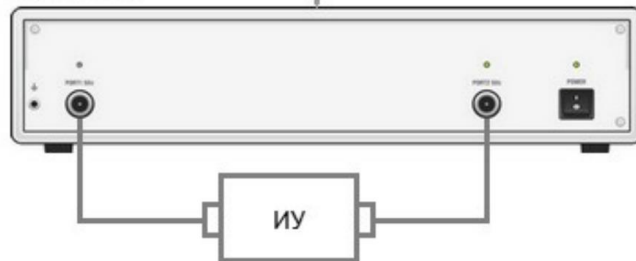
Блок измерения S-параметров:

- Сигнал подается с каждого порта

БЛОК ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И ИНДИКАЦИИ



Аппаратная часть анализатора



- Аппаратная часть производит РЧ измерения параметров ИУ и выполняет первичную обработку результатов измерений
- Программа управления контролирует работу анализатора и выполняет математическую обработку и отображение результатов измерений:
 - Маркеры
 - Линии пределов
 - Допусковый контроль
 - Форматы трасс
 - Преобразование во временную область

КАНАЛЫ, ОКНА, ГРАФИКИ

Канал 1
Перестройка частоты
широкой полосы

S21 S11

Канал 2
Перестройка частоты
в широкой полосе

S21 S21

Канал 3
Перестройка по мощности

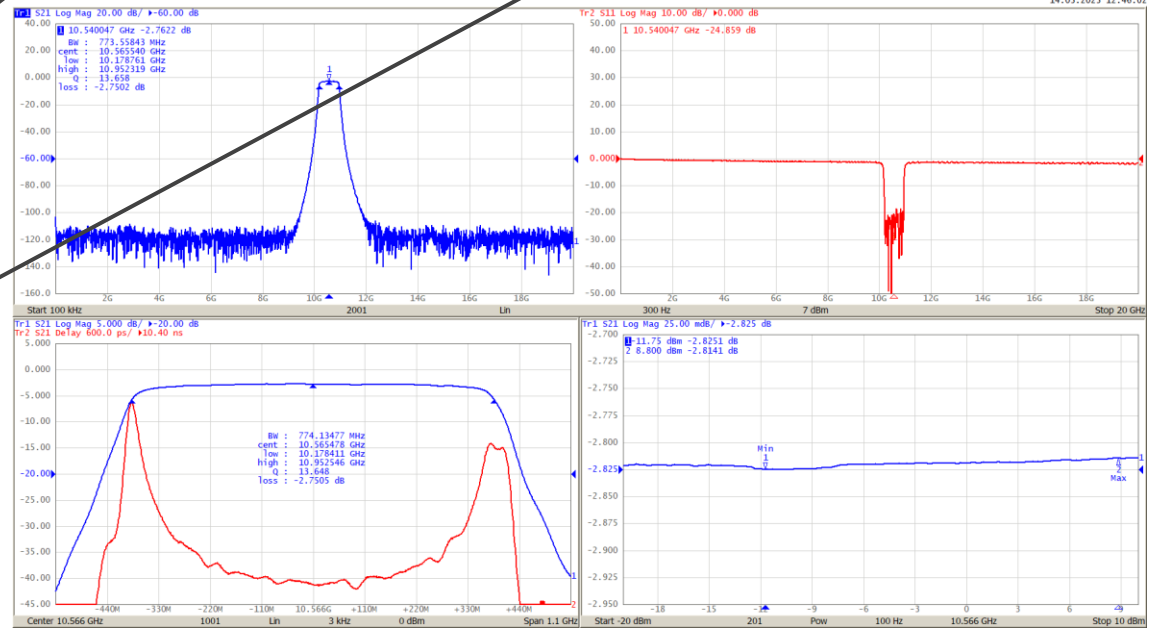
S21

Окно

Окно

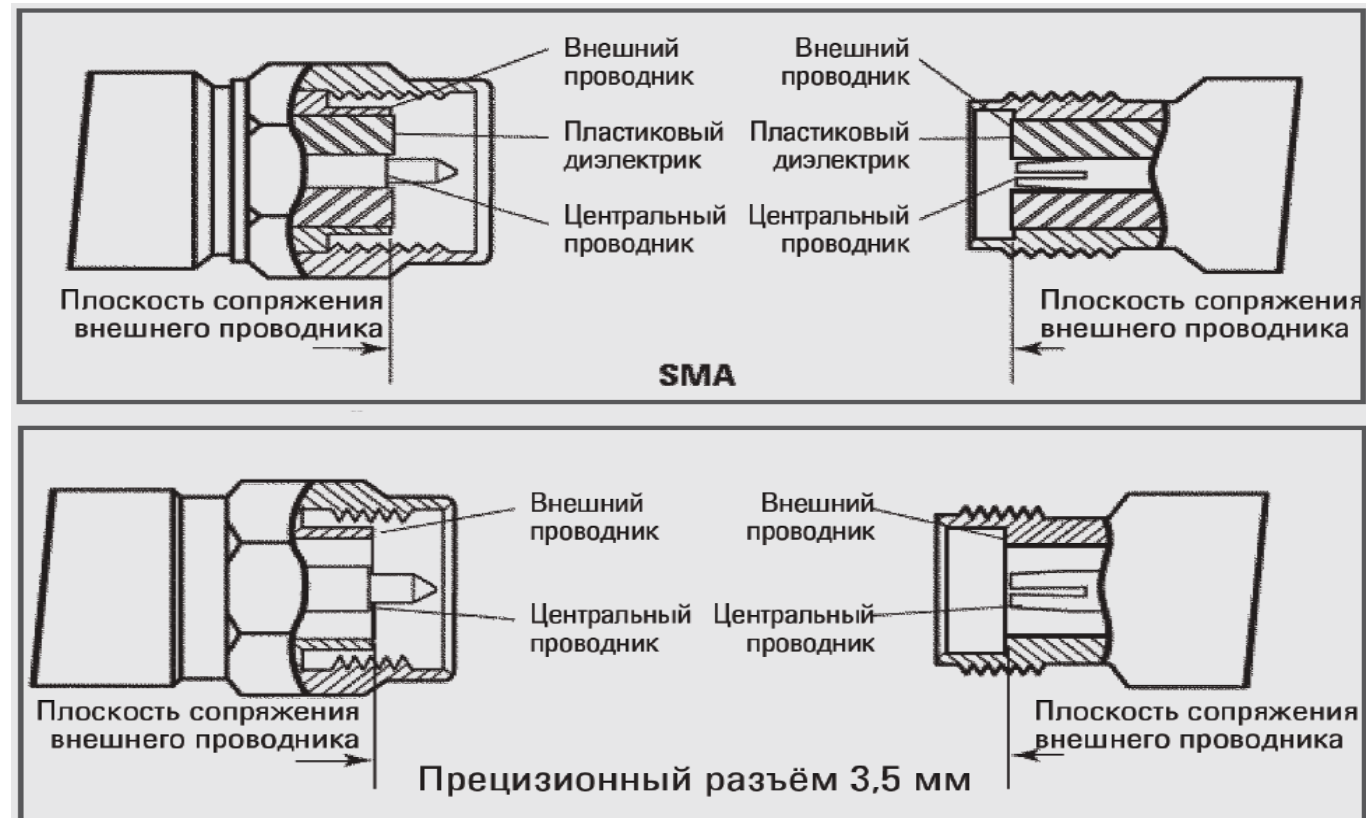
Окно

Окно



СВЧ КОАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

Устройство, позволяющее осуществлять соединение и разъединение с соответствующим сопрягаемым компонентом



СВЧ КОАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

Тип	Граничная частота, ГГц	Сечение канала, мм	Совместимость
Тип N 50 Ом	18	7/3.04	-
APC-7 или 7 мм	18	7/3.04	-
SMA или 4.14 мм	22	4.5/1.24	3.5 мм, 2.92 мм
3.5 мм	34	3.5/1.52	SMA, 2.92 мм
2.92 мм или тип K	44	2.92/1.27	SMA, 3.5 мм
2.4 мм	52	2.4/1.04	1.85 мм
1.85 мм	70	1.85/0.8	2.4 мм
1.0 мм	110	1.0/0.43	-

СВЧ КОАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

Аналоги СВЧ соединителей по ГОСТ и IEEE

ГОСТ 13317-80 ГОСТ РВ 51914-2002	IEEE STD 287
Тип III «Экспертиза»	Тип N
Тип IX «Град»вариант 1 и 3	Тип SMA Тип 3,5 мм

Различие шага резьбы (метрическая и дюймовая) и геометрических размеров (отличие до 0,4 мм)

Существует возможность, но не рекомендуется, соединить следующие комбинации соединителей, если для соединения потребуется не более 3-4 витков резьбы:

ГОСТ 13317-80 ГОСТ РВ 51914-2002	IEEE STD 287
Тип III вилка	Тип N розетка
Тип IX розетка	Тип SMA, тип 3,5 мм, тип 2,92 мм вилка

СВЧ СОЕДИНИТЕЛИ: ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Осмотр

- Правильное положение центрального проводника
- Отсутствие грязи
- Отсутствие механических повреждений и царапин
- Осмотр необходимо проводить:
 - перед соединением
 - после разъединения

Сломанный лепесток
соединителя с
щелевым центральным
проводником



Гнутый центральный
проводник



Грязь на резьбе



СВЧ СОЕДИНИТЕЛИ: КОНТРОЛЬ ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ

Что измерять:

- Соединители калибровочных мер
- Все соединители при подготовке метрологически значимых измерений

Когда измерять:

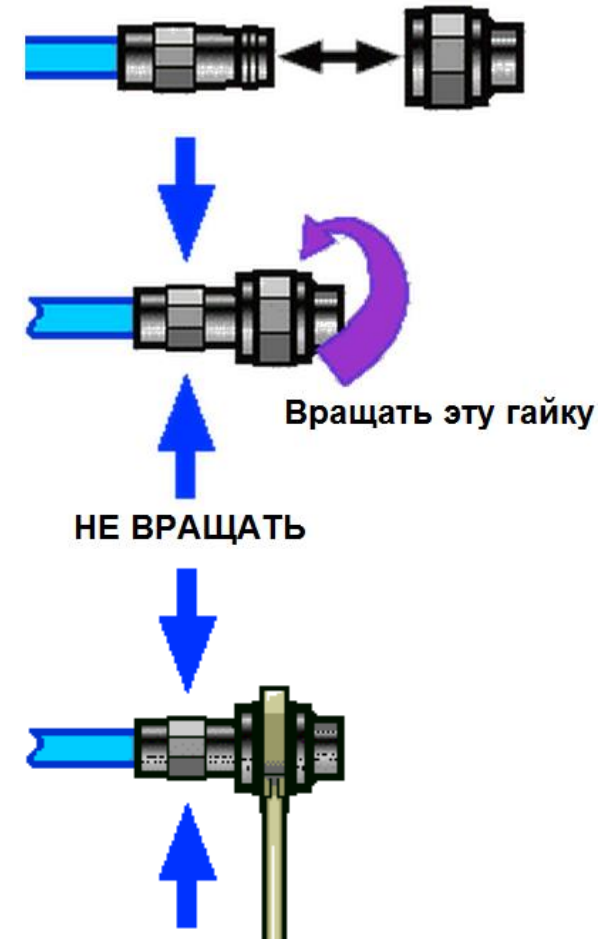
- При использовании соединителя в первый раз
- Если есть подозрения в неисправности соединителя
- После 100 циклов соединения



Комплект для измерения
коаксиальных соединителей (КИСК)

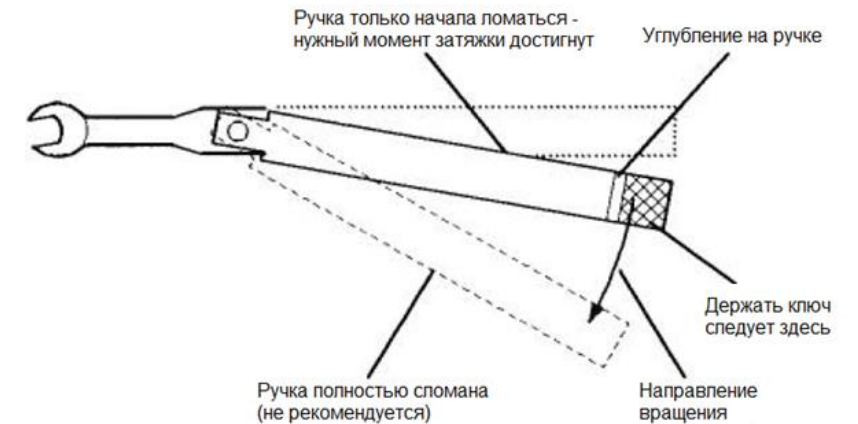
СВЧ СОЕДИНИТЕЛИ: СОЧЛЕНЕНИЕ

1. Расположите соединители соосно друг на против друга
2. Аккуратно выполните сочленение:
 - Если вы почувствуете сопротивление, разъедините соединители и попробуйте еще раз
 - Никогда не используйте силу, даже при работе с соединителем типа N
3. Накрутите гайку вилки («папа») на розетку («маму»), чтобы зафиксировать соединение:
 - Необходимо вращать гайку соединителя «вилка»
 - Если вращать сами соединители или кабели, то центральные проводники будут вращаться друг относительно друга, что приведет к их повреждению
4. Используйте ключ с нормируемым усилием затяга для завершения сочленения



СВЧ СОЕДИНИТЕЛИ: СОЧЛЕНЕНИЕ

- Следует держать динамометрический ключ за конец рукоятки
- Нужный момент затяжки достигается в момент излома рукоятки
- Если продолжить вращать ключ, вы рискуете затянуть гайку слишком сильно, что может привести к повреждению СВЧ соединителей
- При работе используйте второй ключ, чтобы не допустить вращение соединителя вместе с гайкой



Тип соединителя	Момент, Н * см
Тип N, тип III	135
SMA	56
3.5 мм, 2.92 мм, 2.4 мм, 1.85 мм	90
3.5 мм (вилка) -> SMA (розетка)	90
SMA (вилка) -> 3.5 мм (розетка)	56

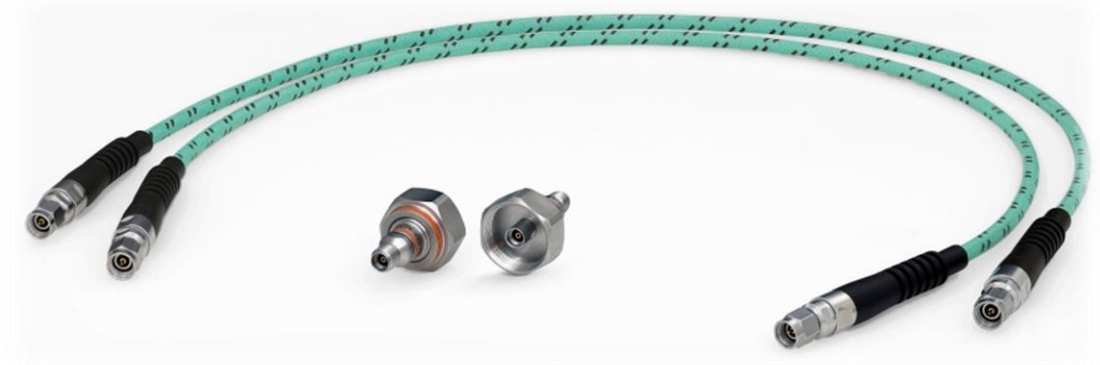
КАБЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ

Основные параметры:

- Тип соединителей
- Частотный диапазон
- Номинальное волновое сопротивление
- Вносимые потери
- Возвратные потери или КСВН
- Эффективность экранирования
- Температурный диапазон
- Ресурс по числу циклов соединений или изгибов
- Геометрические размеры и допуски

Для фазостабильных кабелей:

- Стабильность фазы при изгибе
- Стабильность амплитуды при изгибе



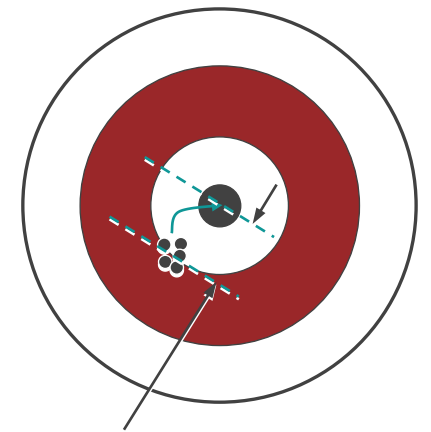
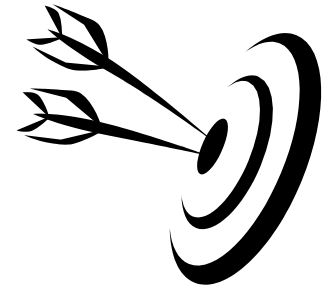
ПРОГРАММА СЕМИНАРА

- Введение в теорию Векторного Анализа Цепей
- Структура Векторных Анализаторов Цепей (ВАЦ)
- Составляющие погрешности и калибровка ВАЦ
 - Необходимость калибровки
 - Модель погрешности измерений
 - Типы калибровок
- Обзор измерительных возможностей современных ВАЦ
- Основы автоматизации измерений



НЕОБХОДИМОСТЬ КАЛИБРОВКИ

- Почему необходимо проводить калибровку?
 - Невозможно создать идеальное измерительное оборудование
 - Оборудование не требующее калибровки было бы крайне сложно разработать и оно было бы крайне дорогостоящим
- Как получить наивысшую точность проводимых измерений?
 - Необходимо провести калибровку с векторной коррекцией
 - Данная калибровка отличается от процедуры заводской калибровки
- Что дает калибровка?
 - Калибровка устраняет наибольшую составляющую погрешности – систематическую погрешность
 - Обеспечивает наиболее точное представление о характеристиках испытуемого устройства



Систематическая ошибка

МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Систематическая погрешность



- Возникает из-за несовершенства анализатора
- Инвариантна во времени
- Наибольший источник ошибок

Случайная погрешность



- Изменяется во времени
- Причины: шум, повторяемость характеристик переключателей, соединителей

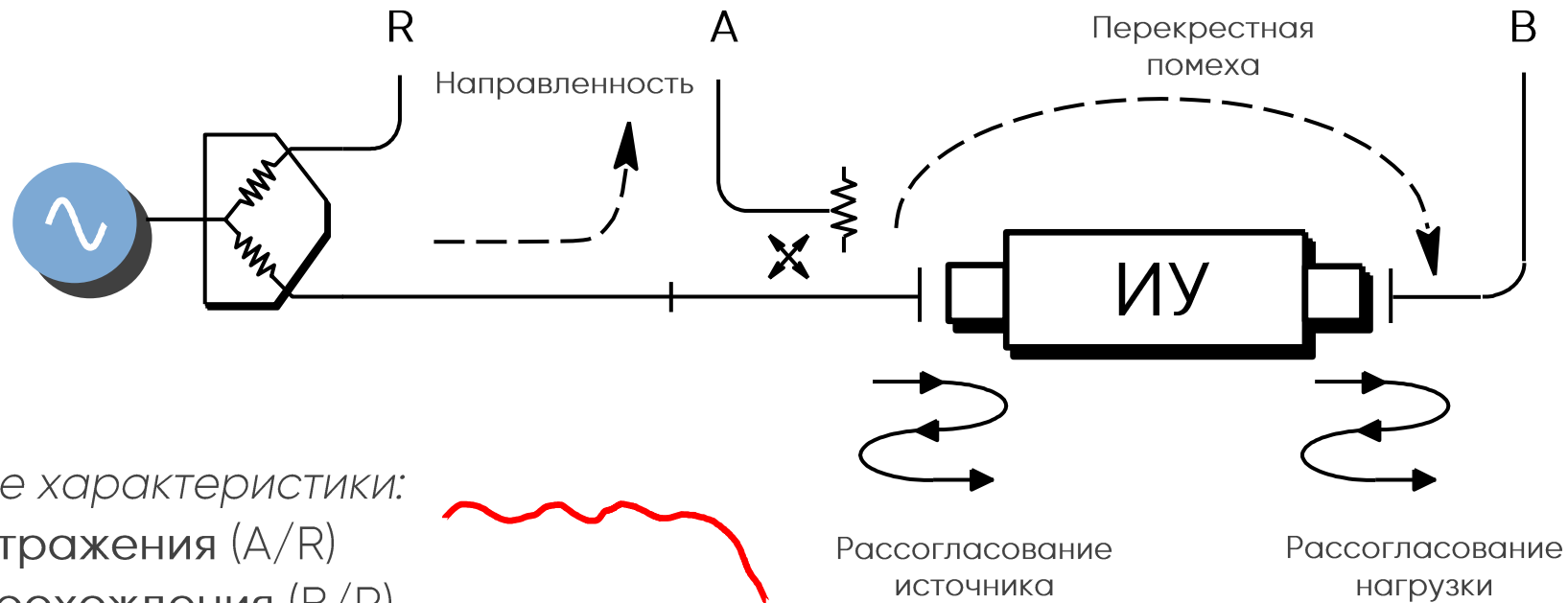
Инструментальный дрейф



- Вызван изменением характеристик измерительной системы после калибровки
- Чаще всего вызван температурной зависимостью параметров системы



СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ



6 составляющих погрешности при прямом прохождении сигнала

+

6 составляющих погрешности при обратном прохождении сигнала

=

Модель из 12 составляющих при измерении 2-портовых устройств

ТИПЫ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК

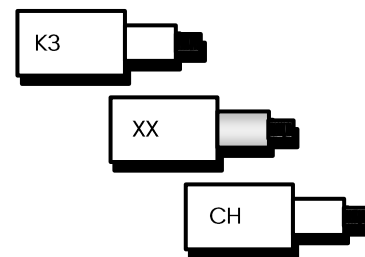
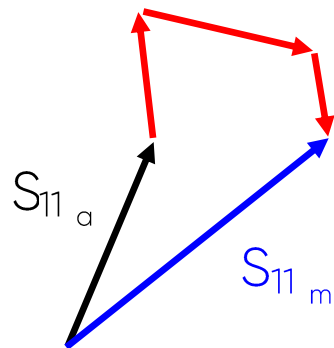
- Нормализация

- Проста в выполнении
- Корректирует только частотные характеристики
- Низкая точность



- Векторная коррекция

- Требуется больше калибровочных мер
- Требуется использования анализатора, способного измерять фазу
- Учитывает все основные составляющие систематической погрешности



ВЕКТОРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК

- Векторная коррекция ошибок
 - Это процесс определения систематических ошибок
 - Это измерения эталонных стандартов (мер) с **известными** параметрами
 - Удаляет эффекты ошибок из последующих измерений
- Эталонные меры
 - Могут быть электронными или механическими
 - Чаще всего используются меры КЗ, ХХ, согласованная нагрузка и проходная мера, но могут быть использованы и меры с комплексным импедансом

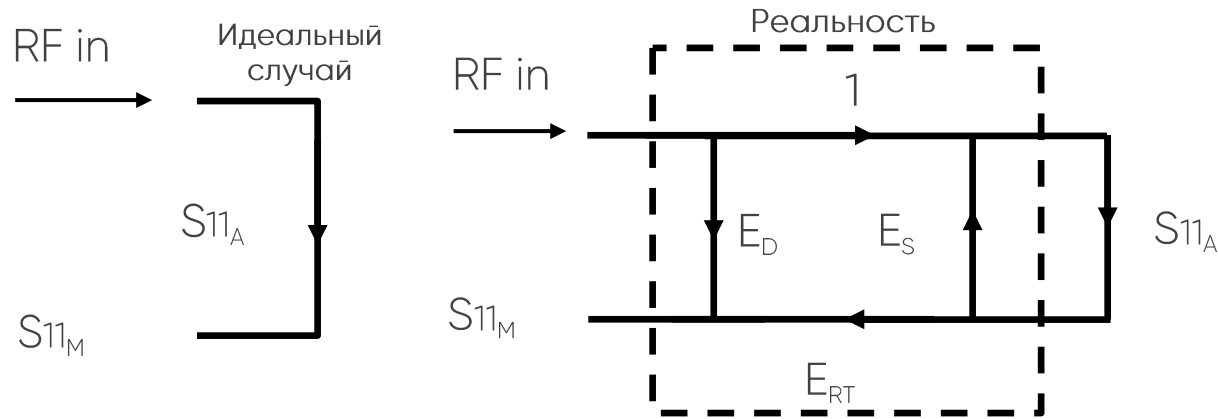


ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗВЕСТНЫХ СТАНДАРТОВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ

- Однопортовая калибровка (*измерение отражения*)
 - Устраняется только три систематические ошибки
 - направленность, согласование источника и АЧХ тракта отраженного сигнал
- Полная двухпортовая калибровка (*измерение отражения и прохождения*)
 - Устраняется 12 систематических ошибок
 - Обычно требуется до 12 измерений 4-х известных стандартов (SOLT калибровка)
- Стандарты определены в файле-описании калибровочного комплекта
 - Анализатор цепей содержит файлы с описанием калибровочных комплектов
 - Описание калибровочного комплекта должно совпадать с используемым калибровочным комплектом
 - Также могут быть добавлены пользовательские наборы в виде полиномиального описания или в виде таблицы S-параметров



ОДНОПОРТОВАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ



E_D = направленность

E_{RT} = частотная неравномерность отражения

E_S = согласование источника

S_{11M} = измеренное значение

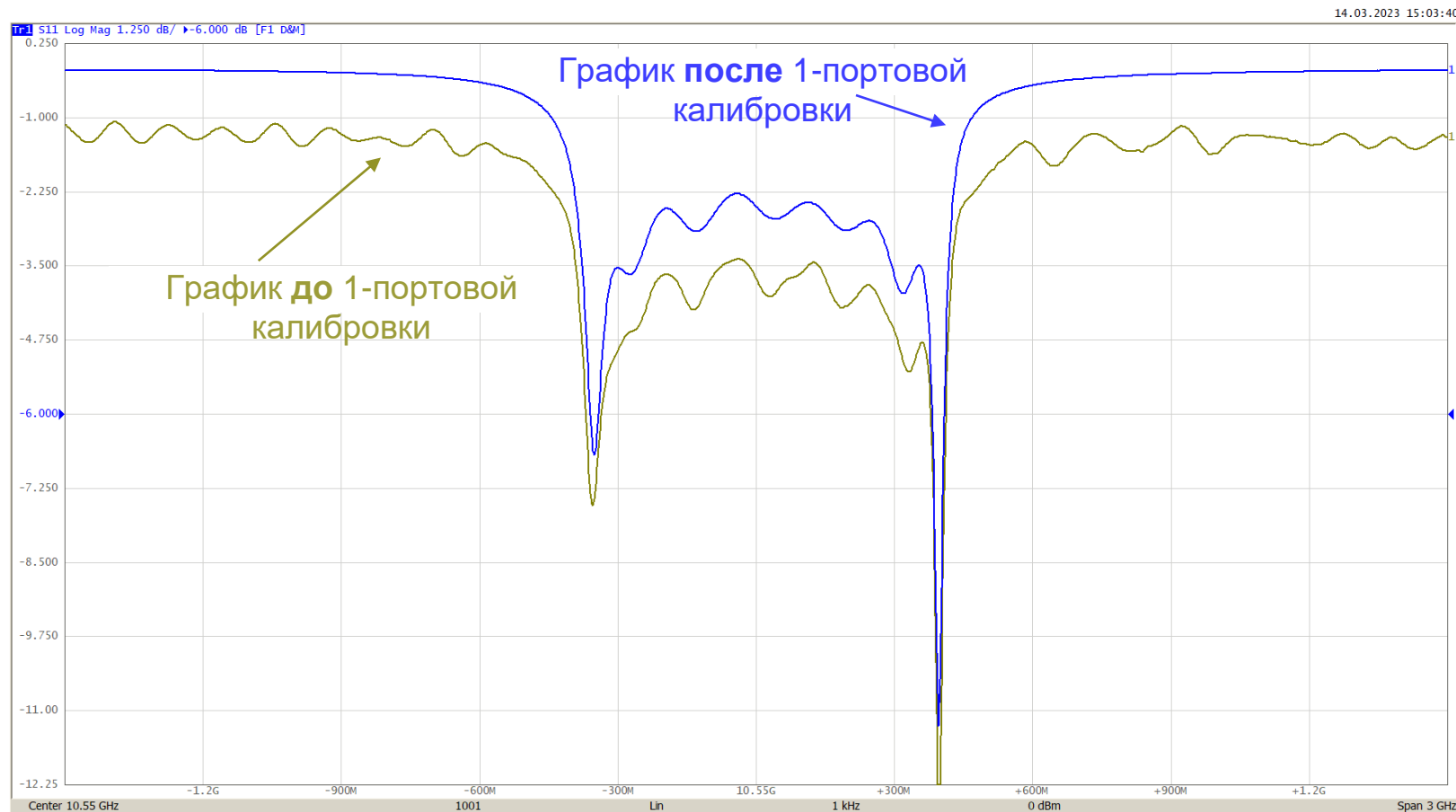
S_{11A} = истинное значение

$$S_{11M} = E_D + E_{RT} \left[\frac{S_{11A}}{1 - E_S S_{11A}} \right]$$

Для получения значения ошибки необходимо измерить три стандарта и после этого решить систему из трех уравнений с тремя неизвестными

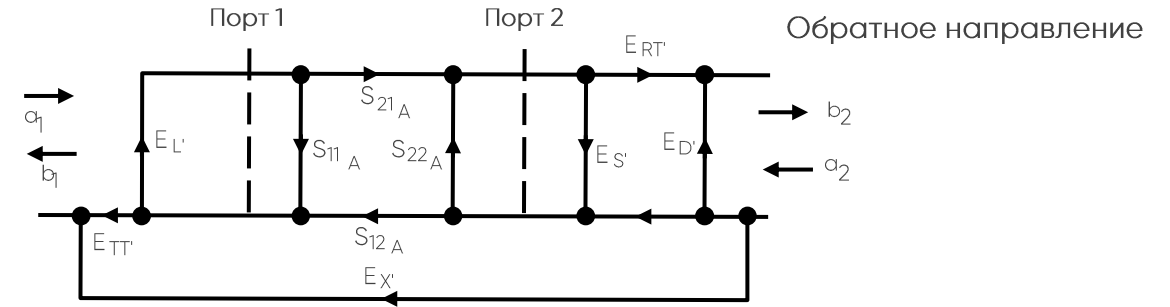
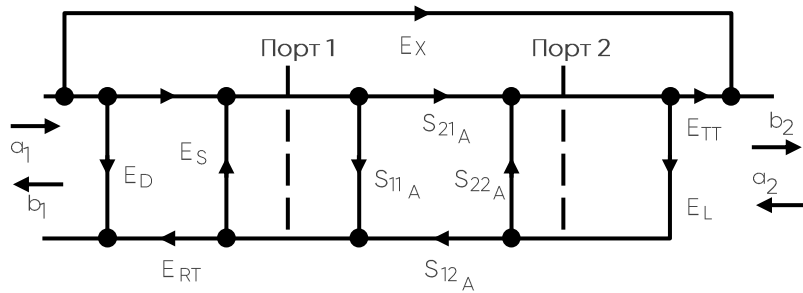
- При тестировании двухпортового устройства необходимо хорошая нагрузка, подключаемая ко второму порту
- Если используется второй порт анализатора цепей и обратная изоляция мала (например, полосопропускающий фильтр):
 - использование хорошей нагрузки некорректно
 - полная двухпортовая калибровка даст более точный результат

ИЗМЕРЕНИЯ ДО И ПОСЛЕ КАЛИБРОВКИ



ДВУХПОРТОВАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ

Прямое направление



Источник сигнала: порт 1

E_D = направленность

E_S = согласование источника

E_{RT} = частотная неравномерность отражения

E_L = согласование нагрузки

E_{TT} = частотная неравномерность передачи

E_X = развязка

Источник сигнала: порт 2

$E_{D'}$ = направленность

$E_{S'}$ = согласование источника

$E_{RT'}$ = частотная неравномерность отражения

$E_{L'}$ = согласование нагрузки

$E_{TT'}$ = частотная неравномерность передачи

$E_{X'}$ = развязка

- Каждое действительное значение S-параметра – это функция всех 4-х S-параметров
- Анализатор должен свипировать в прямом и обратном направлении для измерения одного S-параметра
- Эти уравнения не надо решать самостоятельно – все это сделает ВАЦ

$$S_{11a} = \frac{\left(\frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}}\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{E_{RT'}} E_{S'}\right) - E_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{E_{TT'}}\right)}{\left(1 + \frac{S_{11m} - E_{D'}}{E_{RT}} E_S\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{E_{RT'}} E_{S'}\right) - E_{L'} E_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{E_{TT'}}\right)}$$

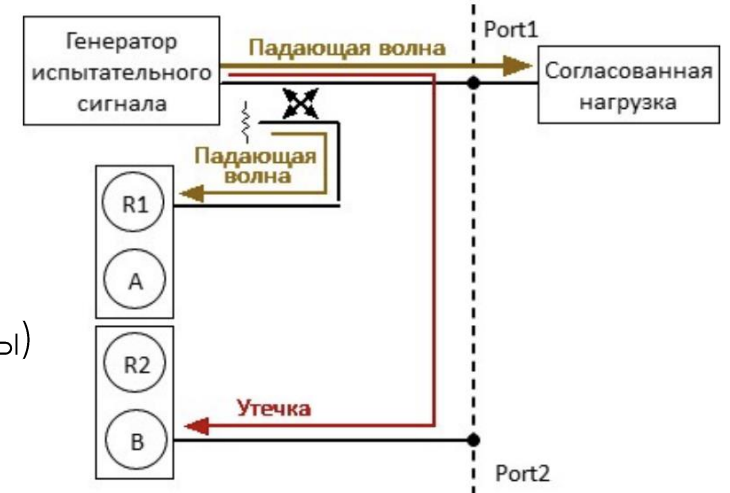
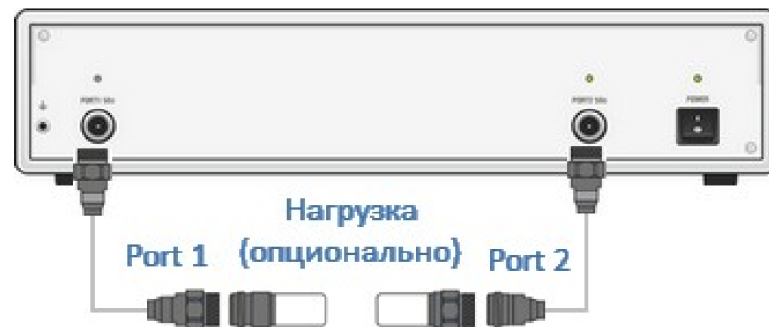
$$S_{21a} = \frac{\left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{E_{RT'}} (E_{S'} - E_L)\right)}{\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}} E_S\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{E_{RT'}} E_{S'}\right) - E_{L'} E_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{E_{TT'}}\right)}$$

$$S_{12a} = \frac{\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{E_{TT'}}\right)\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}} (E_S - E_{L'})\right)}{\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}} E_S\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{E_{RT'}} E_{S'}\right) - E_{L'} E_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{E_{TT'}}\right)}$$

$$S_{22a} = \frac{\left(\frac{S_{22m} - E_{D'}}{E_{RT'}}\right)\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}} E_S\right) - E_{L'} \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{E_{TT'}}\right)}{\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}} E_S\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{E_{RT'}} E_{S'}\right) - E_{L'} E_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{E_{TT'}}\right)}$$

РАЗВЯЗКА: ПРОНИКНОВЕНИЕ ПАРАЗИТНОГО СИГНАЛА

- Может возникать проблема при измерении:
 - Устройств с большой развязкой (коммутаторы)
 - Устройств с широким динамическим диапазоном (некоторые полосозаграждающие фильтры)
- Калибровка изоляции
 - Добавляет шум к модели ошибок (измерение вблизи уровня шума системы)
 - Выполняется при необходимости (можно использовать усреднение)



ВИДЫ КАЛИБРОВОК

БЕЗ КАЛИБРОВКИ



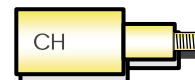
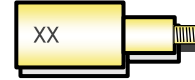
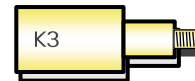
- ▣ Удобно
- ▣ Низкая точность
- ▣ Нет удаления ошибок

НОРМАЛИЗАЦИЯ



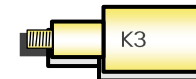
- ▣ Легко провести
- ▣ Используется когда высокая точность не требуется
- ▣ Убирает ошибки частотной неравномерности

ПОЛНАЯ 1-ПОРТОВАЯ



- ▣ Для измерения отражения
- ▣ Необходима хорошая нагрузка для двухпортового устройства
- ▣ Устраняет следующие ошибки:
 - направленность
 - согласование источника
 - частотная неравномерность

ПОЛНАЯ 2-ПОРТОВАЯ



Однонаправленная двухпортовая калибровка

- ▣ Комбинирование нормализации и однопортовой калибровки
- ▣ Корректирует согласование источника для измерений на проход

ИЗМЕРЕНИЕ ВНОСИМЫХ ПОТЕРЬ ФИЛЬТРА

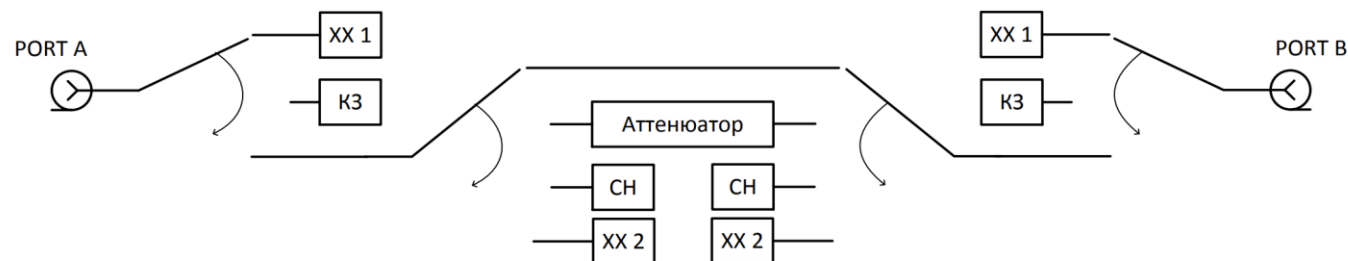


АВТОМАТИЧЕСКИЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ МОДУЛИ

- Разнообразии двух- и четырехпортовых модулей, работающих в частотном диапазоне от 20 кГц до 44 ГГц

Калибровка за одно подключение

- Уменьшение времени калибровки
 - Упрощение калибровки
 - Минимизируется износ кабелей и соединителей
 - Снижает вероятность ошибки оператора
- Высокая повторяемость за счет температурной компенсации обеспечивает превосходную точность проводимых измерений



КАЛИБРОВКА «НЕИЗВЕСТНАЯ ПЕРЕМЫЧКА»

В качестве неизвестной перемычки в двухпортовой калибровке SOLR (Short-OpenLoad-Reciprocal) может быть использовано любое двухпортовое устройство с неизвестными параметрами, удовлетворяющее следующим требованиям:

- Взаимность ($S_{21} = S_{12}$), что справедливо для большинства пассивных линейных микроволновых цепей;
- суммарные потери передачи неизвестной перемычки и калибровочной установки не должны превышать 40 дБ;
- приблизительная электрическая задержка неизвестной перемычки должна быть задана вручную или установлена равной нулю, чтобы анализатор определил ее автоматически.



Рисунок – Первый этап калибровки с неизвестной перемычкой SOLR

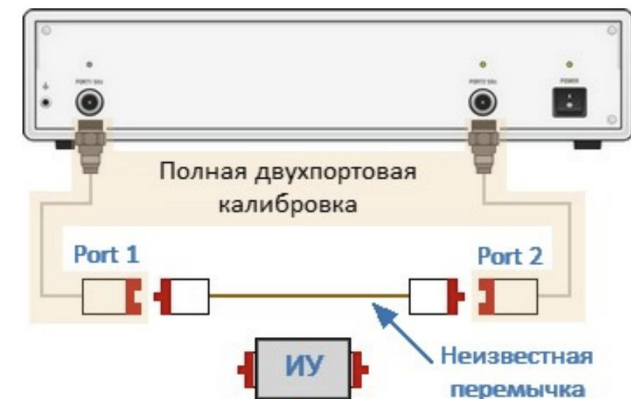


Рисунок – Второй этап калибровки с неизвестной перемычкой SOLR

ИСКЛЮЧЕНИЕ/ДОБАВЛЕНИЕ АДАПТЕРА

Функция исключения адаптера используется для удаления любых характеристик адаптера из плоскости калибровки.

Функция используется, когда для двухпортовой калибровки SOLT подключение нулевой перемычки к соединителям тестовых портов возможно только с помощью адаптера.

- Подключите адаптер к тестовому порту
- Выполните двухпортовую калибровку SOLT
- Извлеките адаптер
- Установите значение задержки (или длины) адаптера или оставьте его равным нулю для автоматического определения
- Измерьте три калибровочные меры: XX, КЗ и Нагрузка для соответствующего тестового порта

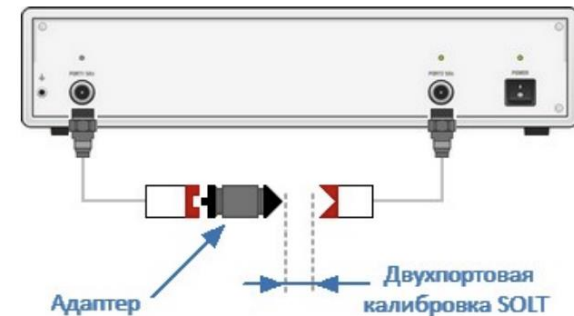


Рисунок – Первый этап функции исключения адаптера

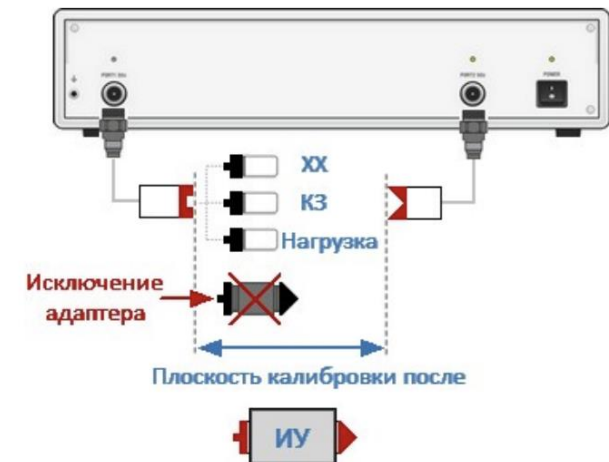


Рисунок – Второй этап функции исключения адаптера

КАЛИБРОВКА TRL (THRU-REFLECT-MATCH)

Что такое TRL калибровка?

- Двухпортовая техника калибровки
- Обычно применяется для некоаксиальных измерений (волноводы, отснastки, зондовые пробники)
- Характеризует 12 систематических ошибок как и SOLT калибровка
- Использует меры, которые просты в изготовлении и аттестации
- Другие подклассы TRL-калибровки:
Line-Reflect-Match (LRM), Thru-Reflect-Match (TRM)

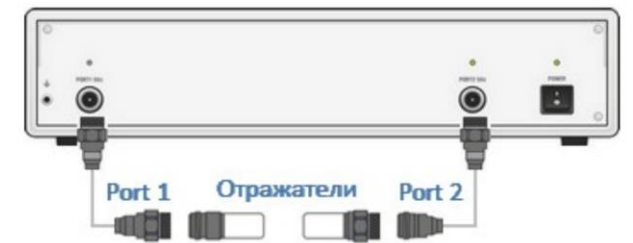
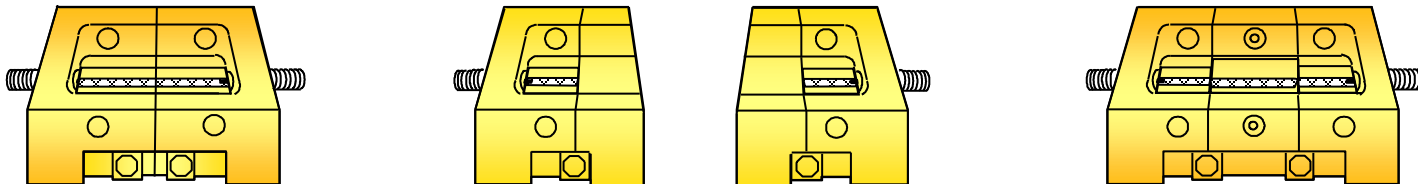


Рисунок – Калибровка TRL

ПРОГРАММА СЕМИНАРА

- Введение в теорию Векторного Анализа Цепей
- Структура Векторных Анализаторов Цепей (ВАЦ)
- Составляющие погрешности и калибровка ВАЦ
- Обзор измерительных возможностей современных ВАЦ
 - Анализа во временной области
 - Измерение усилителей
 - Измерение преобразователей частоты
- Основы автоматизации измерений

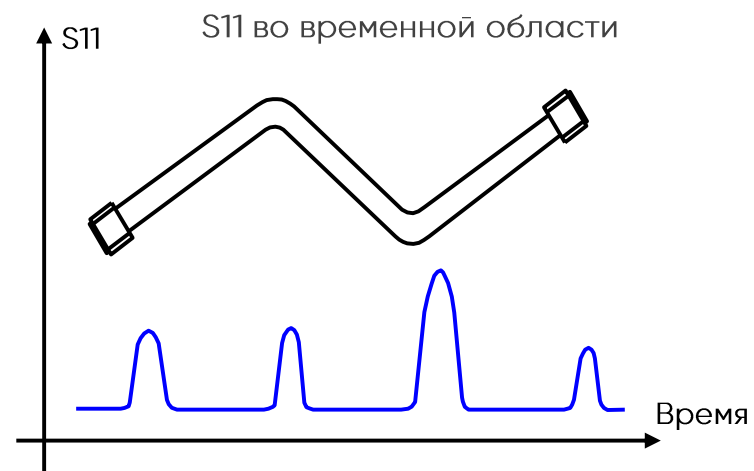
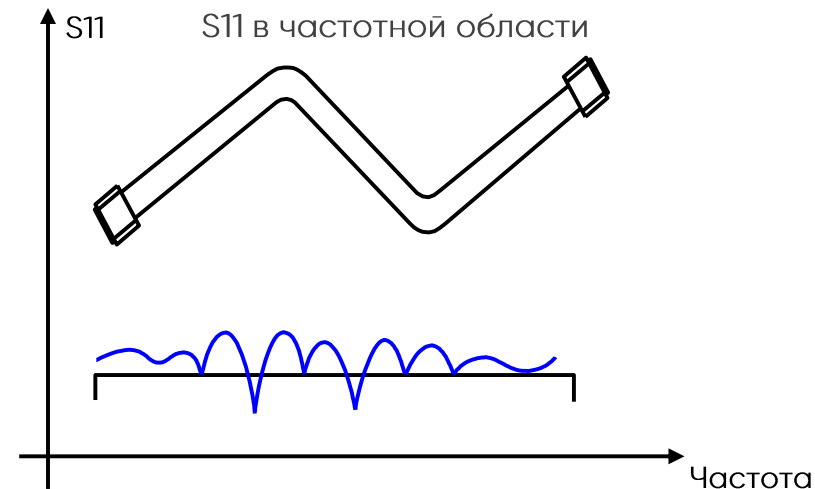


АНАЛИЗ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

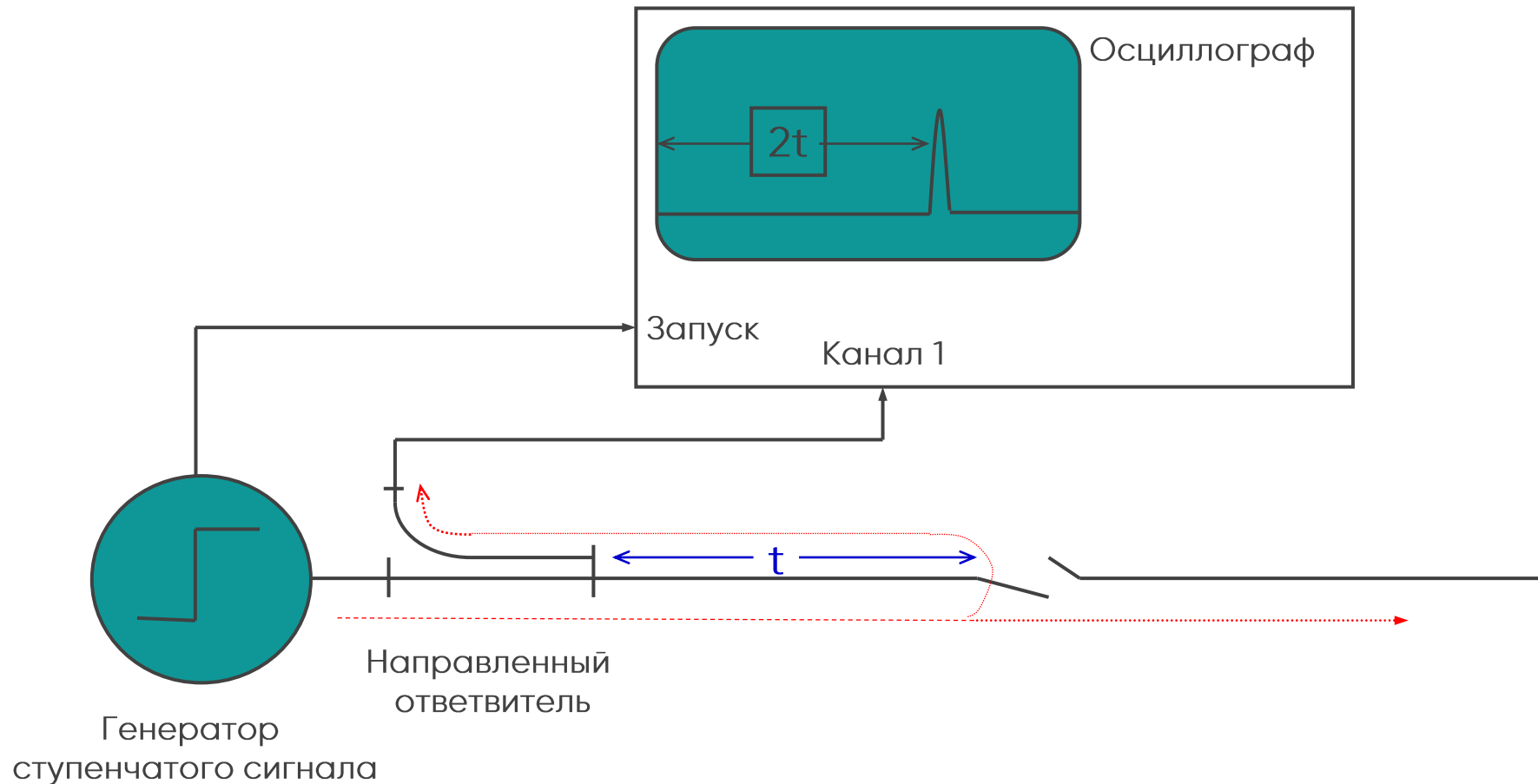
Позволяет отобразить результаты измерений в качестве функции времени (расстояния)

Анализ во временной области обеспечивает:

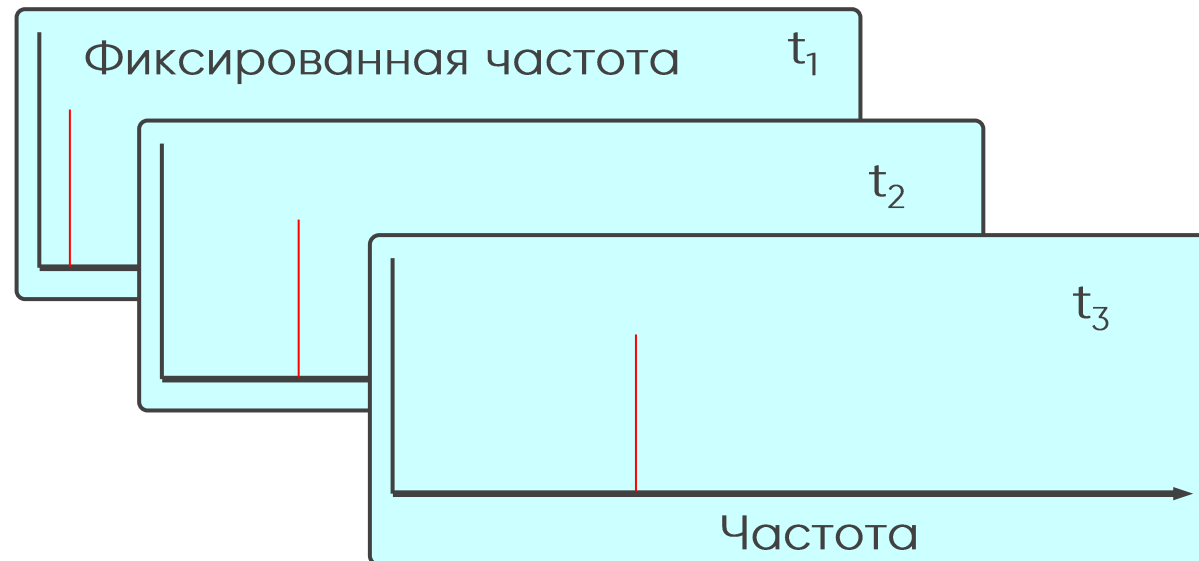
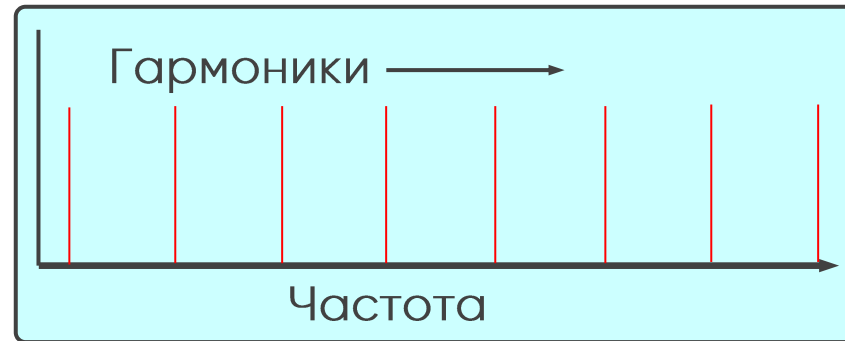
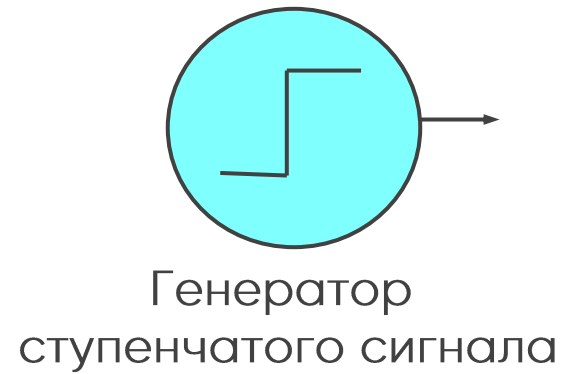
- Наблюдение за дефектами линии передачи (расстояние до дефекта)
- Контроль волнового сопротивления линии передачи
- Настройка многосвязных фильтров
- Измерение сигнала передачи с тройной задержкой в фильтрах на поверхностных акустических волнах (ПАВ)
- Антенные измерения (селекция переотражений)



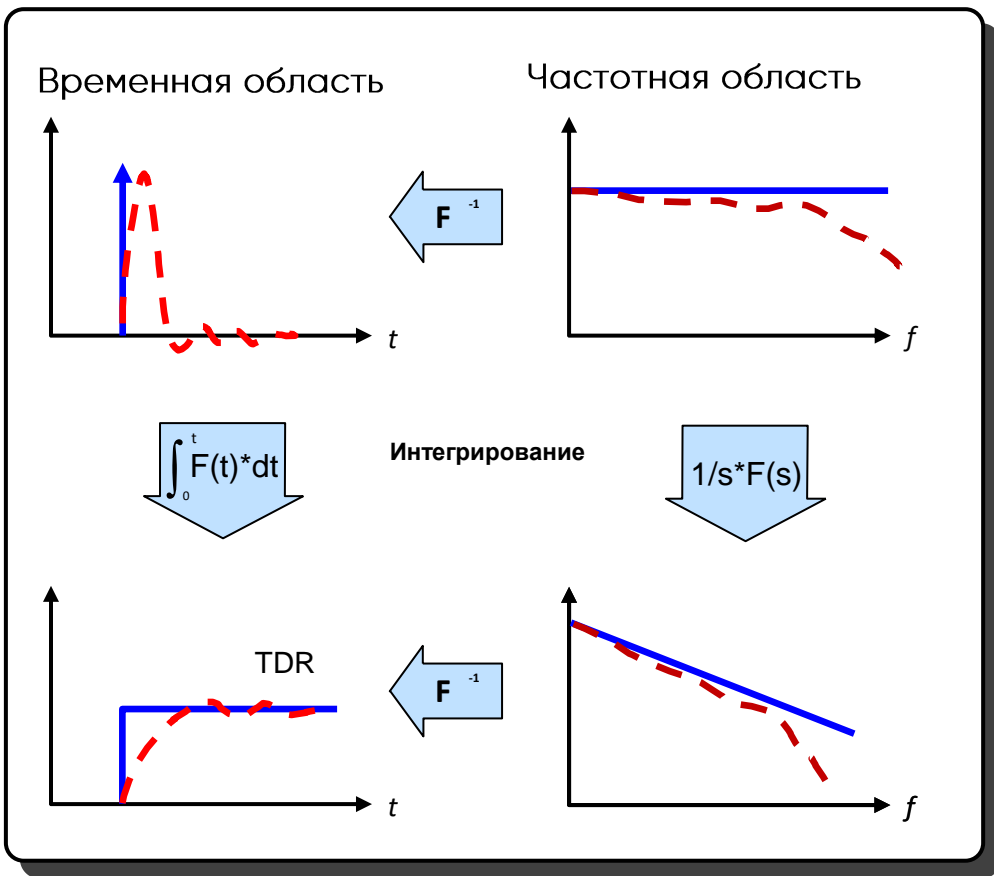
РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ (TDR)



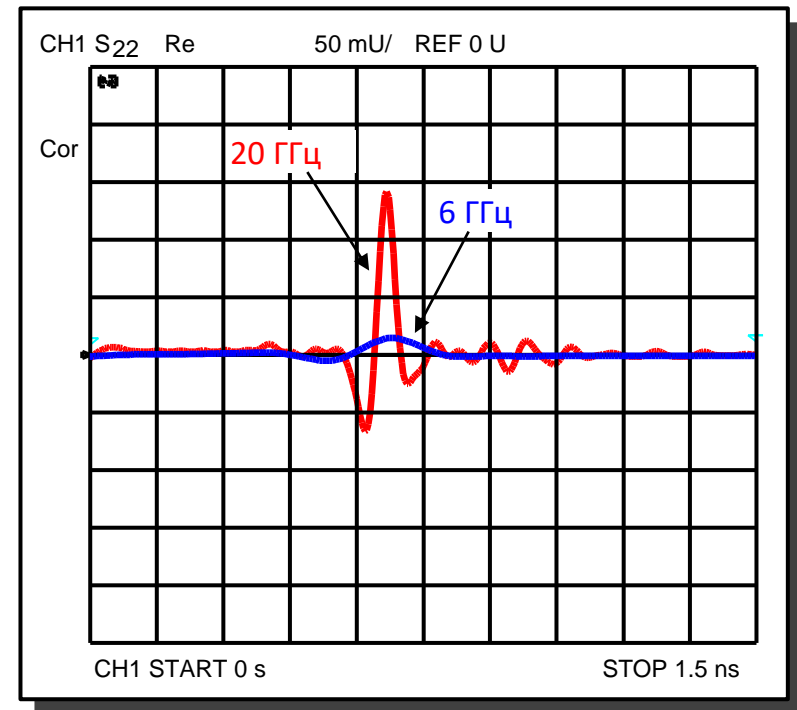
ГЕНЕРАТОР РЕФЛЕКТОМЕТРА VS ИСТОЧНИКА ВАЦ



РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВАЦ



- Измерения в частотной области в широкой полосе частот
- Применение обратного преобразования Фурье (Z-преобразования)
- Разрешение пропорционально диапазону частот



ЭФФЕКТ НАЛОЖЕНИЯ СПЕКТРОВ

- Отклик во временной области является периодической функцией из-за дискретного характера отклика в частотной области

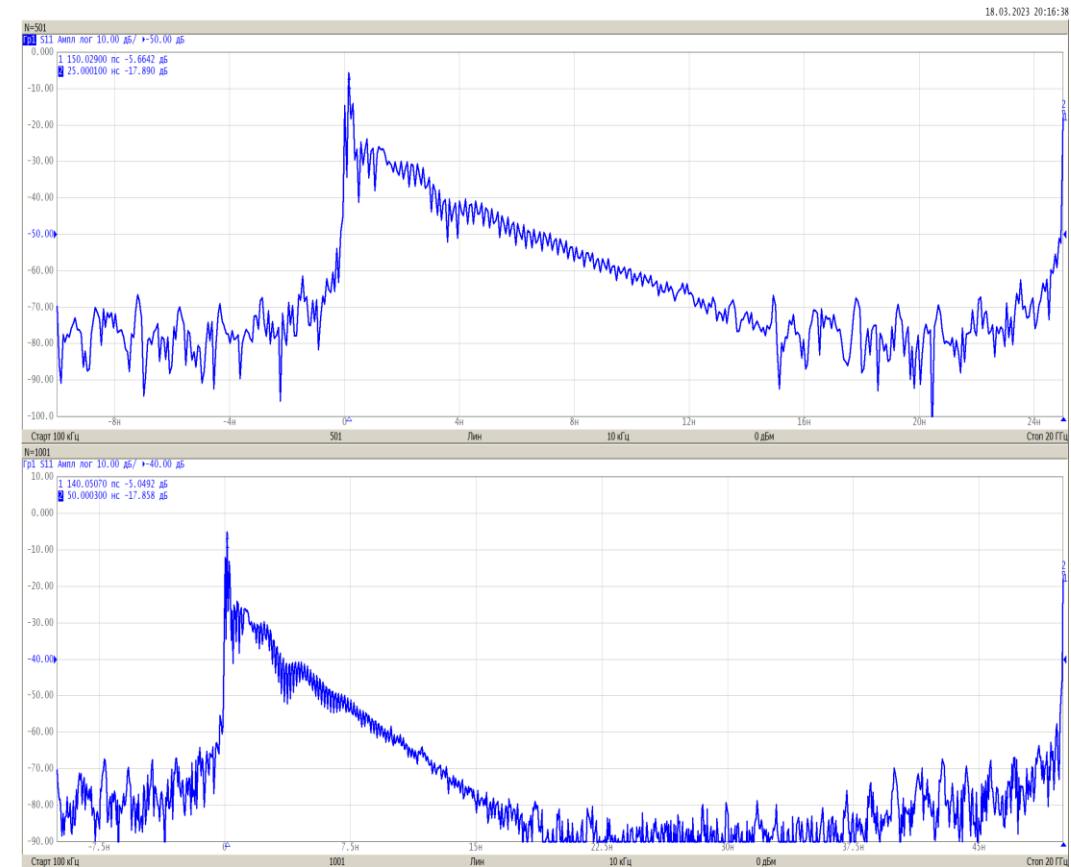
- Период однозначности во временной области ΔT определяется шагом измерения в частотной области:

$$\Delta T(\text{с}) = (N - 1) / (F_{\text{max}} - F_{\text{min}})$$

- Период однозначности в масштабе расстояния ΔS определяется шагом измерения в частотной области, и коэффициента замедления v :

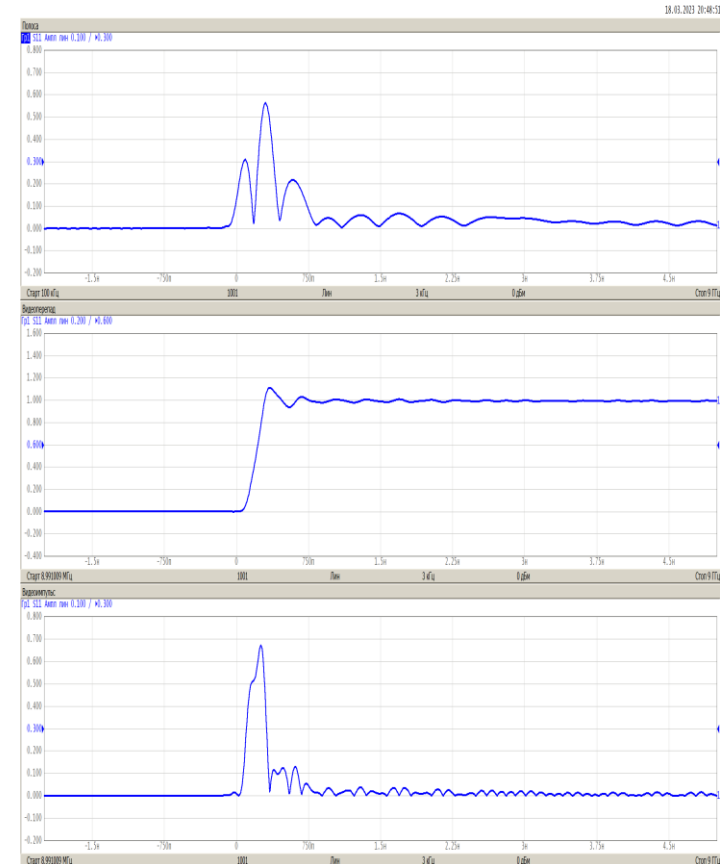
$$\Delta S(\text{м}) = (N - 1) / (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) * C * v$$

Коэффициент замедления – это отношение скорости распространения сигнала в линии передачи, к скорости этого сигнала в вакууме.



ТИПЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

- **Полоса** – моделирование отклика узкополосной цепи, не пропускающей постоянный ток, на импульс
 - Применяется для исследования устройств, которые не пропускают постоянный ток (фильтры, волноводы) ·
- **Видеоперепад** – моделирование отклика цепи, пропускающей постоянный ток, на единичный перепад
 - Удобен для измерения распределения импеданса по длине цепи
 - Предоставляет информацию о **характере неоднородности**
 - Диапазон частот должен представлять собой гармонический ряд
- **Видеоимпульс** – моделирование отклика цепи, пропускающей постоянный ток, на импульс
 - Предоставляет информацию о **характере неоднородности**
 - Диапазон частот должен представлять собой гармонический ряд



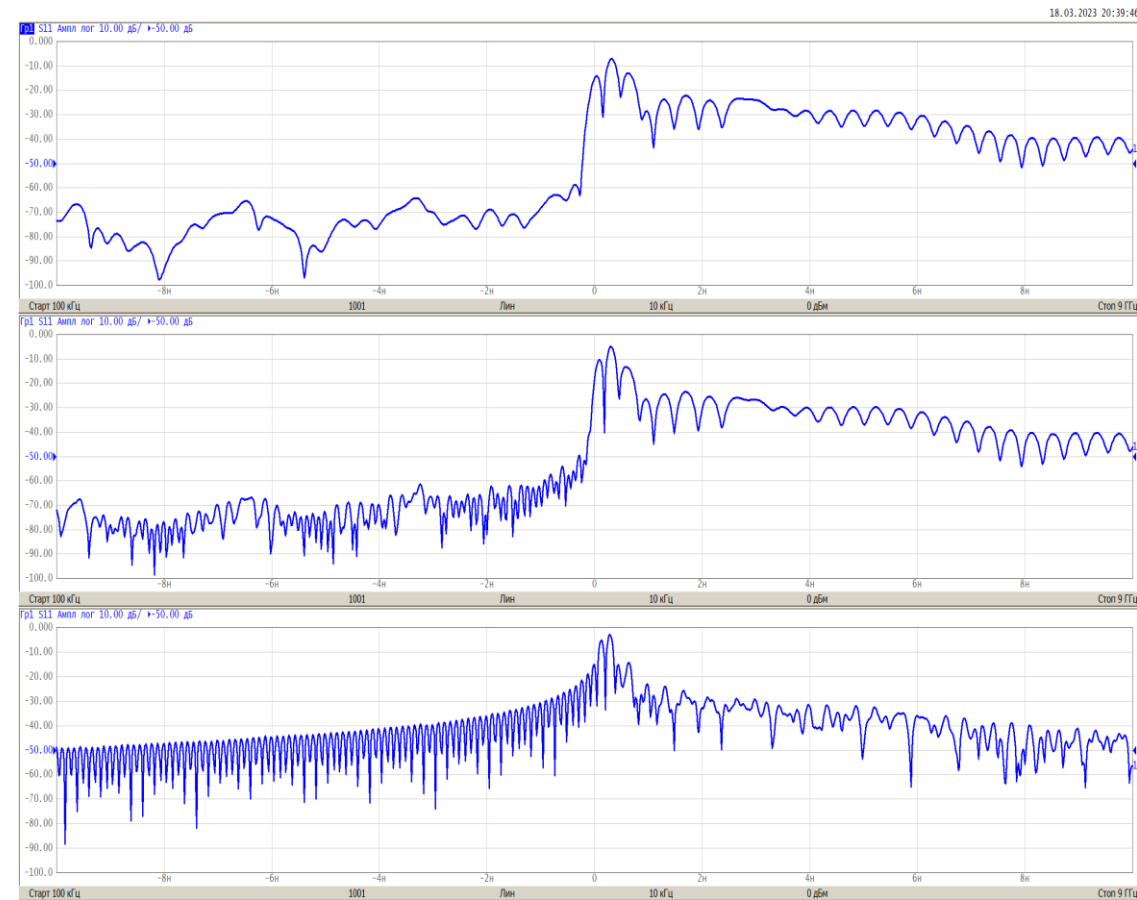
ОКОННЫЕ ФУНКЦИИ

Функция временной области использует окно Кайзера для предварительной обработки данных в частотной области

Окно Кайзера имеет числовой параметр β , который плавно регулирует форму окна от минимальной (прямоугольной) до максимальной.

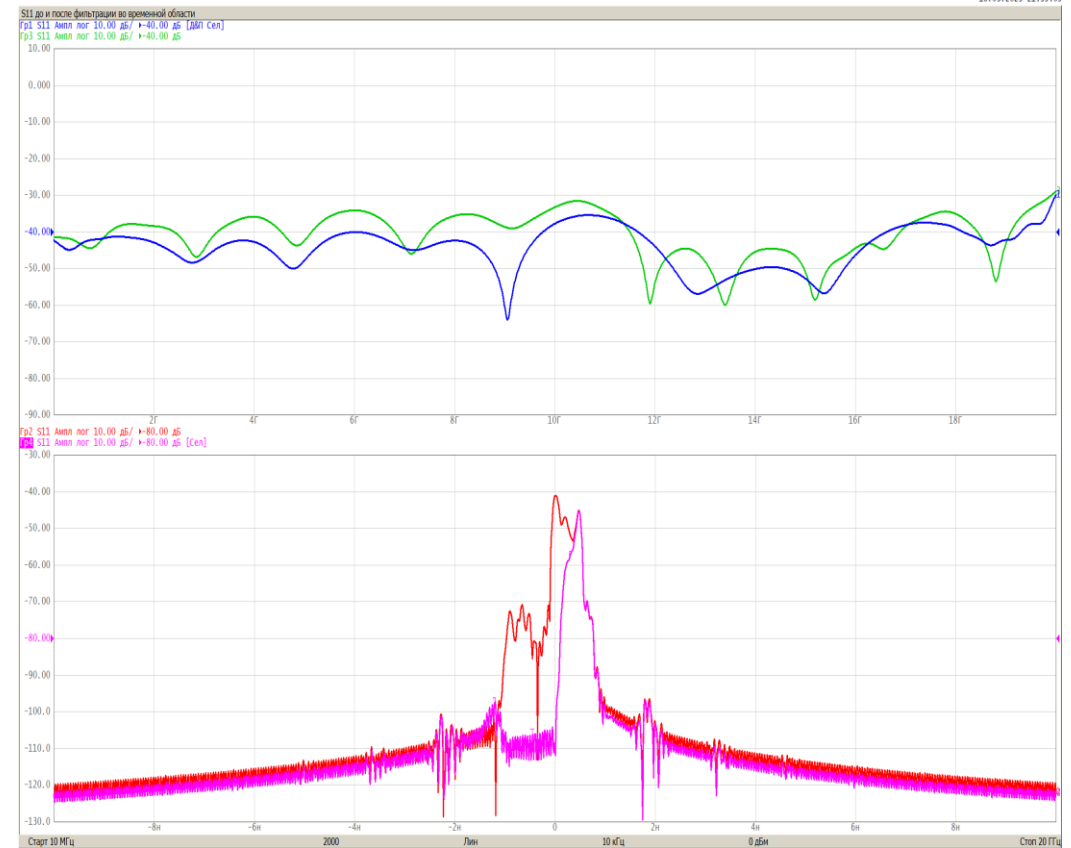
Характеристики фиксированных видов окон

Окно	Видеоимпульс		Видеоперепад	
	Уровень боковых лепестков	Длительность импульса	Уровень боковых лепестков	Длительность фронта
Минимальное	- 13 дБ	$\frac{0.6}{F_{max}-F_{min}}$	- 21 дБ	$\frac{0.45}{F_{max}-F_{min}}$
Нормальное	- 44 дБ	$\frac{0.98}{F_{max}-F_{min}}$	- 60 дБ	$\frac{0.99}{F_{max}-F_{min}}$
Максимальное	- 75 дБ	$\frac{1.39}{F_{max}-F_{min}}$	- 70 дБ	$\frac{1.48}{F_{max}-F_{min}}$



СЕЛЕКЦИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

- Селекция во временной области – это математическая функция, позволяющая удалить нежелательные отклики, используя преобразование во временную область.
- Функция выполняет преобразование S-параметров во временную область, удаляет отклик внутри (или вне) этого диапазона и выполняет обратное преобразование в частотную область.
- Функция позволяет устранить из частотной характеристики исследуемого устройства паразитные влияния оснaстки, если полезный и паразитный сигналы разделены во временной области

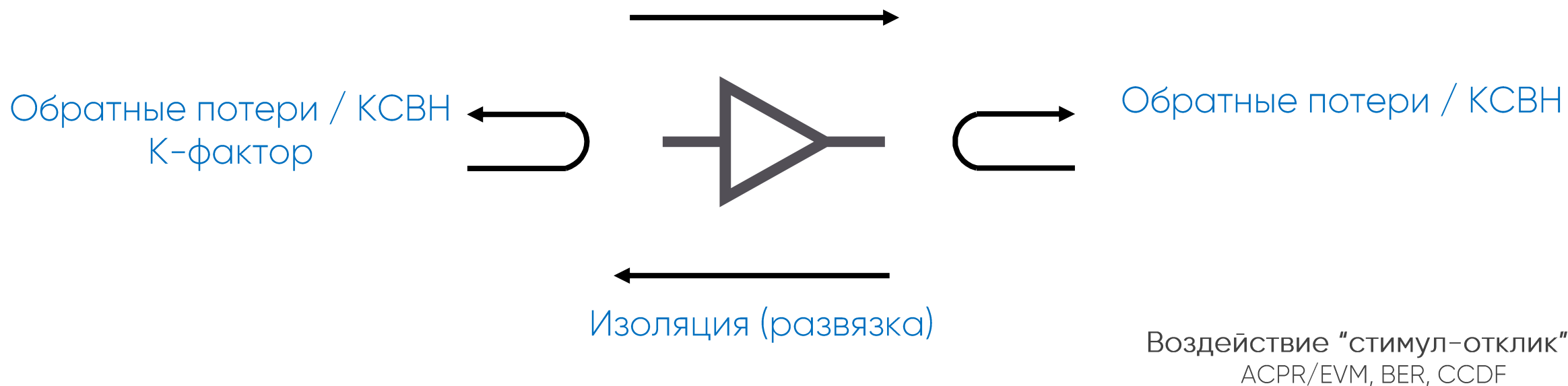


ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

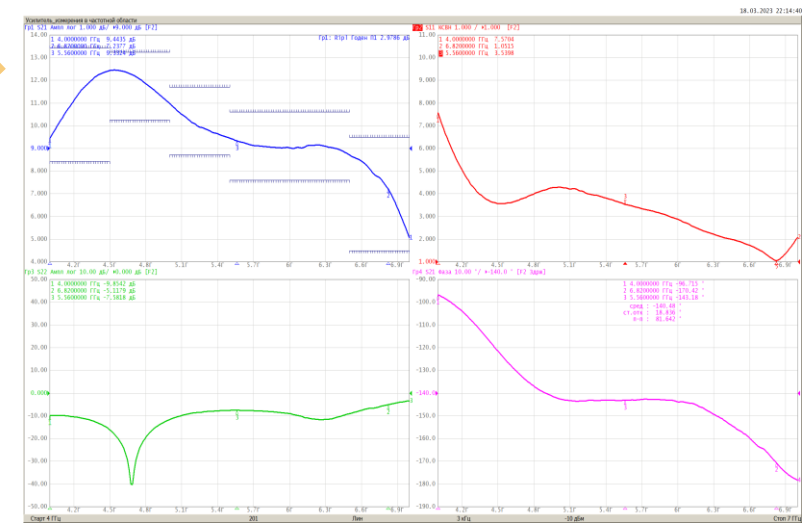
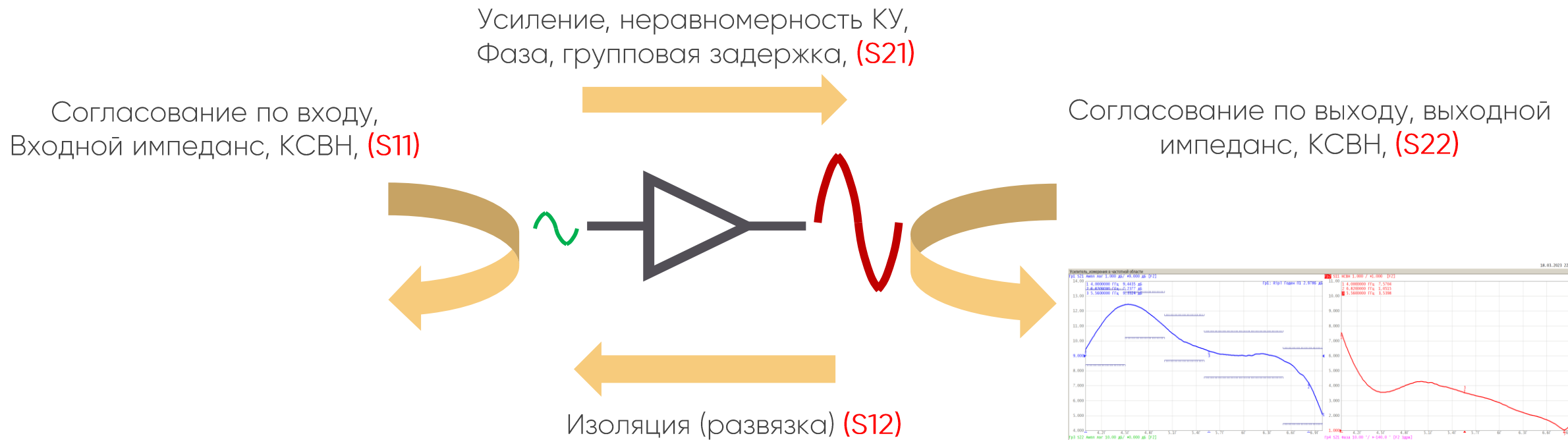
Линейные параметры

Нелинейные параметры

Коэффициент усиления (КУ), неравномерность КУ,
компрессия, Коэффициент шума, АМ/РМ- АМ/АМ- конверсия,
Гармонические искажения, Интермодуляционные искажения,
Отклонение от линейной фазы, Групповая задержка



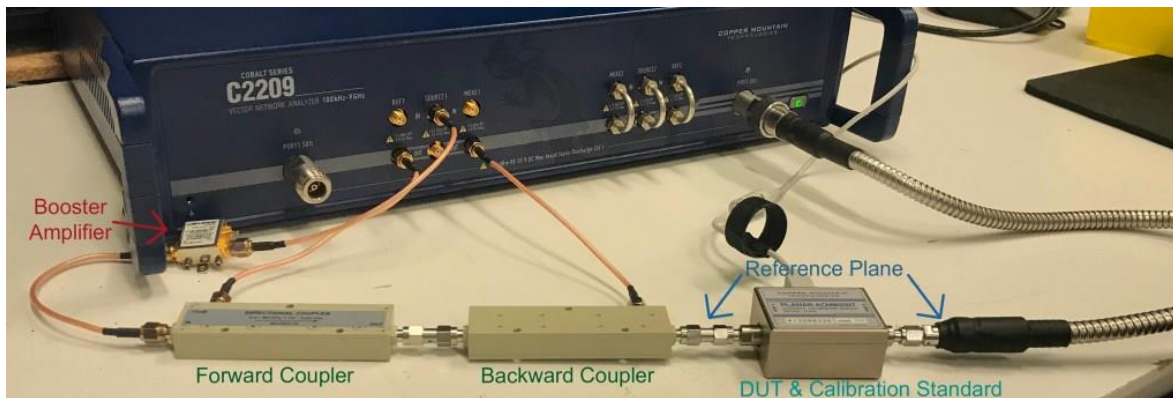
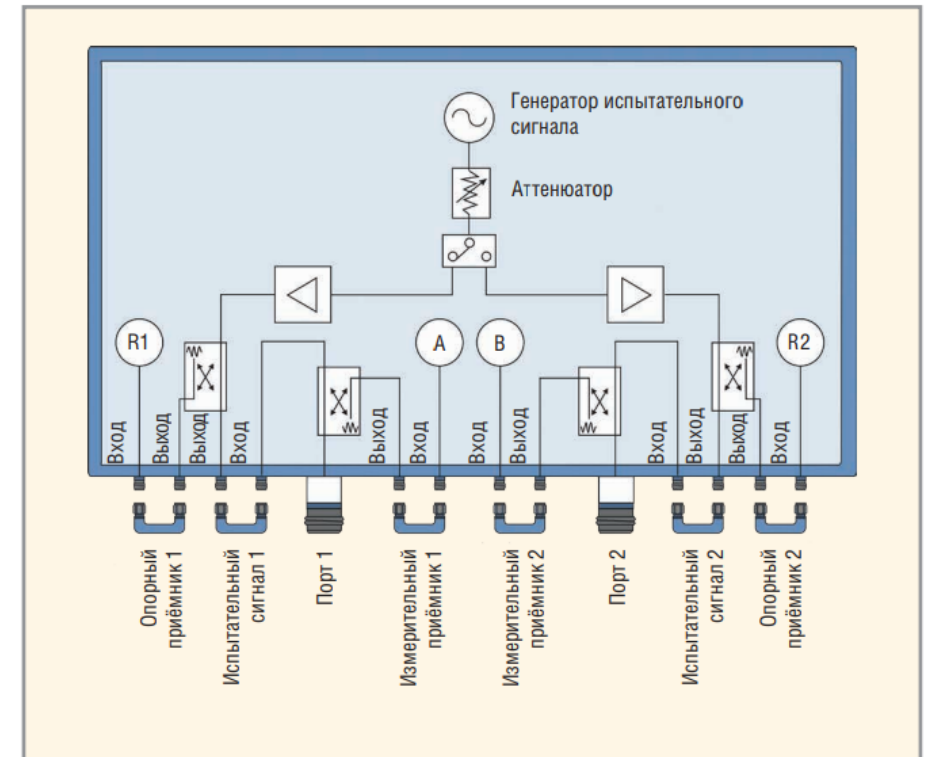
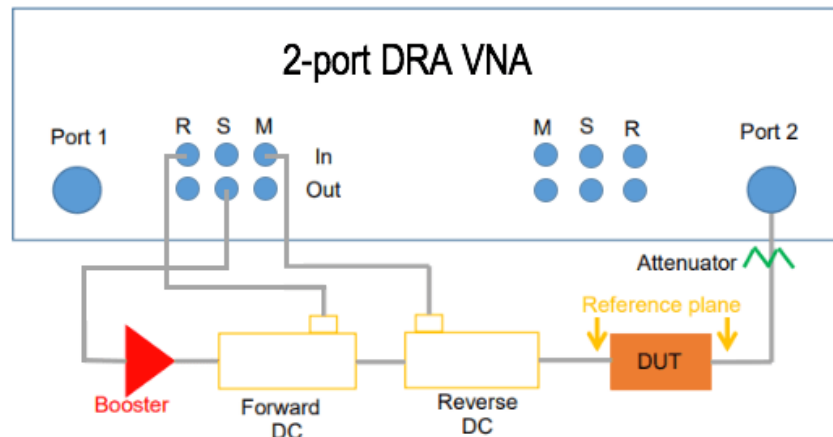
ИЗМЕРЕНИЕ УСИЛИТЕЛЯ: S-ПАРАМЕТРЫ



Измерение коэффициента передачи и отражения в линейном режиме выполняются за одно подключение к ВАЦ

ИЗМЕРЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Использование режима прямого доступа к измерительным приемникам для организации схемы измерения усилителей высокой мощности

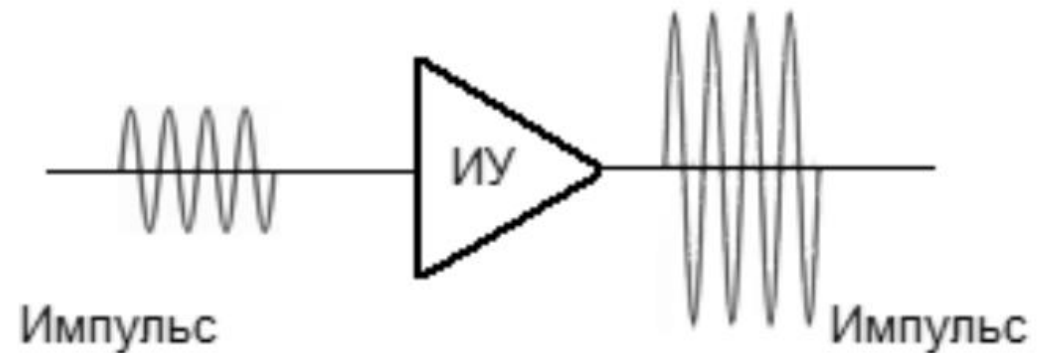


Расположение перемычек для прямого доступа к приемникам

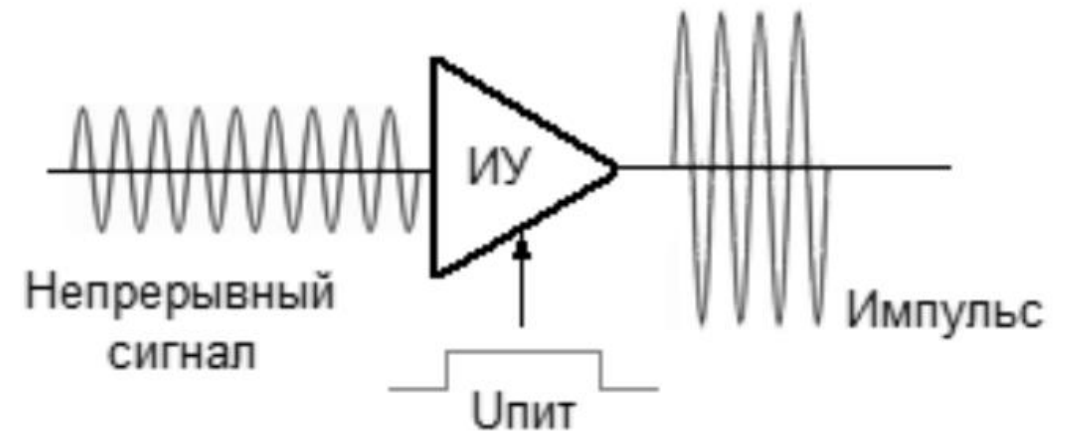
ИЗМЕРЕНИЯ В ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

Импульсные устройства работают в режиме модуляции входного сигнала или в режиме модуляции питающих напряжений прямоугольным импульсом

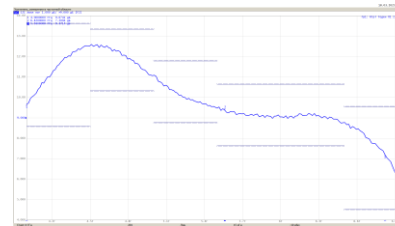
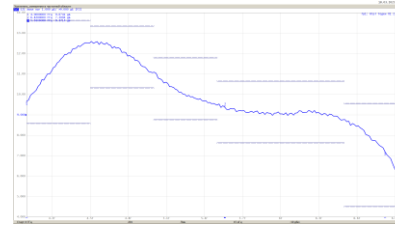
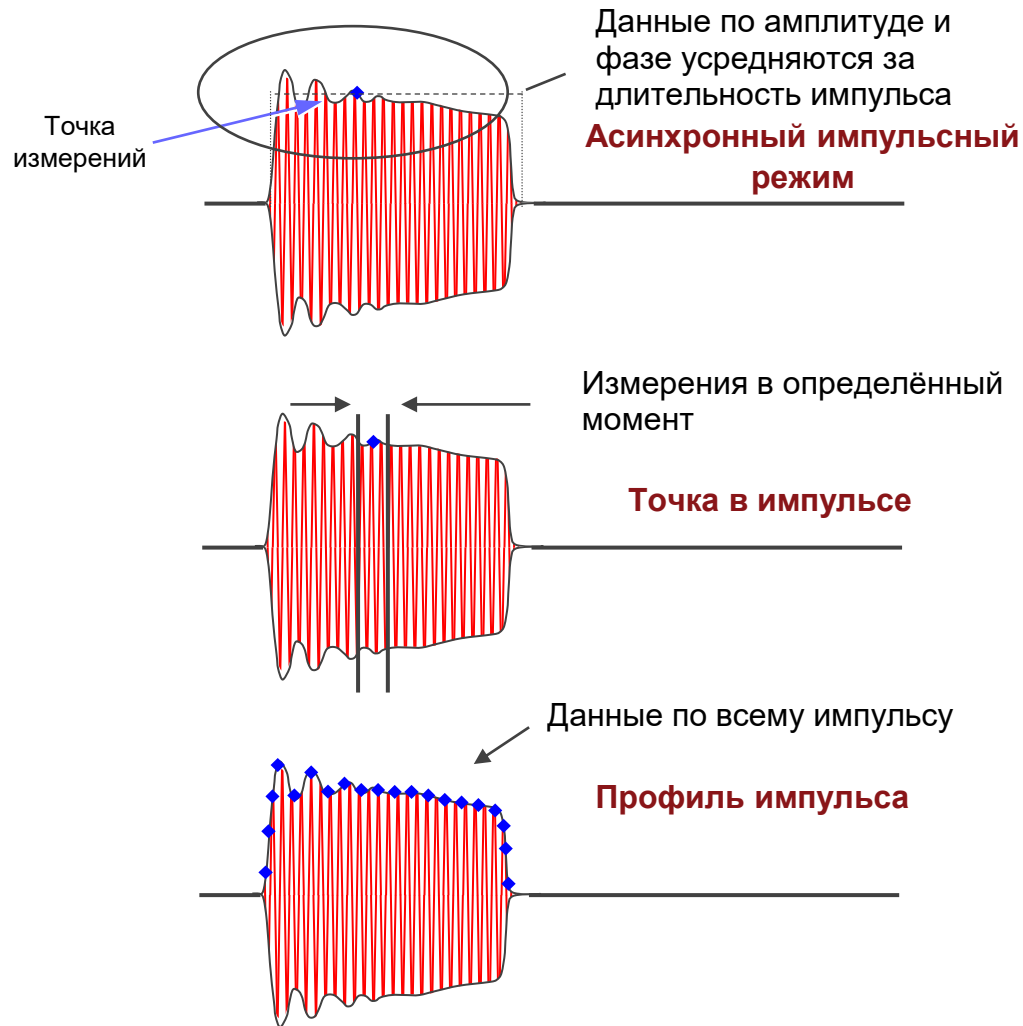
Модуляция входного сигнала



Модуляции питающих напряжений



РЕЖИМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ НА ВАЦ



Измерение S-параметров импульсных устройств в частотной области с использованием узкополосного детектирования

Сви́пирование

Измерение S-параметров импульсных устройств в частотной области с использованием широкополосного детектирования

Несущая частота

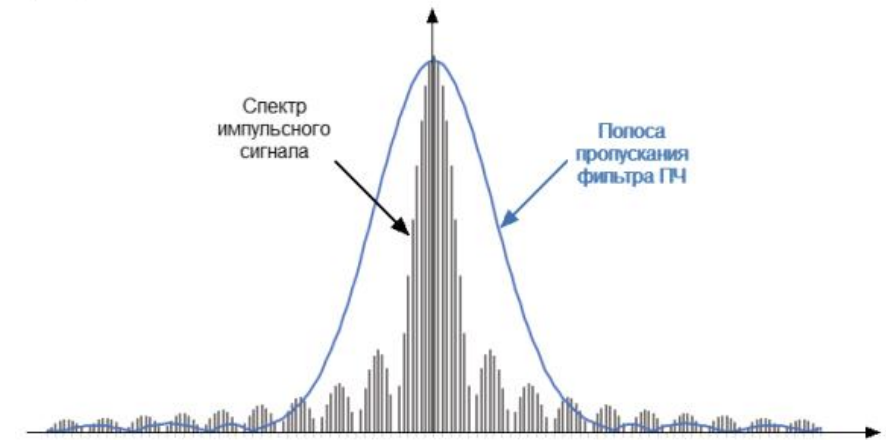
Амплитуда

Измерение огибающей импульса во временной области в течение длительности одного импульса

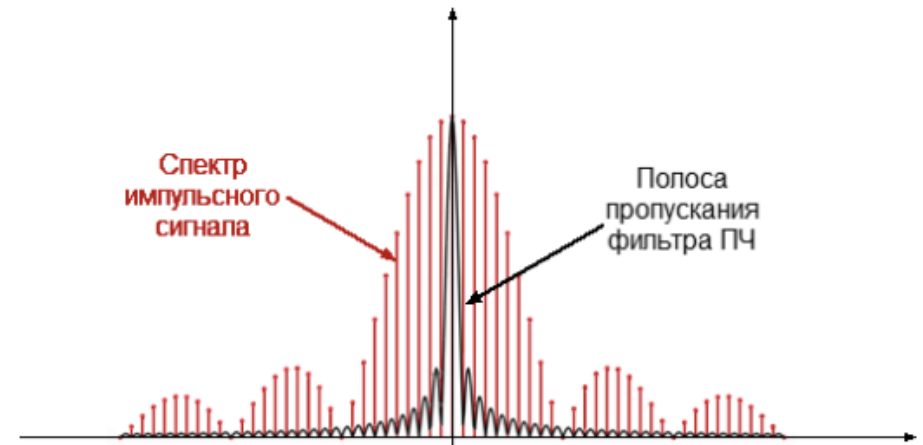
Фаза

СРАВНЕНИЕ РЕЖИМОВ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ

	«Точка в импульсе»	Асинхронный импульсный режим
Метод детектирования	Широкополосное детектирование	Узкополосное детектирование
Преимущества	Сохраняет динамический диапазон измерений при изменении скважности импульсов	Возможность использования коротких импульсов или высокой частоты повторения импульсов
Ограничения	Ограничение минимальной длительности импульса	Уменьшение динамического диапазона измерений при увеличении скважности импульсов
Длительность импульса	$\tau_{\text{имп}} \geq 4 \text{ мкс}$	$\tau_{\text{имп}} \geq 200 \text{ нс}$
Период повторения импульсов (PRP)	$PRP \geq \tau_{\text{имп}} + \tau_{\text{уст}}^1$	$PRP \geq 10 \cdot \tau_{\text{имп}}$
Примечание: $\tau_{\text{уст}}$ – время установки частоты при переходе на следующую частотную точку. Типовое время установки частоты составляет 16 мкс. В отдельных точках частотного диапазона время установки частоты может составлять 50 мкс.		



Пример широкополосного детектирования



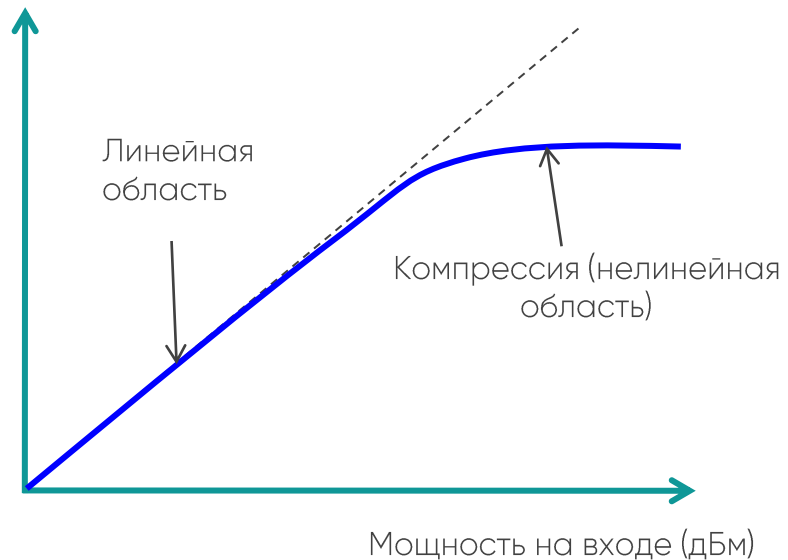
Пример узкополосного детектирования

КОМПРЕССИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

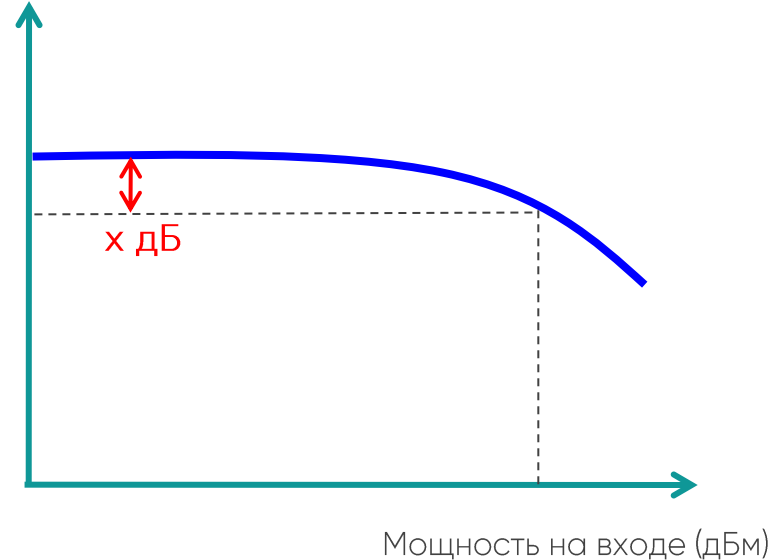
Компрессия усилителя – параметр определяющий переход между линейной и нелинейной областью работы устройства

Точка компрессии определяется как снижение КУ на x дБ при перестройке уровня входной мощности

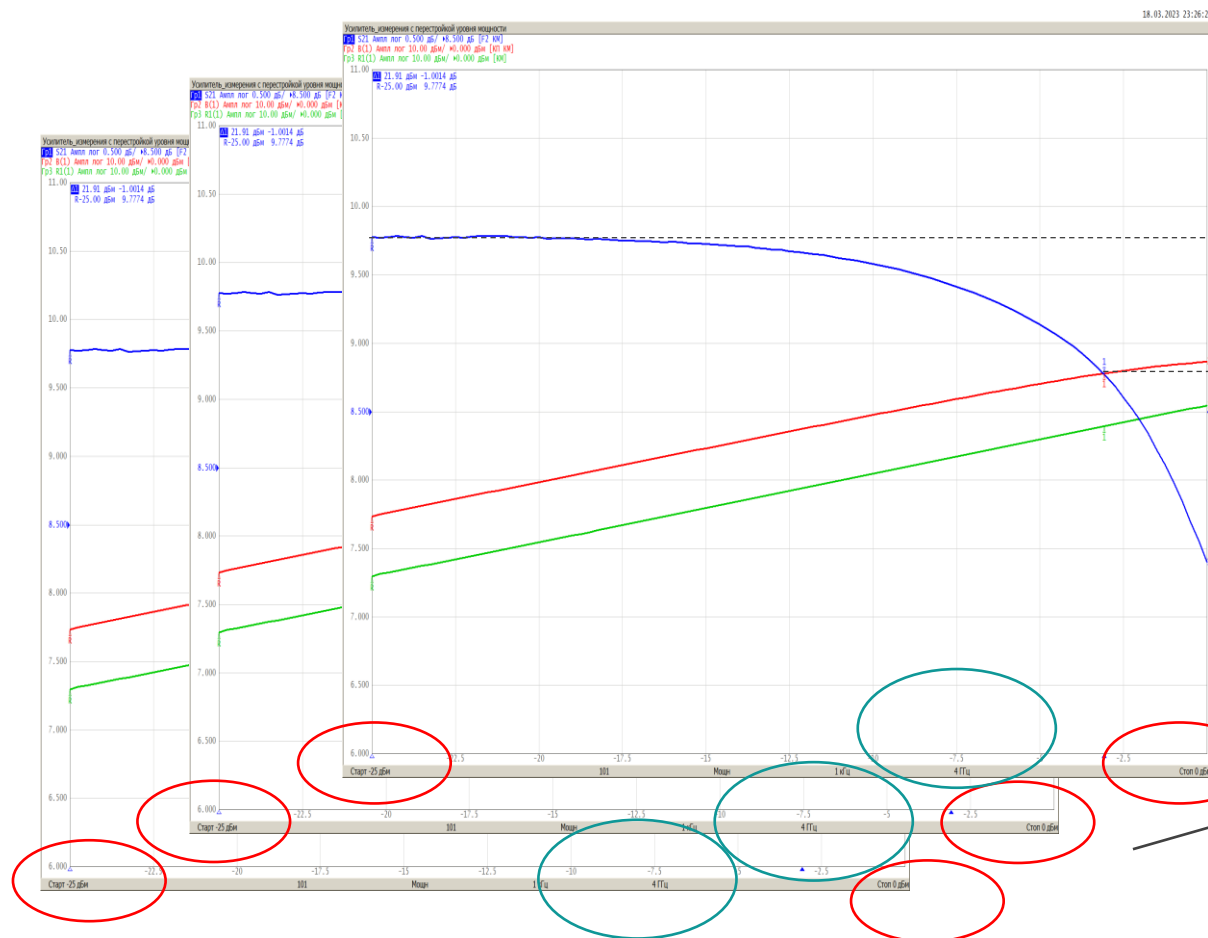
Мощность на выходе (дБм)



Коэффициент усиления, дБ



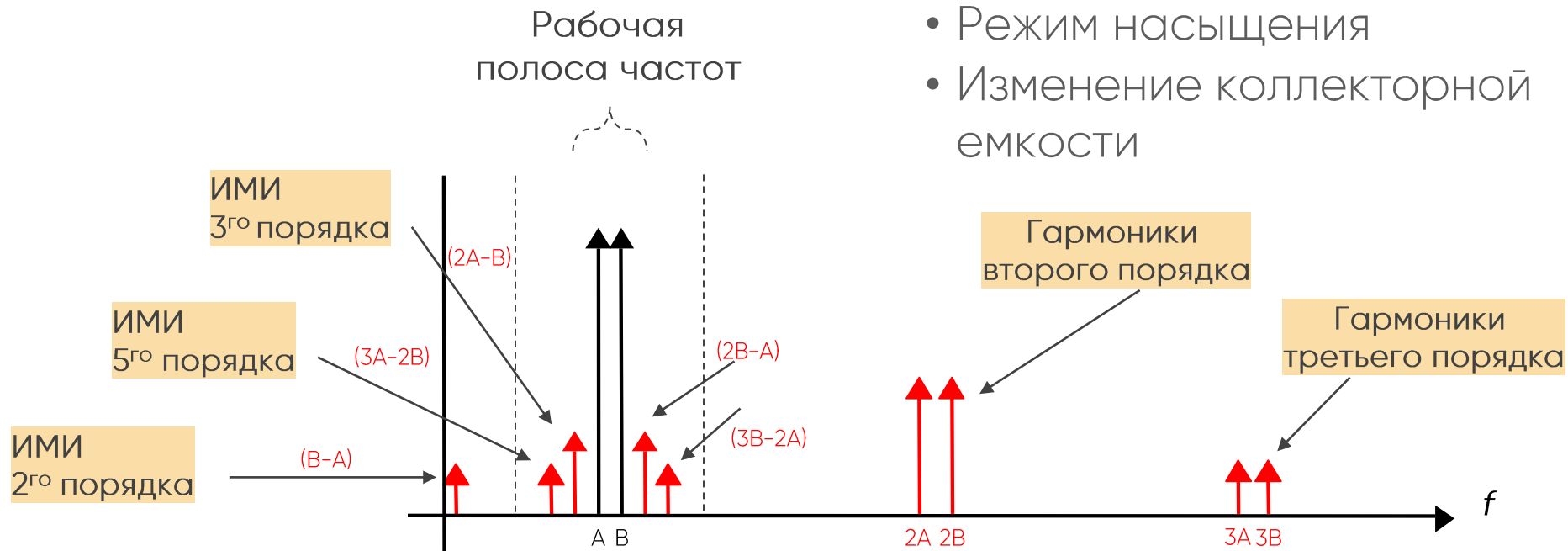
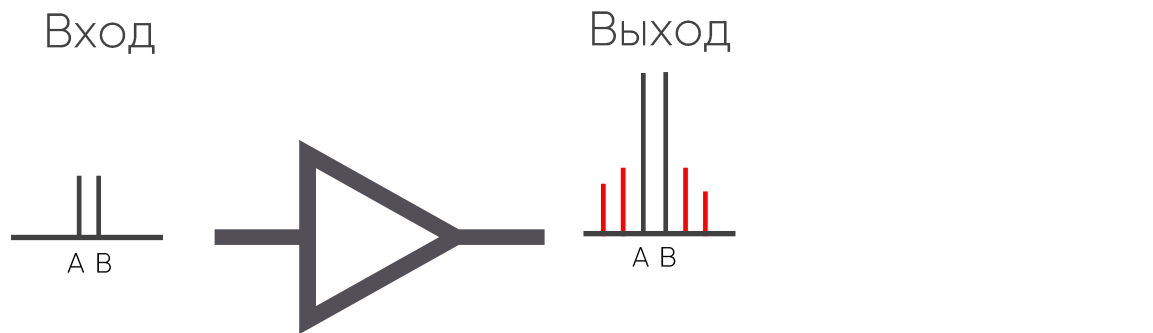
ИЗМЕРЕНИЕ КОМПРЕССИИ: КЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД



Точка 1 дБ компрессии: уровень мощности, при которой КУ падает на 1 дБ

Измерения компрессии это двумерное измерение: **сви́пирование мощности** + сви́пирование по частоте

ИЗМЕРЕНИЕ ГАРМОНИК И ИНТЕРМОДУЛЯЦИЙ

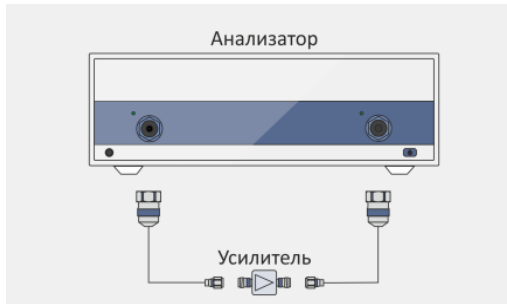


- Основные причины
 - Перекрестные искажения
 - Снижение КУ при высоком токе
- Прочие
 - Режим насыщения
 - Изменение коллекторной емкости

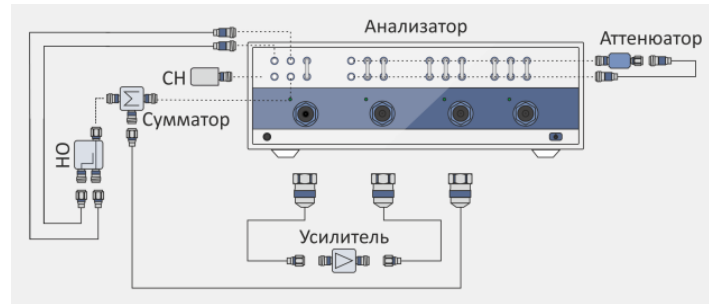
ПАНОРАМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПРЕССИИ

Плагин Amplifier Test

Программа для измерений точки компрессии (P1) усилителей, гармонических составляющих и интермодуляционных продуктов на их выходе

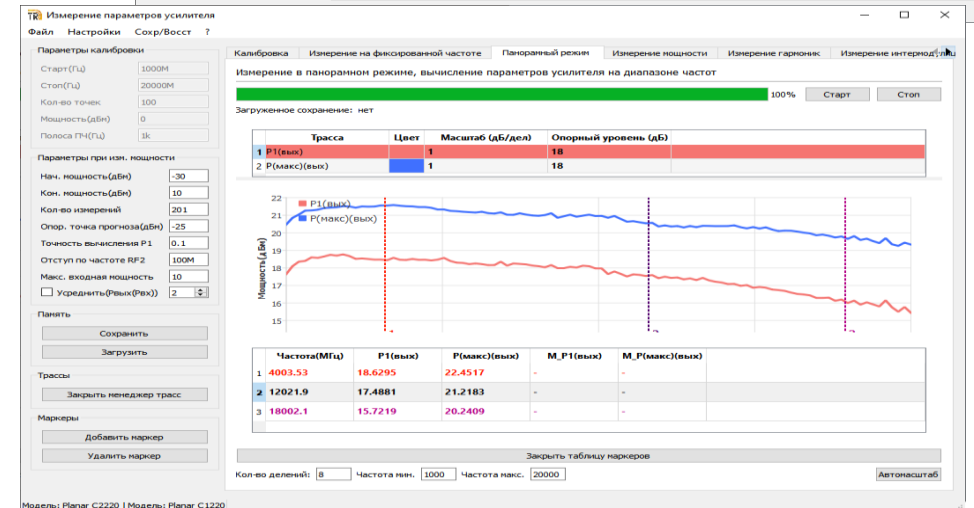
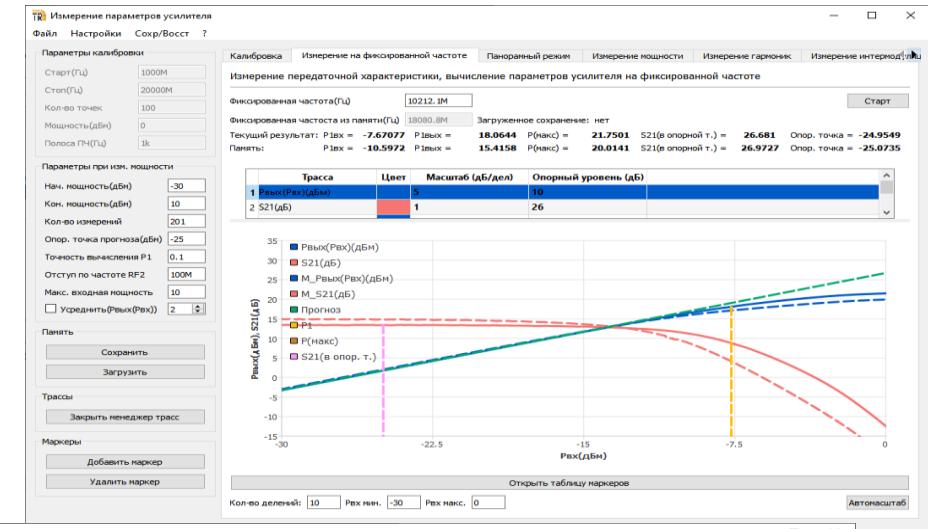


Односигнальная схема



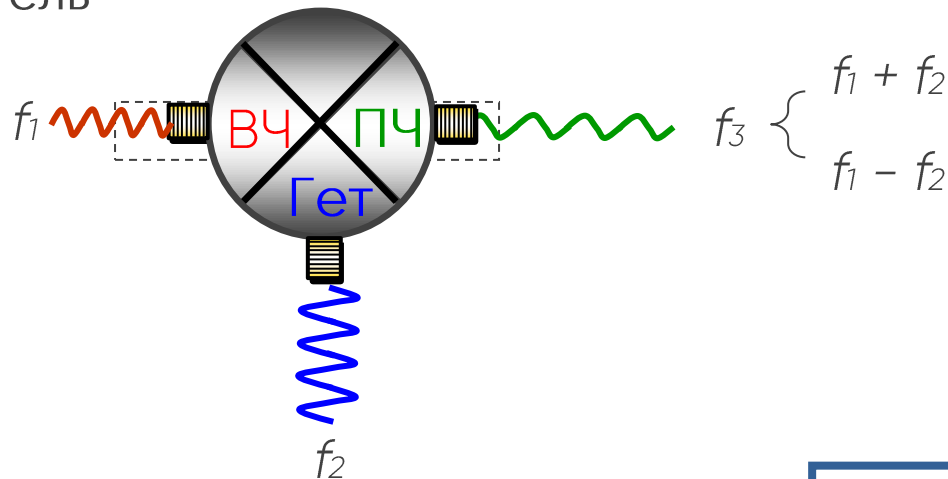
Двухсигнальная схема

- Полная 2-портовая калибровка
- Калибровка мощности источника, опорного и измерительного приемников
- Калибровка мощности вспомогательного источника
- Измерение КП в частотной точке и панорамном режиме
- Измерение мощности, гармоник и продуктов ИМИ



СМЕСИТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

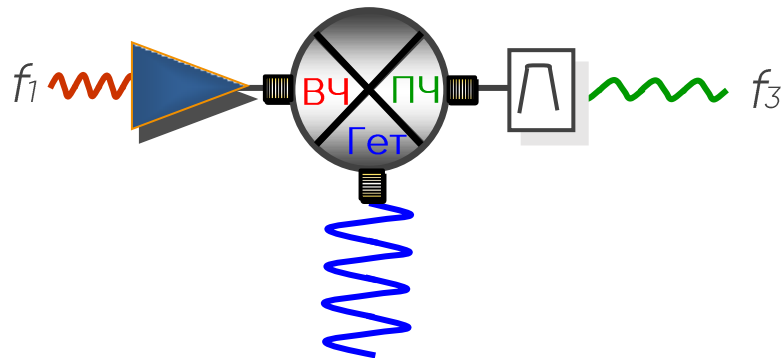
Смеситель



$$F_{\text{ПЧ}} = |n \cdot F_{\text{ВЧ}} \pm m \cdot F_{\text{гет}}|$$

обычно, $n = m = 1$

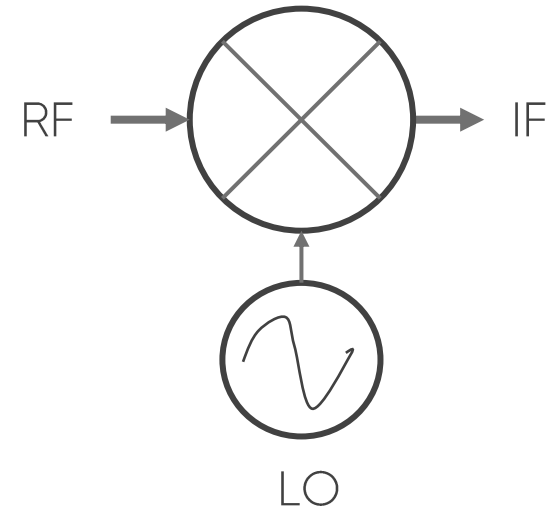
Преобразователь частоты



- Преобразование «вверх»: $f_3 > f_1$
- Преобразование «вниз»: $f_3 < f_1$
- Продукт преобразования верхнего порядка: $f_3 = f_1 + f_2$
- Продукт преобразования нижнего порядка: $f_3 = f_1 - f_2$

СМЕСИТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

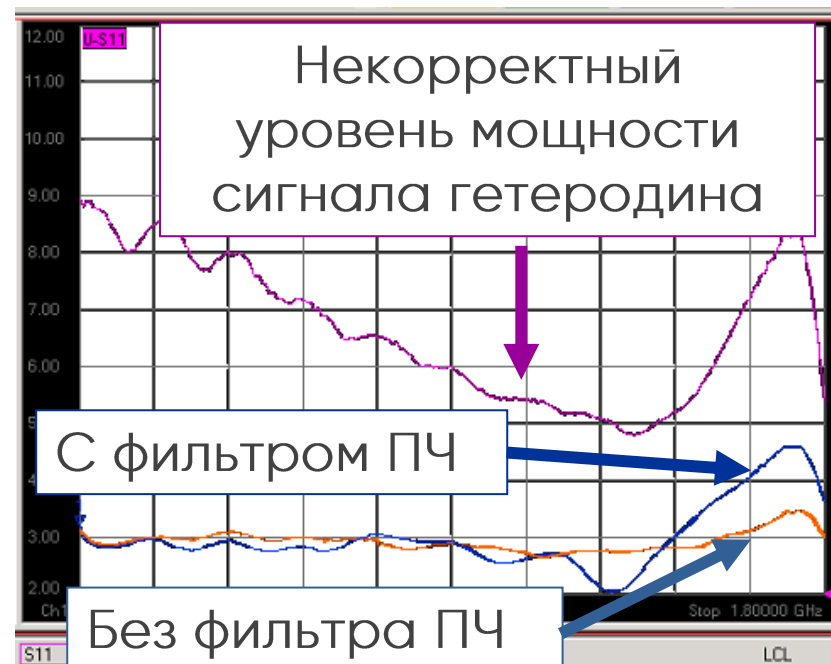
- Потери преобразования / Коэффициент усиления
- Фаза коэффициента преобразования
- Групповое время запаздывания (ГВЗ)
- Развязка
- Согласование
- Компрессия коэффициента преобразования
- Интермодуляционные искажения
- Коэффициент шума
- ACPR (мощность в соседнем канале)
- EVM (модуль вектора ошибки)



ОБРАТНЫЕ ПОТЕРИ И КСВН

Необходимо проводить измерения параметров устройства в режиме его последующей эксплуатации:

- Величина коэффициента отражения зависит от параметров других портов (например, наличие / отсутствие фильтра ПЧ)
- Необходимо обеспечивать корректный уровень сигнала гетеродина
- Необходимо обеспечивать режим согласования для портов, на которых не выполняются измерения



РАЗВЯЗКА

От гетеродина к ВЧ

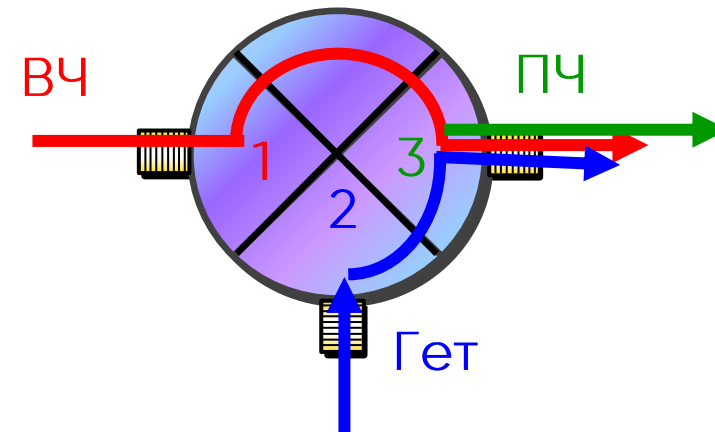
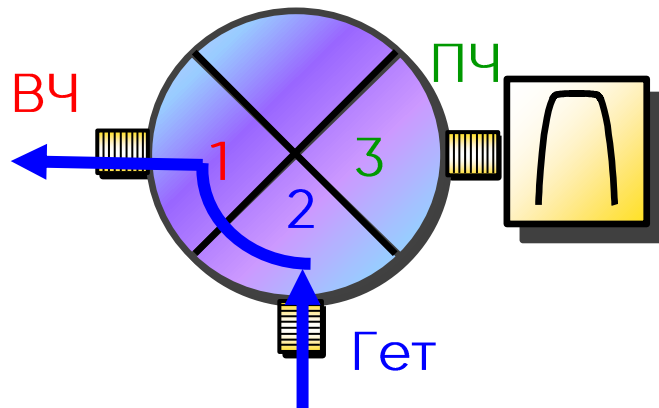
$$S_{12} = \frac{V_{\text{Гет}}(1)}{V_{\text{Гет}}(2)} \Big|_{V_{\text{ПЧ}}(3) = 0}$$

От гетеродина к ПЧ

$$S_{32} = \frac{V_{\text{Гет}}(3)}{V_{\text{Гет}}(2)}$$

от ВЧ к ПЧ

$$S_{31} = \frac{V_{\text{ВЧ}}(3)}{V_{\text{ВЧ}}(1)}$$



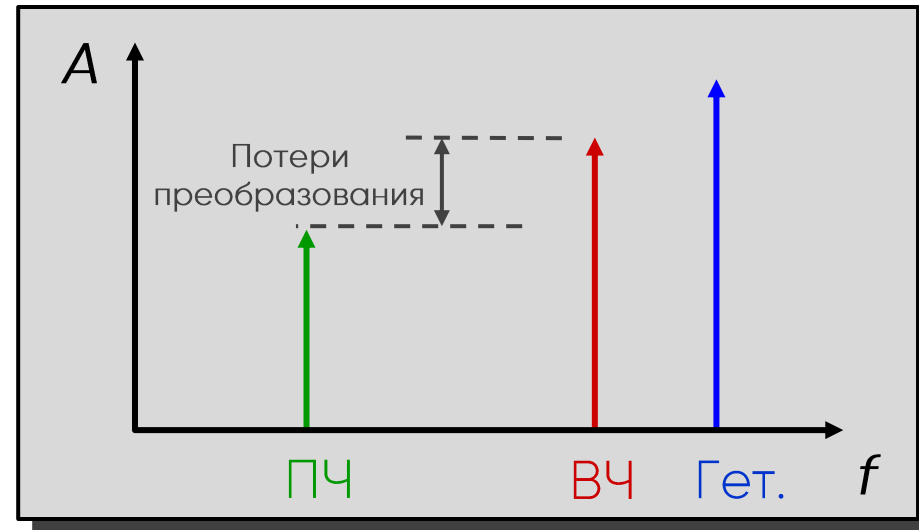
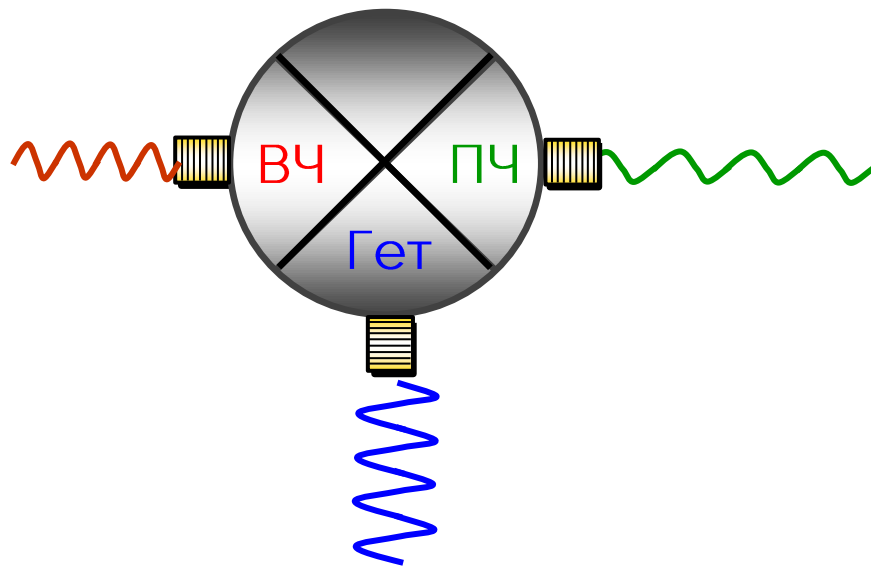
Установите мощность гетеродина →
 Обеспечьте согласование на выходе ПЧ →
 Измерьте сигнал на выходе ПЧ

Установите мощность гетеродина →
 Исключите фильтр на выходе ПЧ →
 Измерьте сигнал на выходе ПЧ

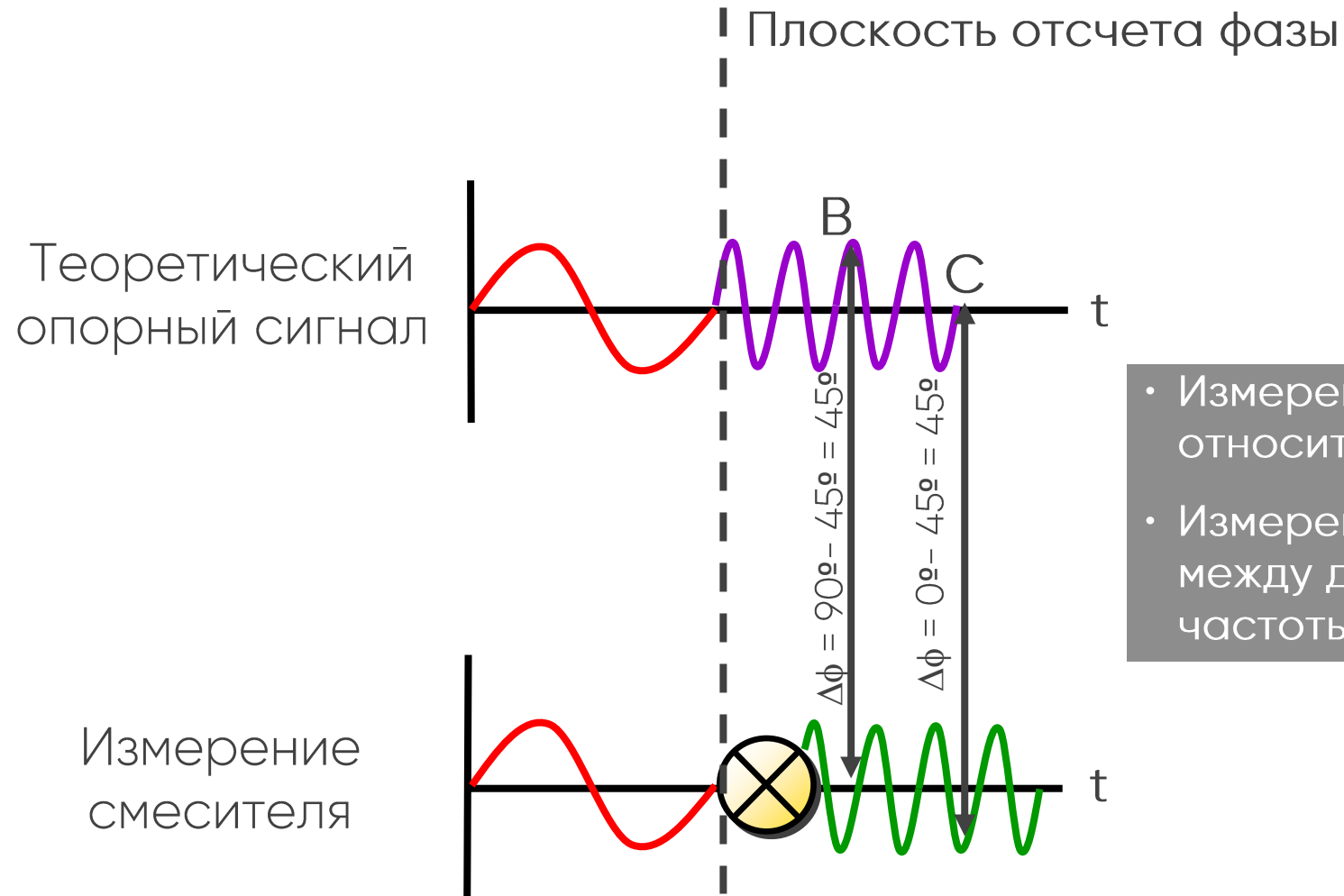
ПОТЕРИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ / КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ

$$\text{Потери преобразования (дБ)} = 10 \log \frac{\text{ВЧ мощность (мВт)}}{\text{ПЧ мощность (мВт)}}$$

Является функцией мощности сигнала гетеродина



ФАЗА КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ



- Измерение фазы является относительным
- Измерения должны выполняться между двумя сигналами одной частоты

СКАЛЯРНАЯ КАЛИБРОВКА СМЕСИТЕЛЕЙ

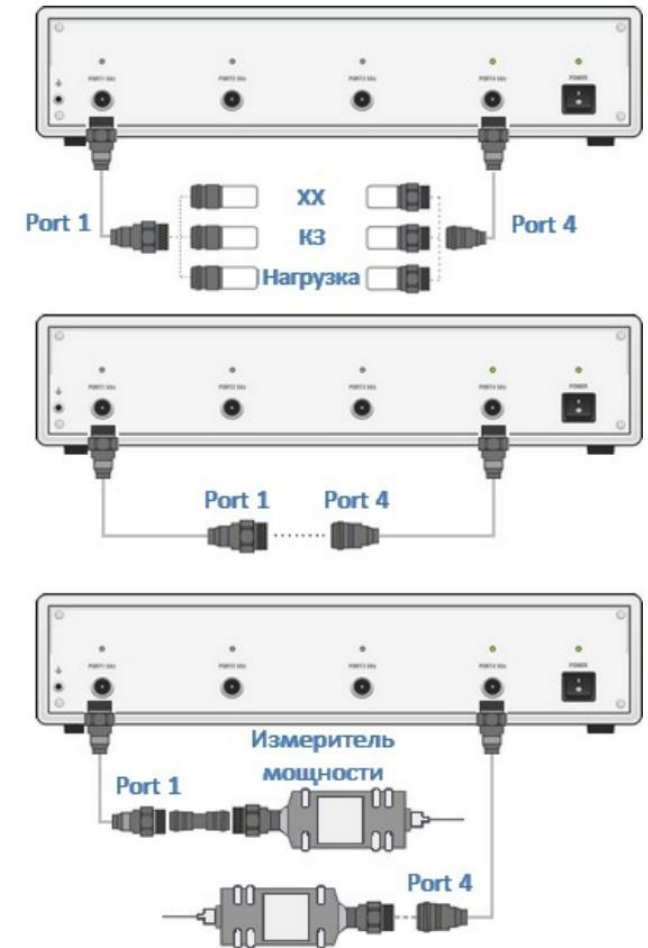
Наиболее точный метод калибровки, используемый для измерения смесителей в режиме смещения частоты

Скалярная калибровка смесителей позволяет измерять:

- параметры отражения S_{11} и S_{22} в векторной форме
- параметры передачи S_{21} и S_{12} в скалярной форме

Скалярная калибровка смесителей требует применения:

- калибровочных мер КЗ, XX, нагрузки либо АКМ
- измерителя мощности



Скалярная калибровка смесителей

ВЕКТОРНАЯ КАЛИБРОВКА СМЕСИТЕЛЕЙ

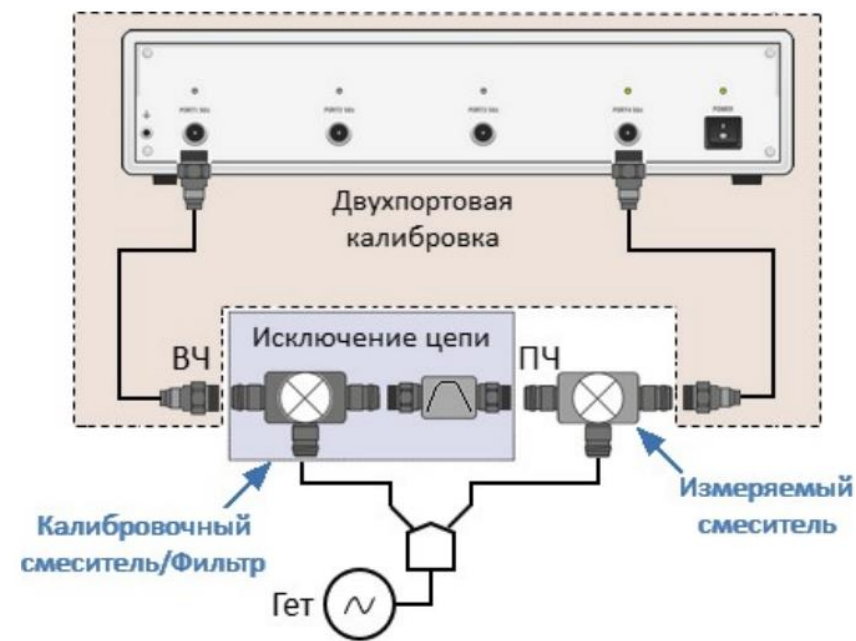
Позволяет измерять в векторной форме как параметры отражения и параметры передачи, в том числе фазу и ГВЗ коэффициента передачи

Скалярная калибровка смесителей позволяет измерять:

- параметры отражения S_{11} и S_{22} в векторной форме
- параметры передачи S_{21} и S_{12} в векторной форме

Скалярная калибровка смесителей требует применения:

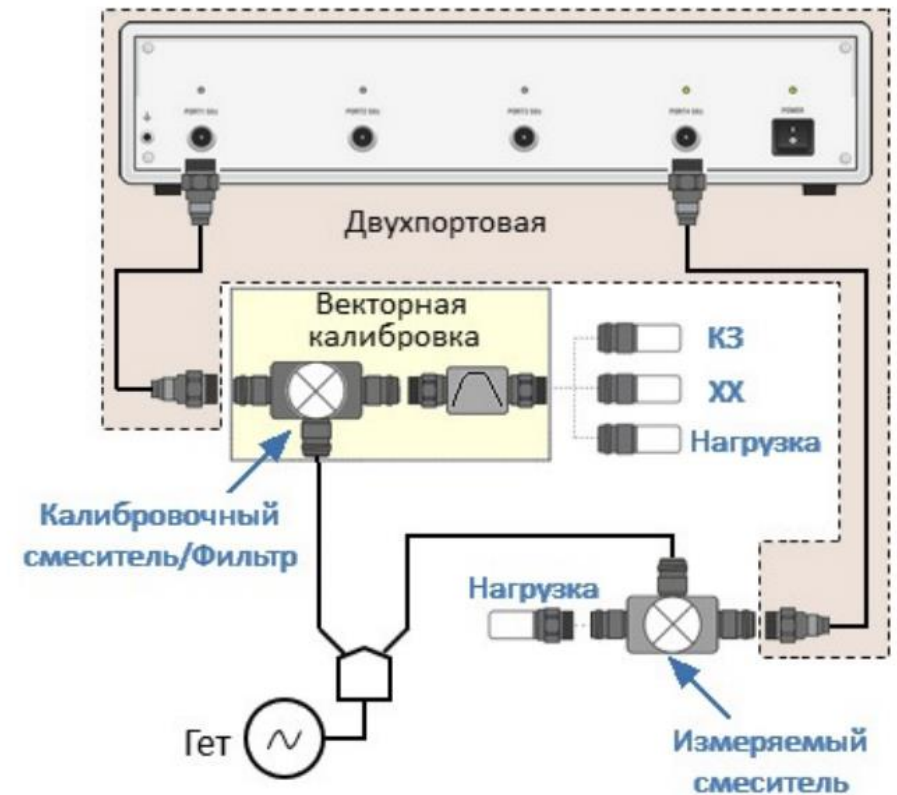
- калибровочных мер КЗ, ХХ, нагрузки либо АКМ
- калибровочного смесителя и фильтра для выделения частоты ПЧ, на которой будут проводиться измерения измеряемого смесителя



Векторные измерения смесителей

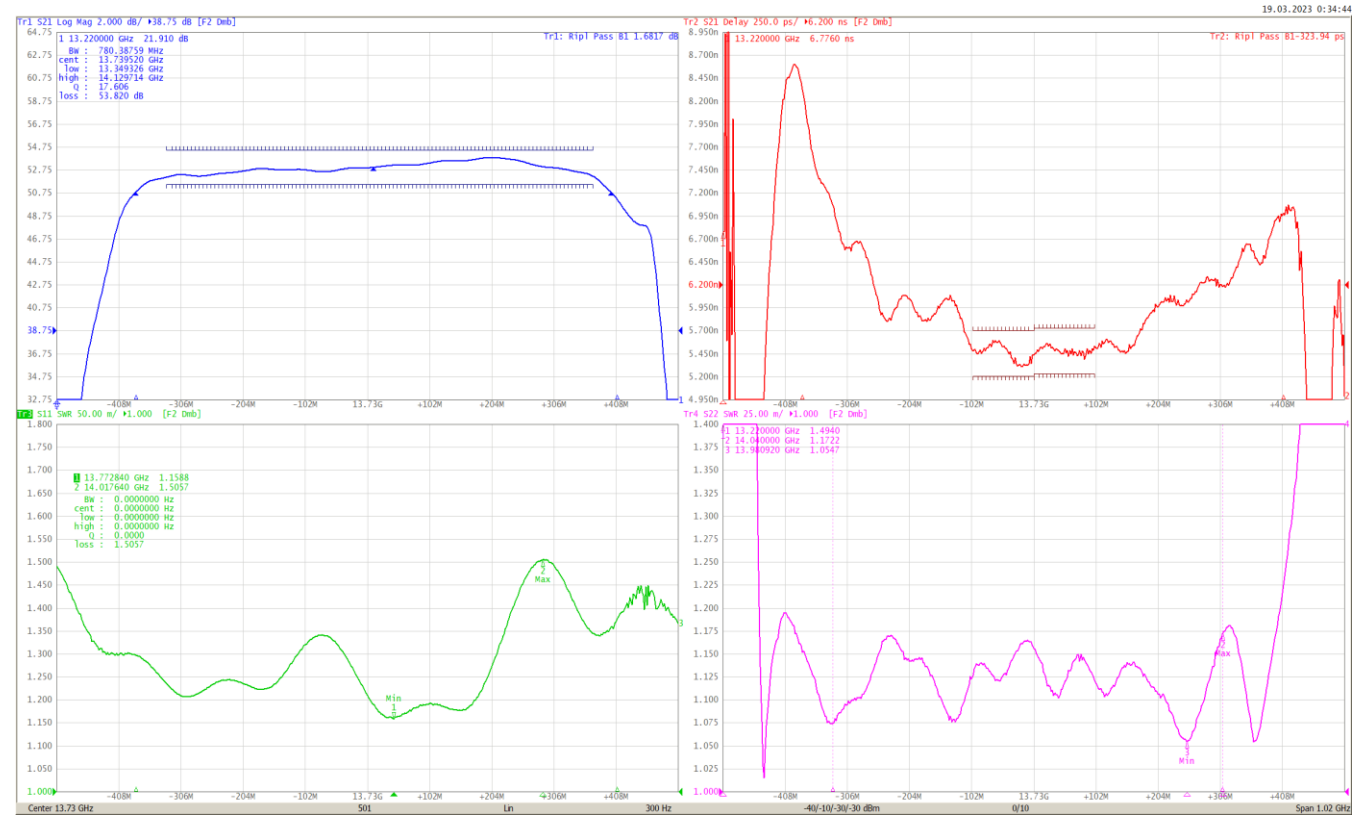
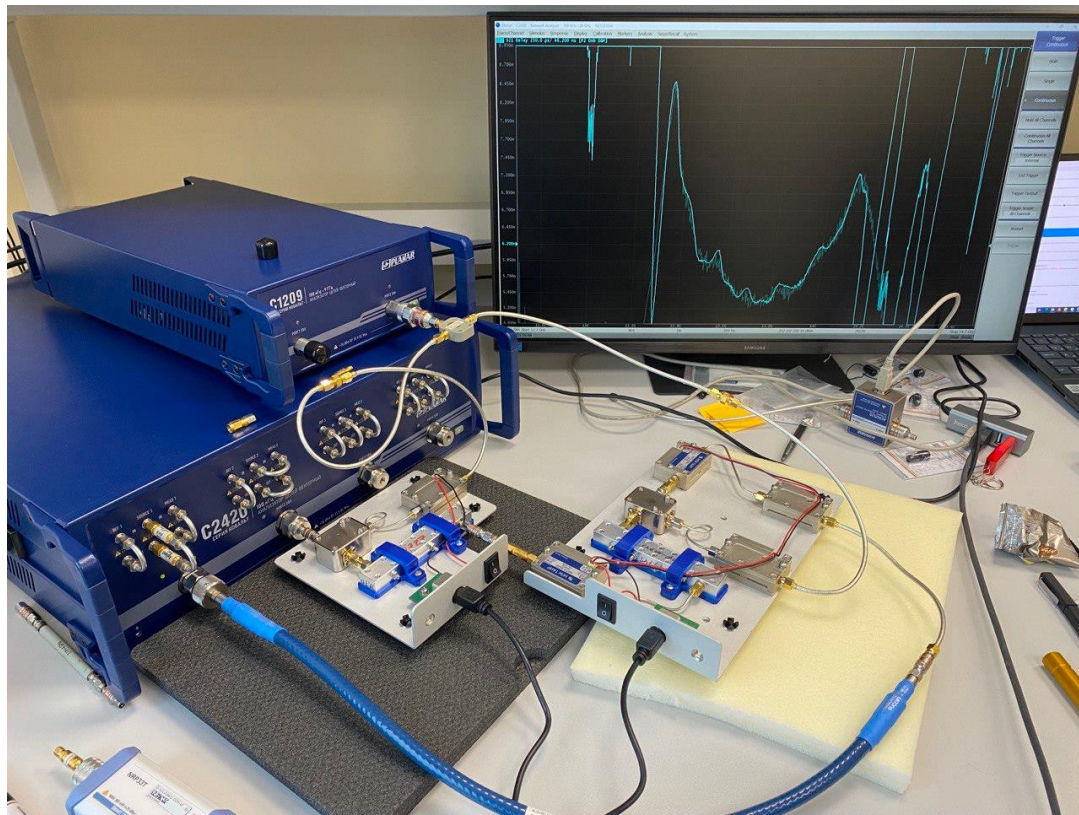
ТРЕБОВАНИЯ К КАЛИБРОВОЧНОМУ СМЕСИТЕЛЮ

- Диапазон частот калибровочного смесителя должен быть равен или превышать диапазон частот измеряемого смесителя
- Калибровочный смеситель должен быть взаимно обратным в диапазоне частот измеряемого смесителя (амплитуда и фаза равны как в направлении преобразования вверх, так и в направлении преобразования вниз)
- Потери преобразования в каждом направлении должны быть менее 10 дБ при использовании калибровочного смесителя с фильтром ПЧ
- Полоса пропускания фильтра ПЧ должна соответствовать типу преобразования ВЧ в ПЧ



Векторная калибровка смесителей

ВЕКТОРНАЯ КАЛИБРОВКА СМЕСИТЕЛЕЙ



Результат измерения параметров конвертера KU-диапазона

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

