СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

А.А. Данилин

Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ»
(2 редакция)

Электронный конспект лекций. Часть 2

Санкт-Петербург
2025 г.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

А.А. Данилин

Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ»
(2 редакция)

Измерение параметров СВЧ устройств на фиксированных частотах

Санкт-Петербург
2025 г.

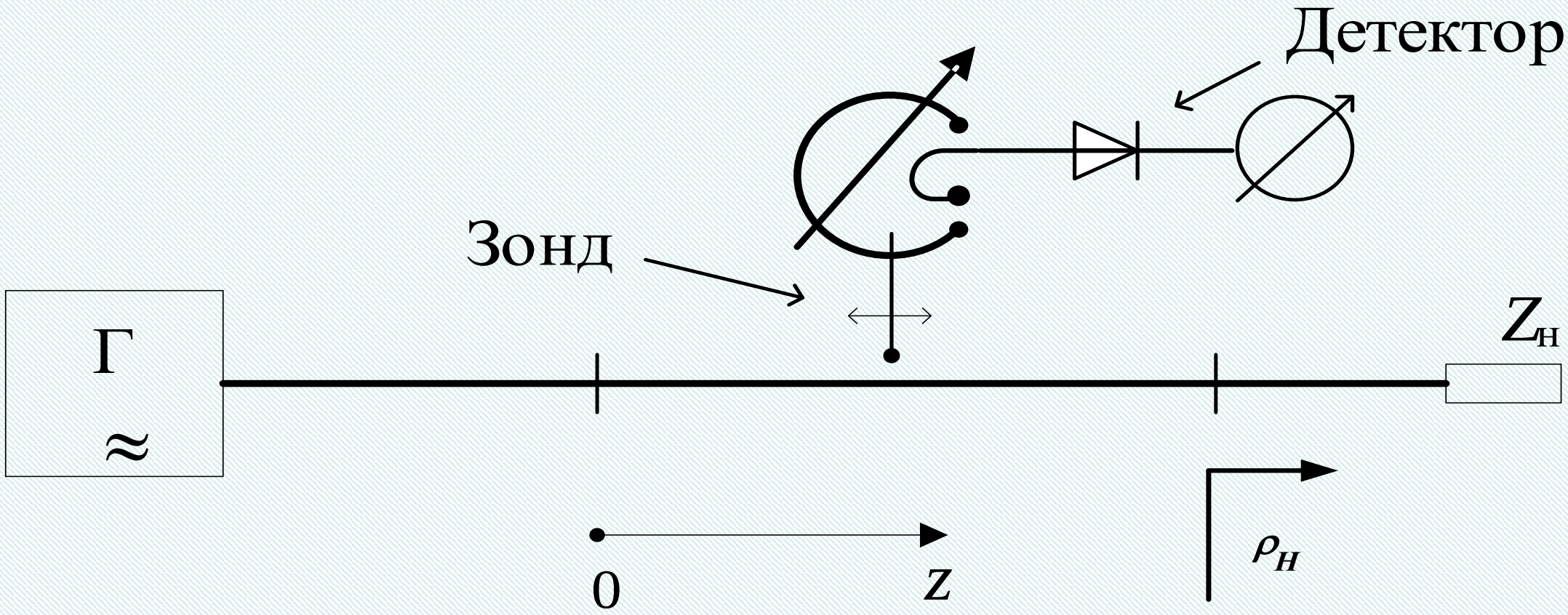
Традиционные методы измерения параметров СВЧ устройств

Традиционные «одночастотные» методы, простые и дешевые, обладающие в ряде случаев достаточно высокой точностью. Используют стандартные СВЧ элементы и применяются с начала развития СВЧ техники. Объединяет их главная особенность – измерение параметров СВЧ устройств производится в отдельных частотных точках - в отличие от панорамных приборов.

К таким приборам и методам измерений относят:

- измерительные линии
- приборы, использующие *методы замещения*
- мостовые способы измерения (*методы уравновешивания*)

Измерительная линия (ИЛ)



СВЧ тракт ИЛ с генератором СВЧ, исследуемой нагрузкой Zн и измерительной линией (включающей отрезок линии передачи, перемещаемую измерительную головку с зондом, резонатором и детектором СВЧ).

Основные задачи, решаемые с помощью измерительной линии:

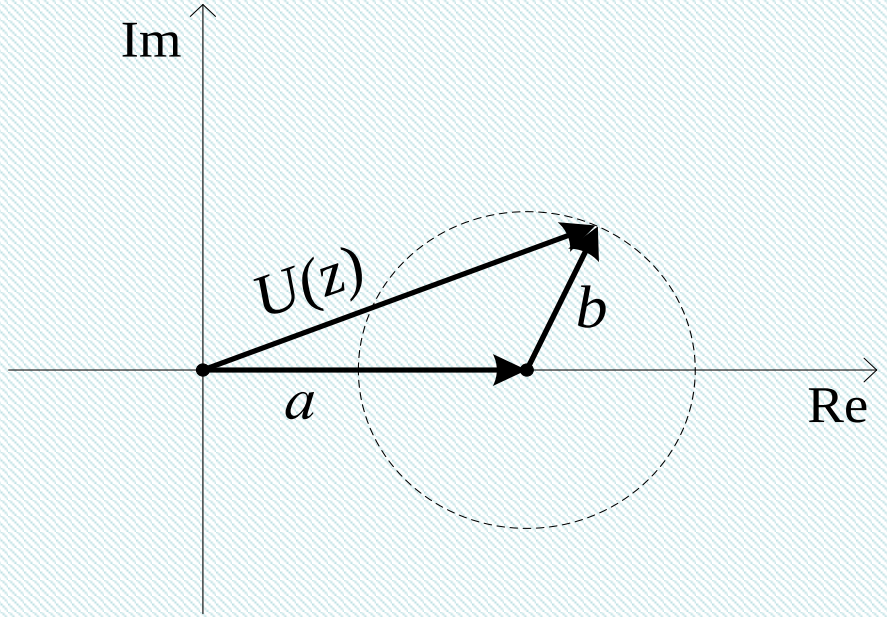
- *Измерение распределения поля вдоль линии передачи (актуально для линий с потерями – например для измереия фактора потерь в диэлектрике);*
- *Измерение длины волны в линии передачи;*
- *Измерение КСВН;*
- *Измерение аргумента коэффициента отражения и – расчетным путем – комплексного коэффициента отражения;*

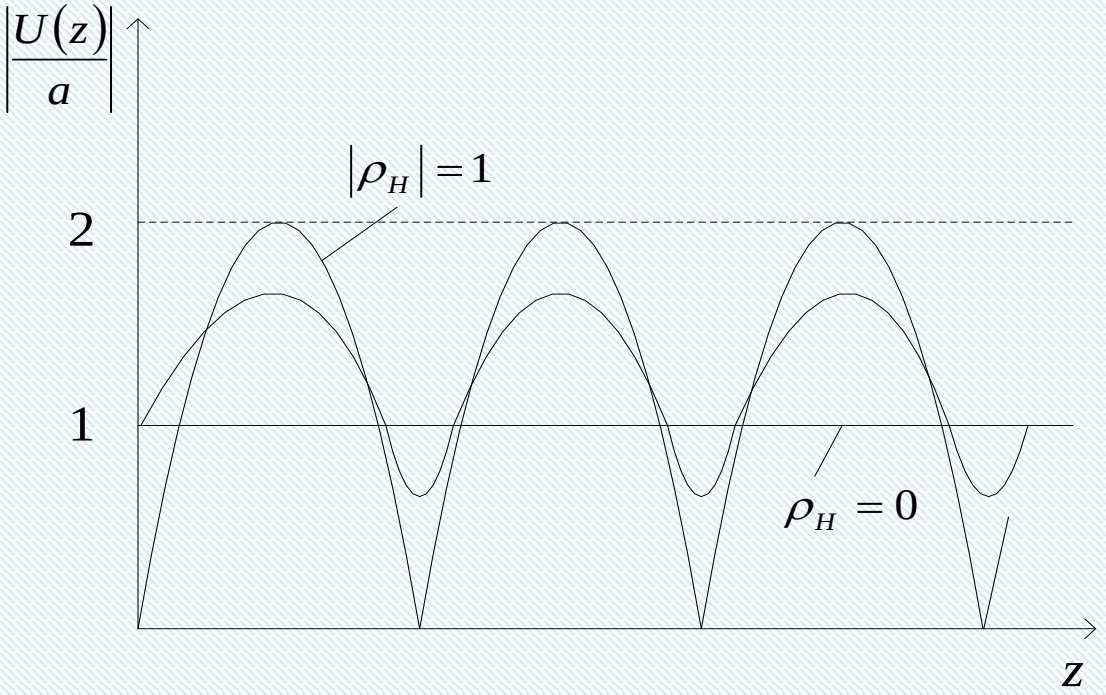
Сигнал векторной суммы падающей и отраженной волн в точке расположения зонда. Зависит от модуля и фазы коэффициента отражения нагрузки.

$$\frac{|U(z)|}{|a|} = \sqrt{\left(1 + |\rho_н|^2 + 2|\rho_н|\cos(2k_z z + \varphi_\rho)\right)}$$

Период распределения напряжения суммы двух волн равен половине длины волны в линии передачи Λ.

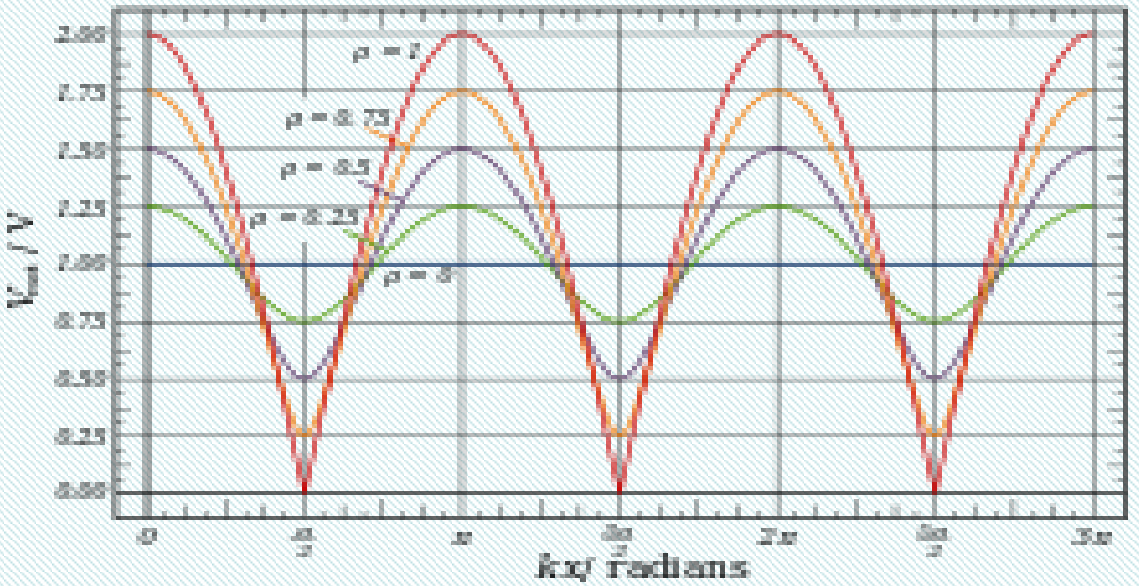
$$\cos(2k_z(z + \frac{\Lambda}{2}) + \phi_\rho) = \cos(2k_z z + \phi_\rho)$$





Распределение амплитуды поля вдоль линии передачи: а – векторная диаграмма сложения волн; б – продольное распределение амплитуды для разных коэффициентов отражения. При (|ρн| = 1) имеет вид модуля синусоидальной функции

$$\frac{|U(z)|}{|a|} = 2 \cdot \left| \sin(kz + \frac{\varphi_\rho}{2}) \right|$$



Методы измерения КСВН с помощью ИЛ

- метод *непосредственного отсчета*;
- метод «*удвоенного минимума*»;
- метод «*калиброванного аттенюатора*».

1. Метод непосредственного отсчета основан на измерении отношения максимального и минимального уровней распределения поля.

$$КСВН = \frac{1+|\rho_н|}{1-|\rho_н|} = \frac{U_{max}}{U_{min}}$$

Для выпрямленного тока (показания индикатора) при квадратичной характеристике детектора

$$КСВН = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}}$$

При измерении сильно отличающихся уровней сигнала возможен выход за пределы квадратичного участка характеристики детектора => увеличение погрешности для больших КСВН.

2. Метод «удвоенного минимума» - используют для больших КСВН:

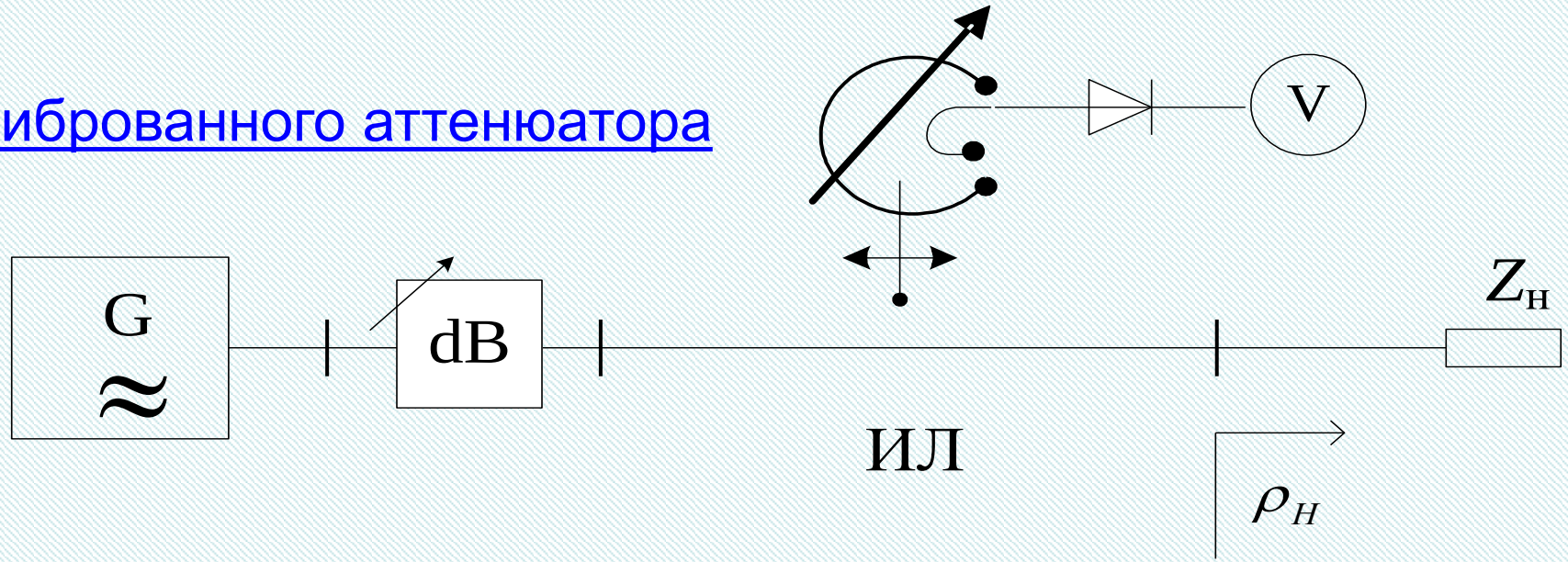
1. находят минимум стоячей волны, фиксируют его координату Z_{min} и показания индикатора I_{min};
2. передвигая индикаторную головку ИЛ в обе стороны от минимума, находят координаты точек Z_1 и Z_2, в которых *показания* индикатора *в М раз больше*, чем I_{min}. Обычно М=2, поэтому данный метод называют «метод удвоенного минимума»;
3. измеряют ширину узла стоячей волны $\Delta Z = |Z_2 - Z_1|$
4. измеряют координату второго минимума распределения и определяют Λ - длину волны в линии;
5. Рассчитывают КСВН по формуле:

$$КСВН = \sqrt{\left(1 + \frac{M-1}{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta Z}{\Lambda}\right)}\right)} \approx \sqrt{M-1} \cdot \frac{\Lambda}{\pi \cdot \Delta Z}$$

Для М=2 :

$$КСВН \approx \frac{\Lambda}{\pi \cdot \Delta Z}$$

3. Метод калиброванного аттенюатора



1. устанавливают калиброванный аттенюатор в минимальное положение A_{min} , находят минимум стоячей волны и фиксируют показания индикатора I_{min};
2. передвигая индикаторную головку ИЛ в максимум стоячей волны, одновременно увеличивают ослабление аттенюатора;
3. установив зонд в максимум, вводят такое ослабление A_{max} , при котором показания индикатора равны I_{min} . Тогда искомое значение КСВН равно

$$КСВН, дБ = (A_{\max} - A_{\min}), дБ \qquad КСВН = 10^{\frac{A_{\max} - A_{\min}}{20}}$$

Измерение аргумента комплексного коэффициента отражения с помощью ИЛ

Измерение *фазового угла* φр через сдвиг минимума распределения в линии ΔZmin относительно заранее выбранной отсчетной плоскости («условного конца» линии Z_{min0}). *Условным концом* называют координату по оси линии, отстоящую от точки расположения нагрузки на целое число полуволн.

1. Условные концы определяют при установке на конце ИЛ короткозамыкателя.

   При этом координаты минимумов попадают в точки условных концов.

2. Устанавливают исследуемую нагрузку и фиксируют новое положение минимума стоячей волны Zmin.

3. Расчет фазового угла коэффициента отражения производят по формуле:

$$\phi_\rho = \pi - 2k_z(Z_{\min} - Z_{\min 0}) = \pi - \frac{4\pi}{\Lambda}(Z_{\min} - Z_{\min 0})$$

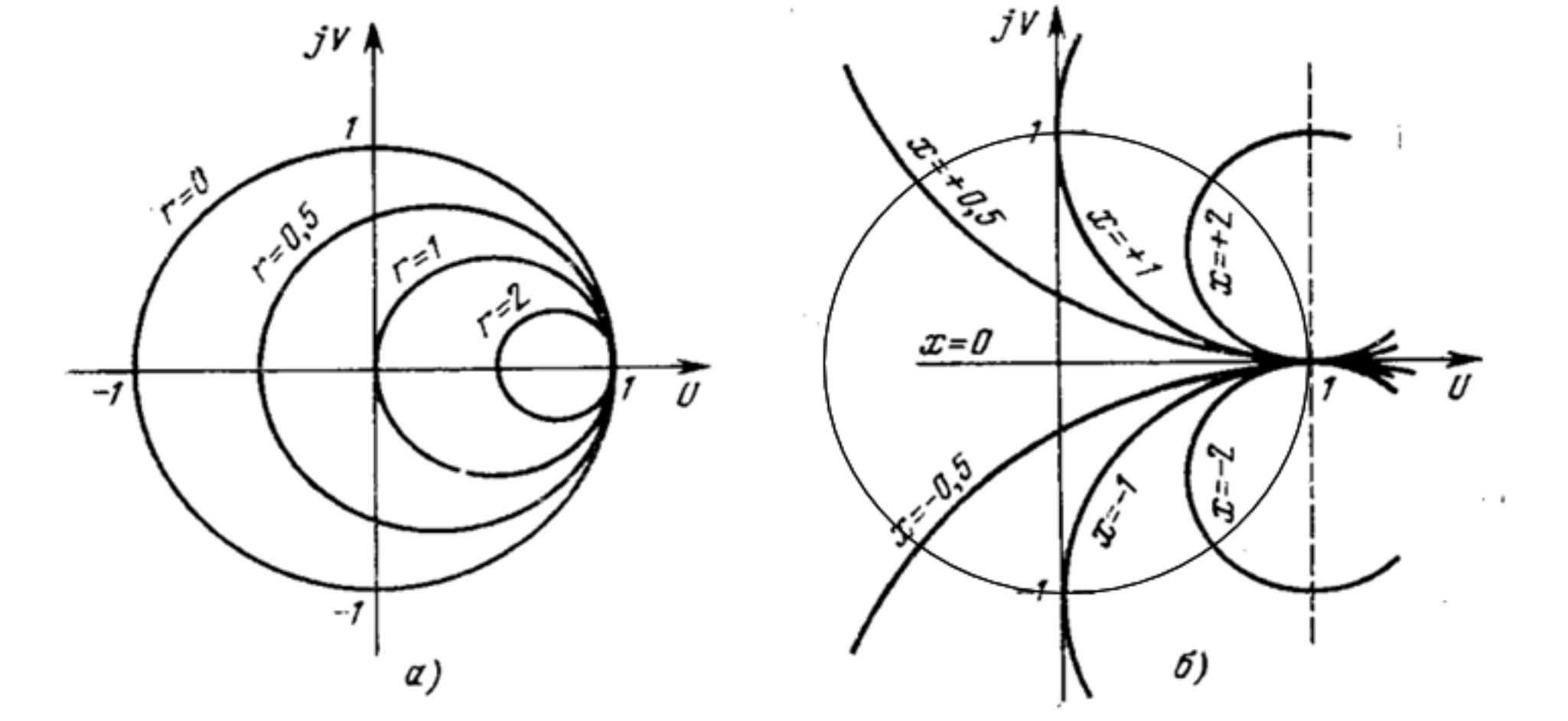
Направление смещения минимума от условного конца показывает *знак* реактивности измеряемой нагрузки. При *индуктивной* нагрузке смещение идет в сторону нагрузки, и фазовый угол коэффициента отражения лежит в пределах [0,180].

$$\frac{\Lambda}{4} > (Z_{\min} - Z_{\min 0}) > 0$$

Для *емкостной* нагрузки φр находится в пределах [-180,0] и сдвиг будет в сторону генератора

$$-\frac{\Lambda}{4} < (Z_{\min} - Z_{\min 0}) < 0$$

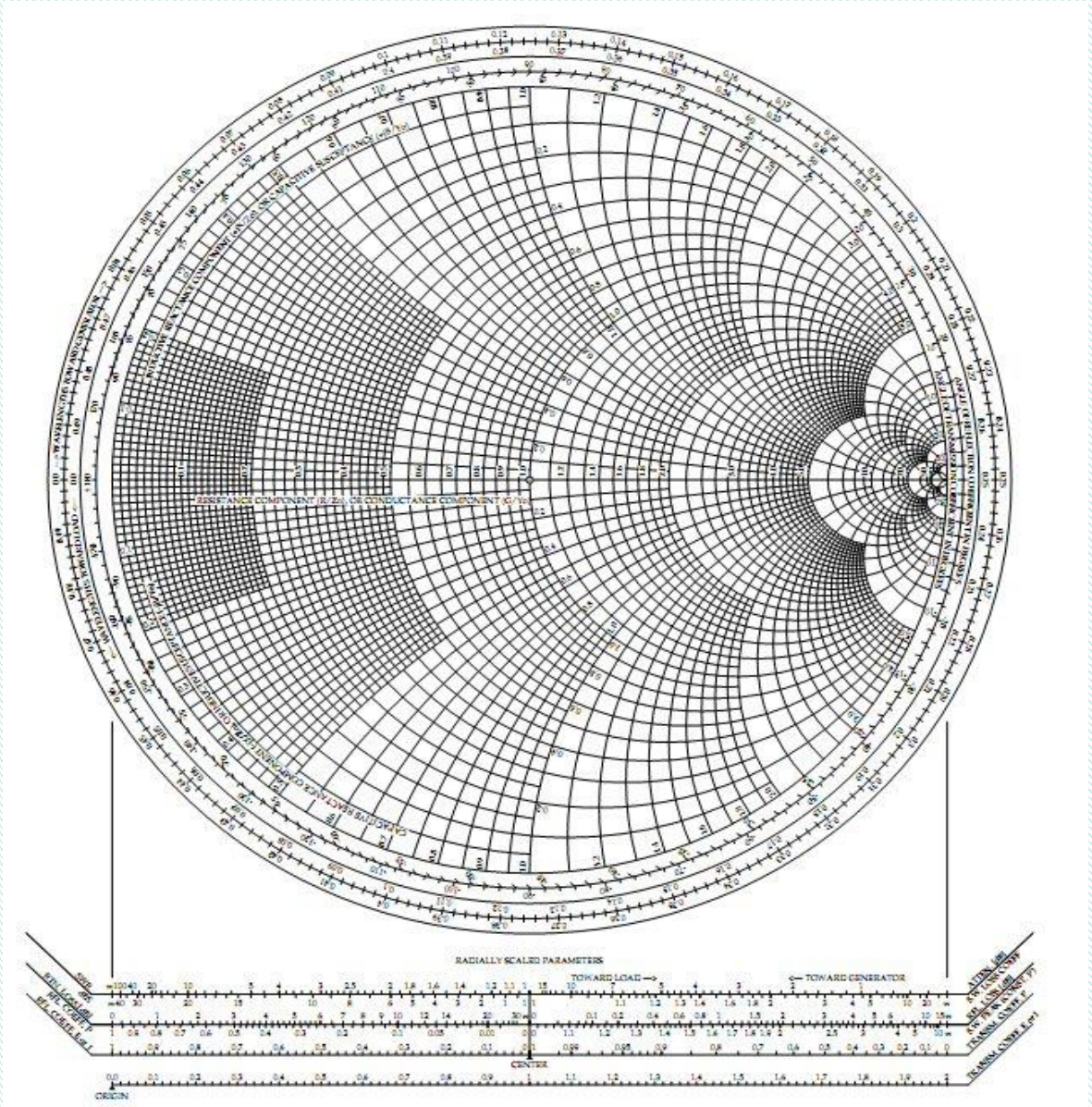
Круговая диаграмма –это отображение коэффициента отражения в полярной систем координат (годограф коэффициента отражения на комплексной плоскости)

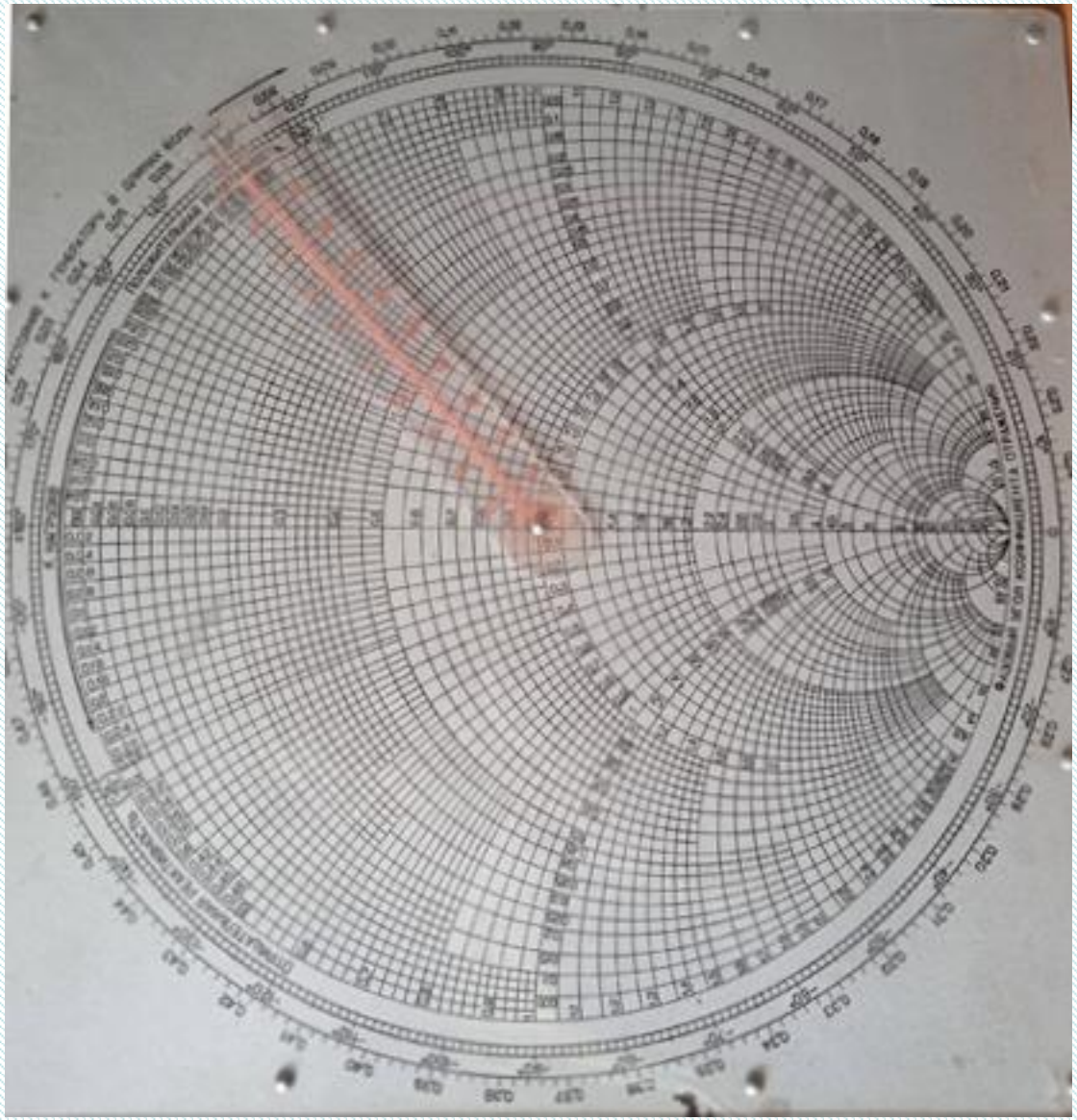


$$Z_н = \frac{1}{Y_н} = \frac{1+\rho_н}{1-\rho_н}$$

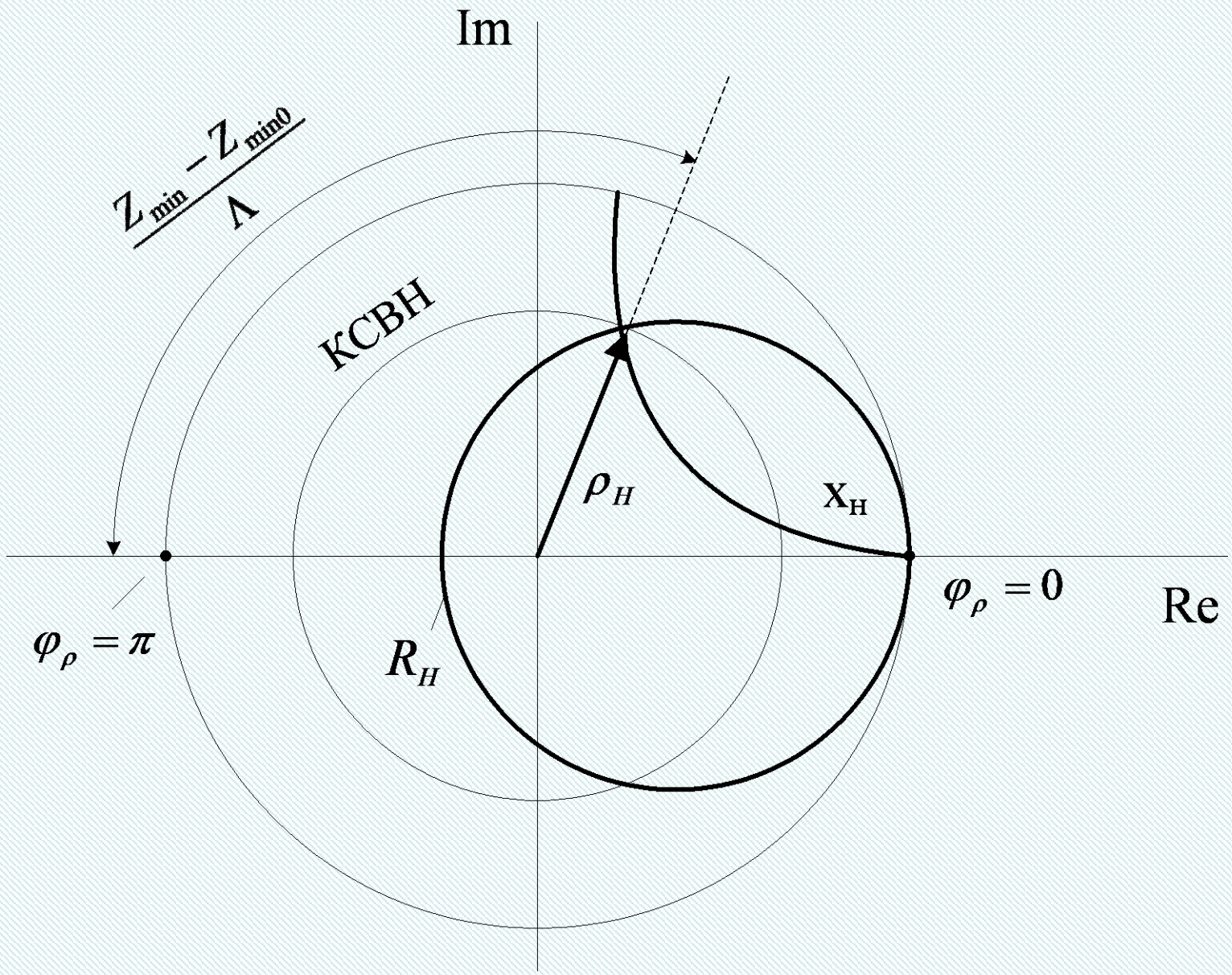
Круговая диаграмма импедансов (диаграмма Смита)

а – кривые равных активных сопротивлений; б – кривые равных реактивных сопротивлений.

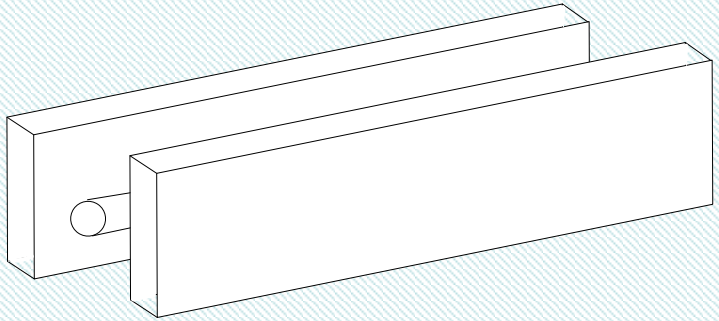

RADIALLY SCALED PARAMETERS
TOWARD LOAD →
← TOWARD GENERATOR
CENTER
ORIGIN

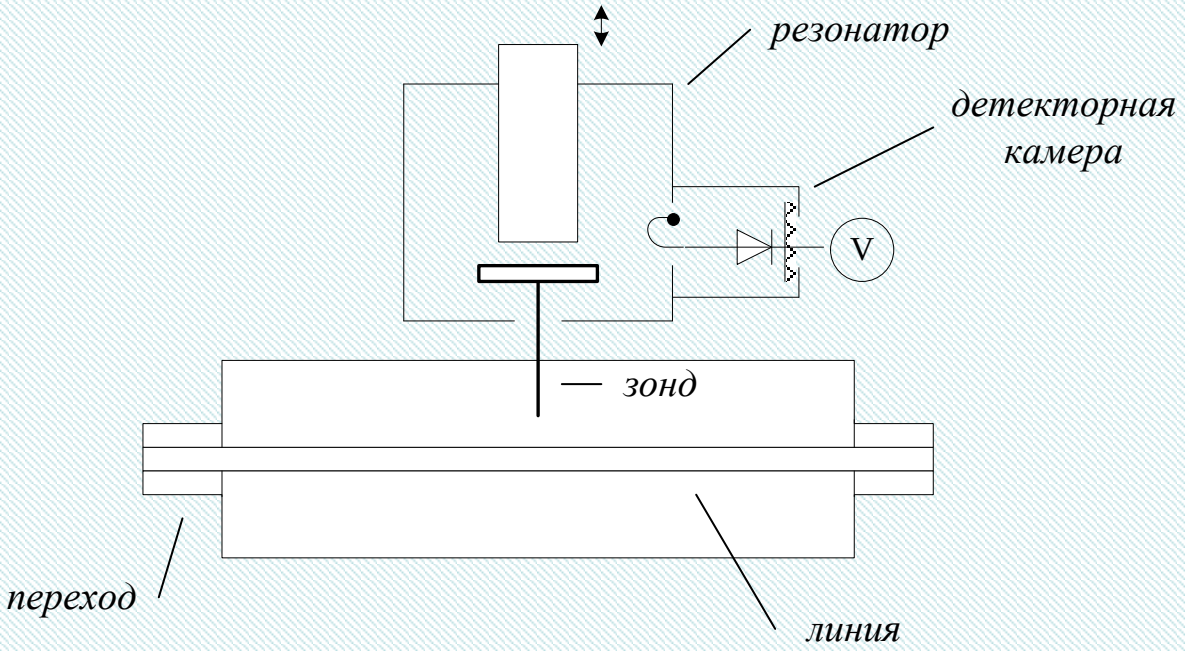


Определение коэффициента отражения и полного сопротивления нагрузки на круговой диаграмме по результатам , полученным на измерительной линии

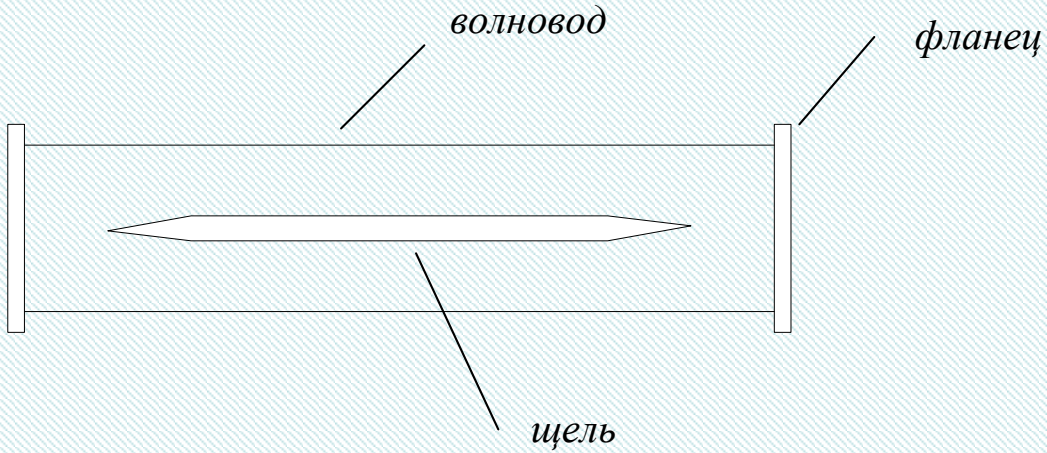


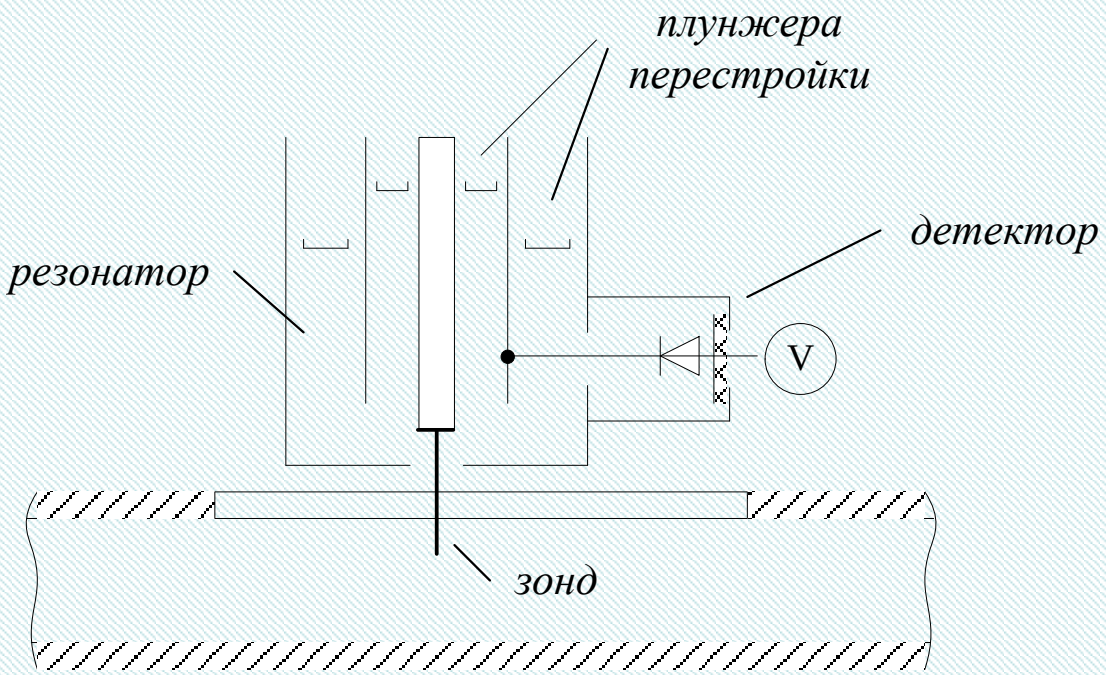
Конструкция коаксиальной и волноводной измерительных линий





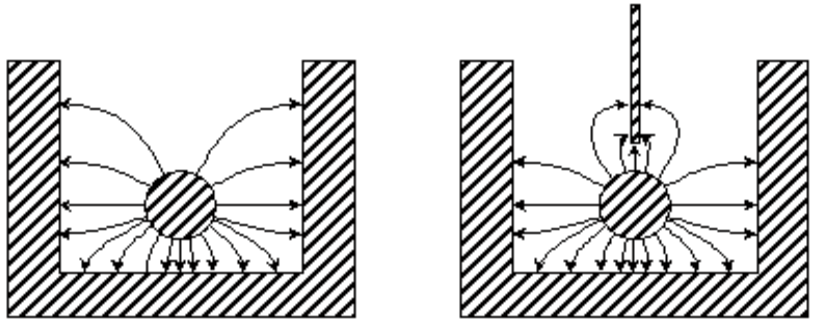
Коаксиальная ИЛ





Волноводная ИЛ

Коаксиальная измерительная линия



а) без зонда б) при наличии зонда

Рисунок 1.1 – Электрическое поле в измерительной линии.



Hewlett Packard C17540 HP 816A



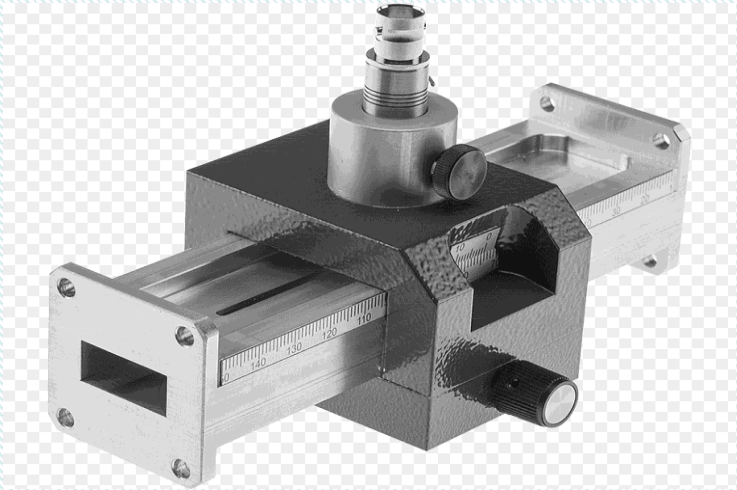




Волноводная измерительная линия



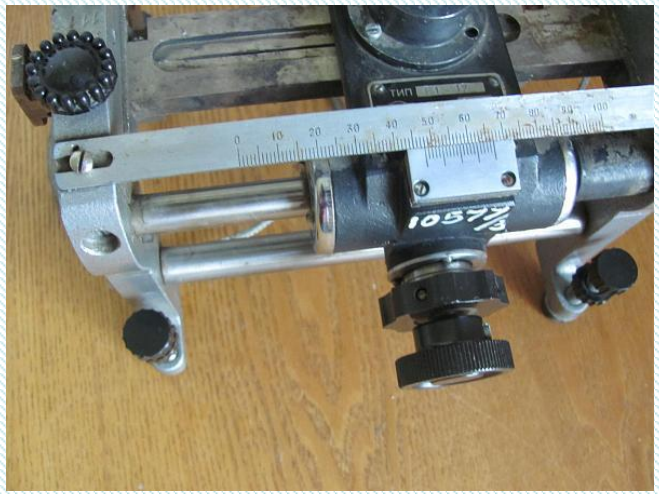
Линия Р1-4 со сменными секциями

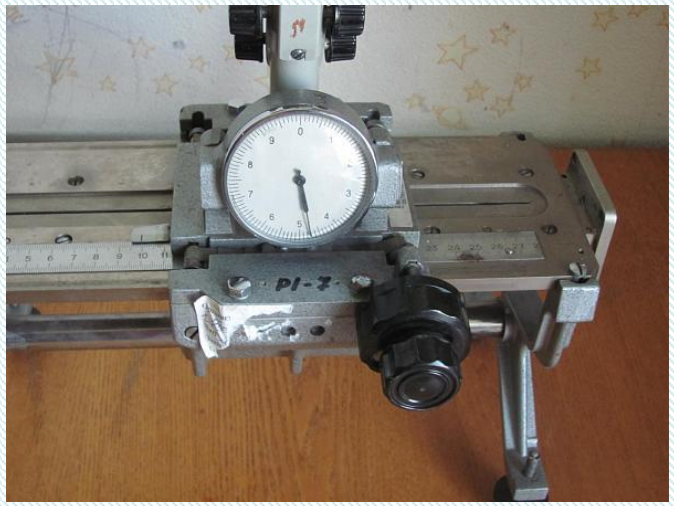


Измерительная линия без резонатора



Линия Р1-29 . 12,05-17,44 Ггц, волновод 16х8 мм



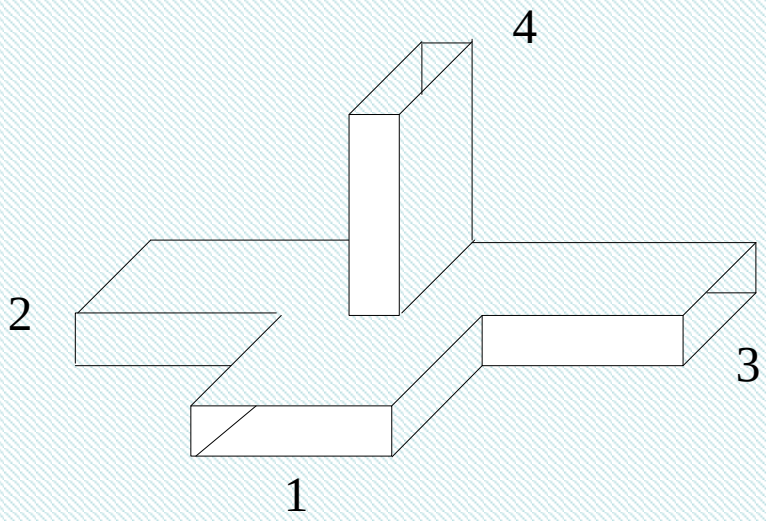


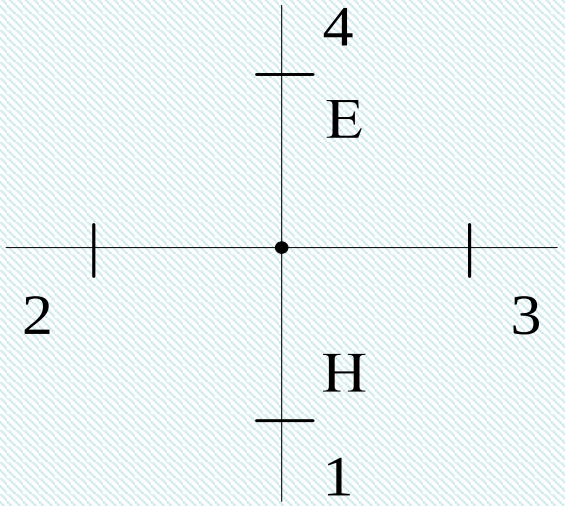
Волноводные линии с ноиусом и с микрометром

Классификация ИЛ по точности согласно ГОСТ

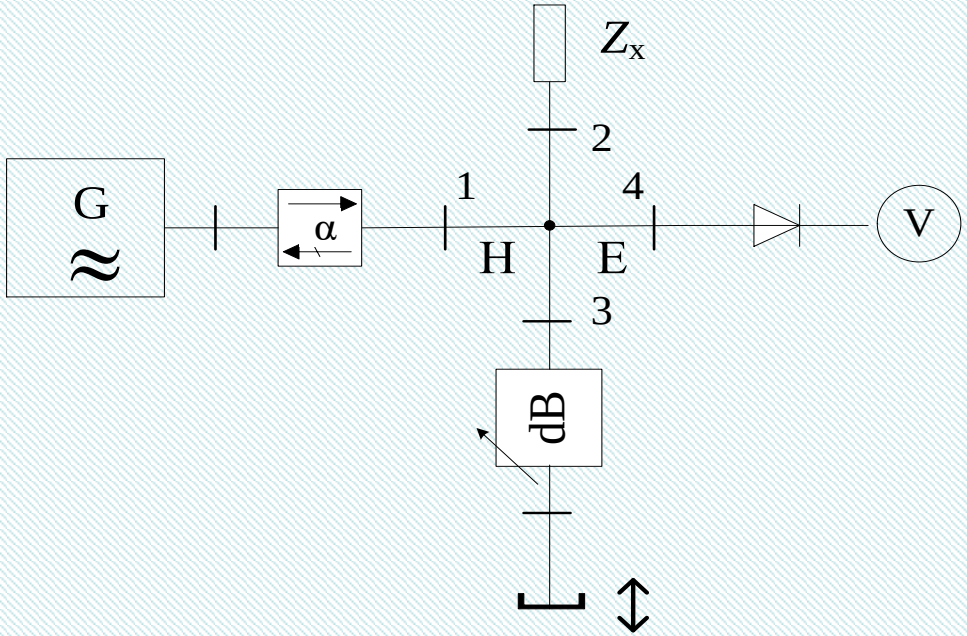
Класс по точности	Коаксиальные ИЛ		Волноводные ИЛ	
	δКСВН, %	$\Delta\varphi_\rho$, º	δКСВН, %	$\Delta\varphi_\rho$, º
1	<5.2	<5	<3	<5
2	5.2	<10	3	<10
3	12.5	<15	4	<15

Мостовые методы измерения полных сопротивлений



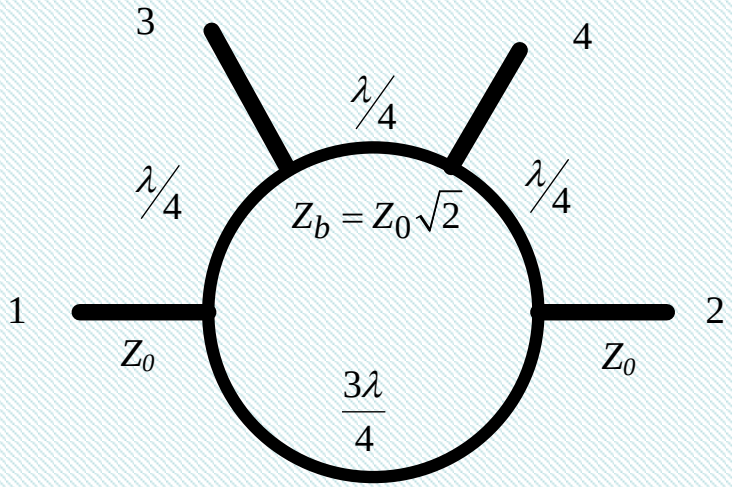


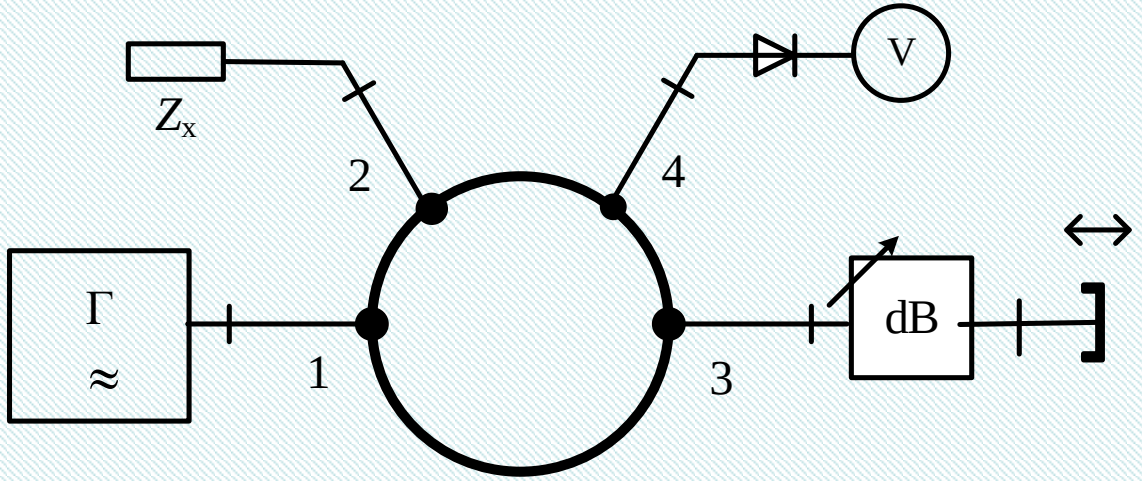
$$[S]=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}0 & 1 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 0 & -1\\ 0 & 1 & -1 & 0\end{bmatrix}$$



Генератор через развязывающий вентиль подключен к плечу H тройника; плечо E нагружено на детекторную головку.
К плечам 2 и 3 подсоединены исследуемая и образцовая нагрузки. Балансировкой моста – подбором ослабления аттенюатора и положения плунжера - добиваются нулевых показаний индикатора.

Мостовые методы для коаксиальных и полосковых трактов

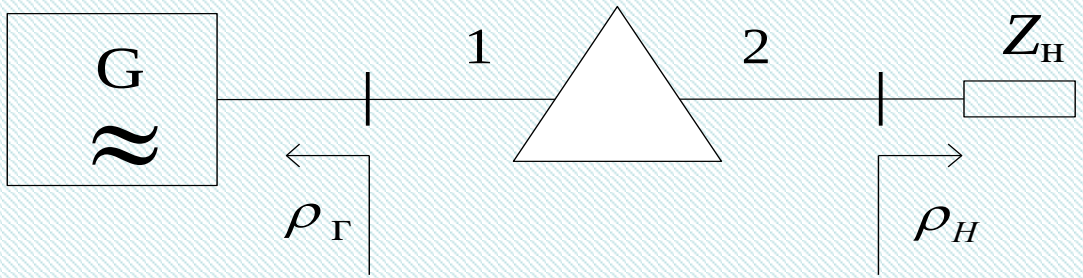


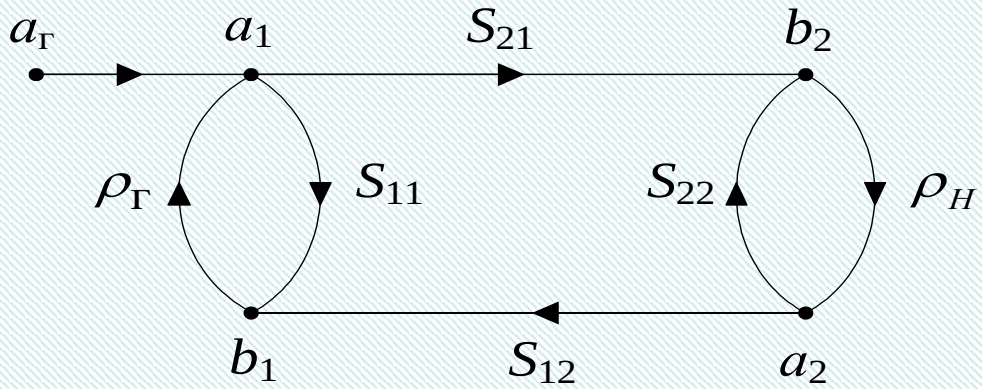


Использован синфазно-противофазный направленный ответвитель - гибридное кольцо (англ. -Rat-Race Coupler) .

В нем мощность делится между основным и дополнительным плечами пополам, а матрица рассеяния аналогична матрице волноводного двойного Т-моста.

Измерение ослабления на СВЧ

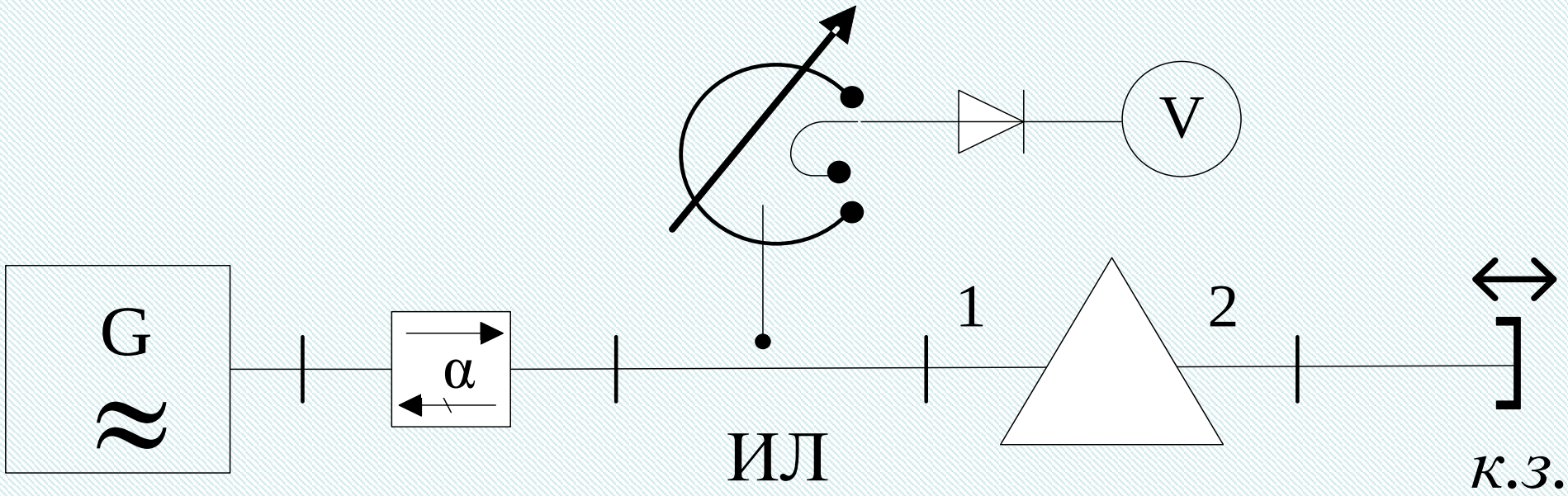




Ослабление А (и обратная ему величина - *коэффициент усиления по мощности*) показывают отношение мощностей на входе и на выходе при согласованном генераторе и нагрузке. *Потери* или *затухание L* - отношение мощностей на входе и на выходе при реальных рассогласованных генераторе и нагрузке. Разница между потерями и ослаблением называют *потерями рассогласования*.

$$L = 10\lg\left(\frac{P_{вх}}{P_{вых}}\right) = 20\lg\left(\frac{|a_1|}{|b_2|}\right) = 20\lg\left(\frac{|1-\rho_г S_{11}-\rho_н S_{22}+\rho_г\rho_н S_{21}S_{12}|}{|S_{21}|}\right) \neq A$$

Измерение ослабления с помощью ИЛ



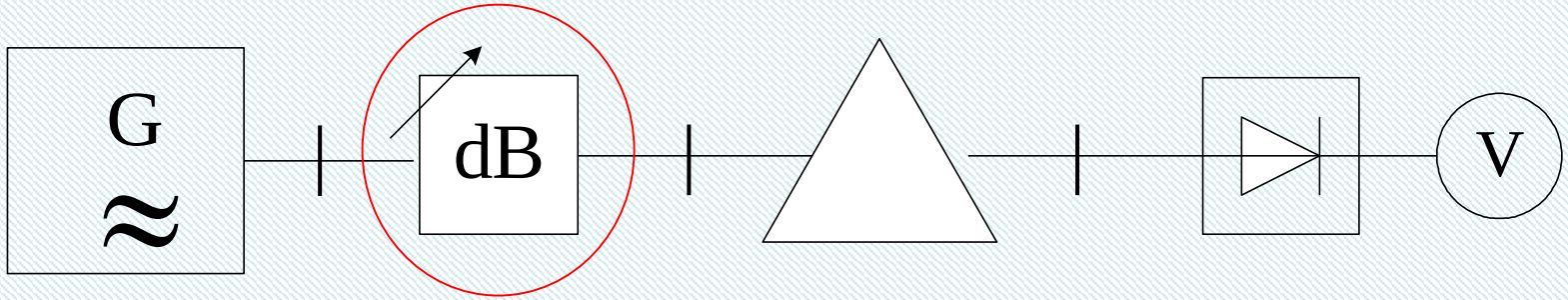
$$\rho_{изм} = S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}e^{-2i\theta_{пл}}}{1 - S_{22}e^{-2i\theta_{пл}}}$$

При небольших отражениях от выхода ($|S_{22}|<<1$) коэффициент отражения на входе определяется суперпозицией двух волн

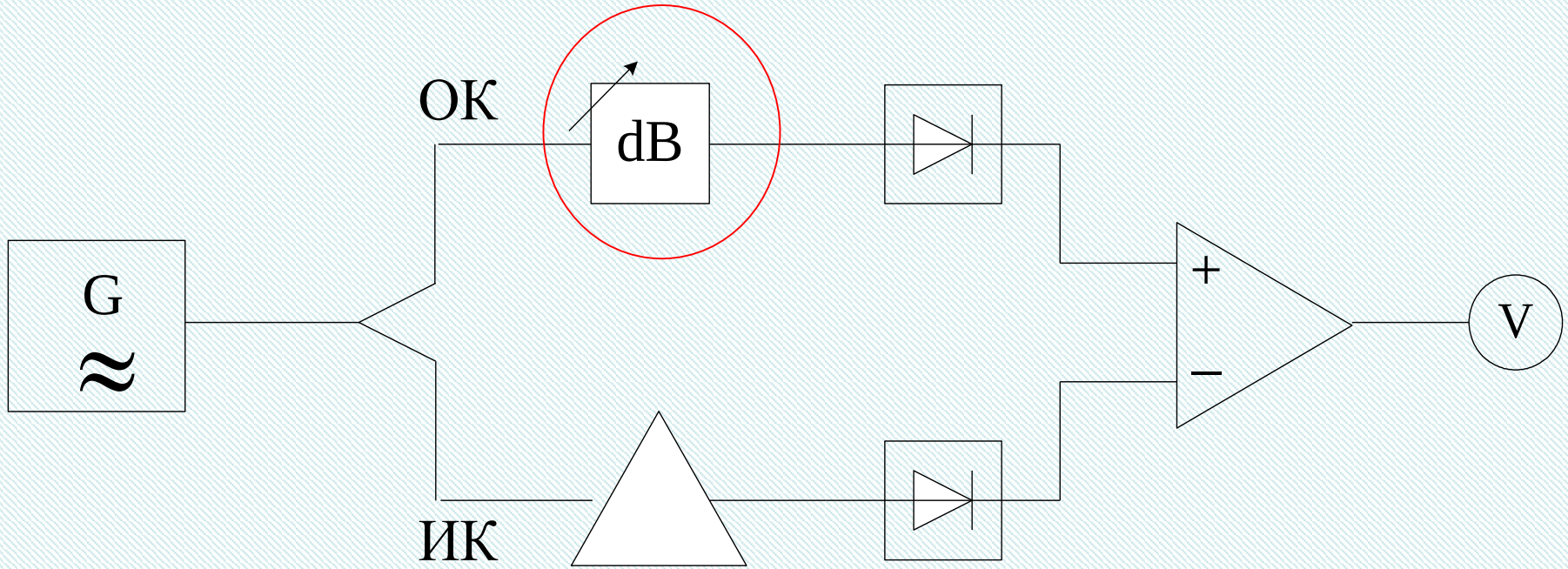
$$\rho_{изм} \approx S_{11} + S_{21}S_{12}e^{-2i\theta_{пл}}$$

Измерение ослабления методом замещения

Последовательная схема замещения



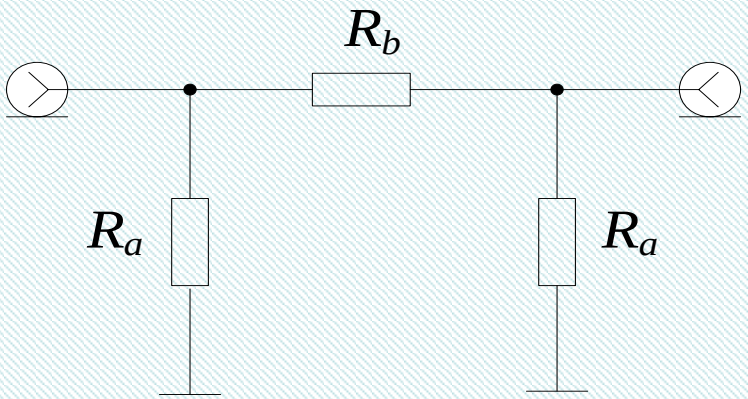
Параллельная схема замещения



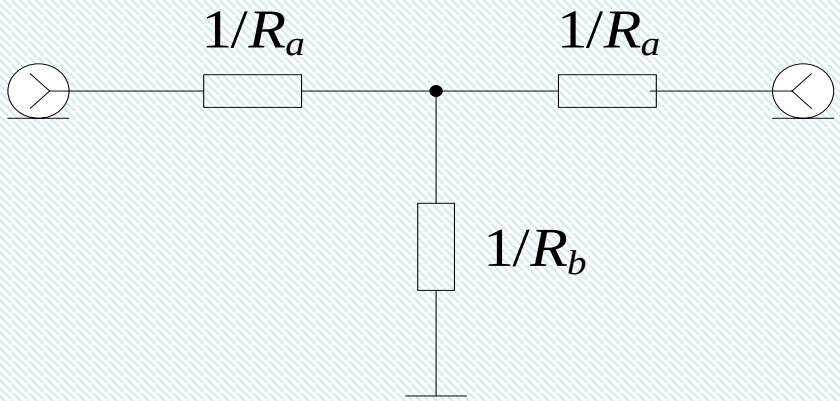
.

Фиксированные аттенюаторы (англ. pad)

П-образный аттенюатор



Т-образный аттенюатор

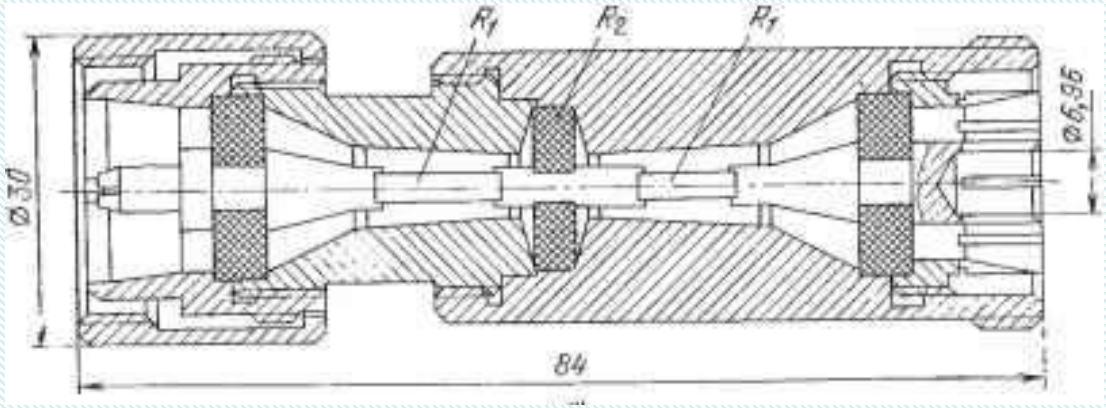


$$|S_{21}| = 10^{-\frac{A,\partial Б}{20}} \Rightarrow R_a = \frac{1+|S_{21}|}{1-|S_{21}|}, \quad R_b = \frac{1-|S_{21}|^2}{2|S_{21}|}$$

.

Измерительные аттенюаторы группы Д2



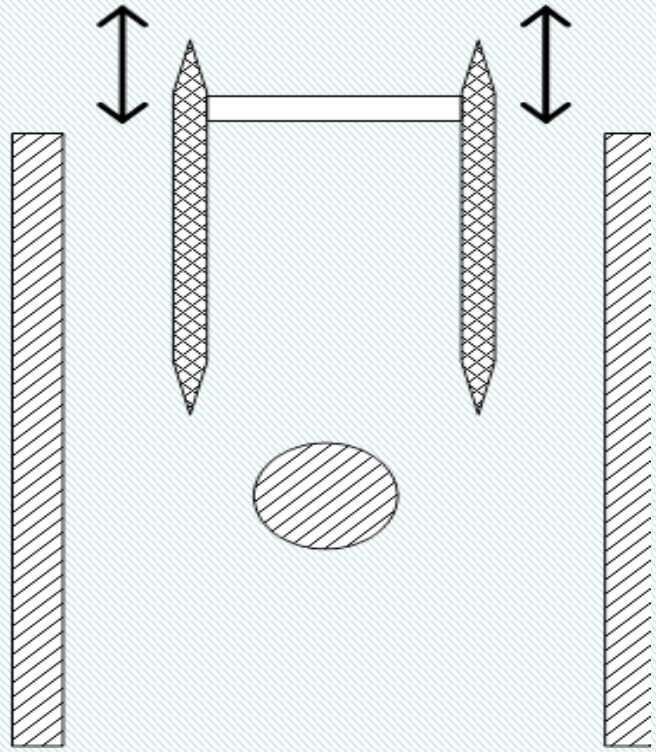






.

Поглощающие коаксиальные аттенюаторы группы Д5

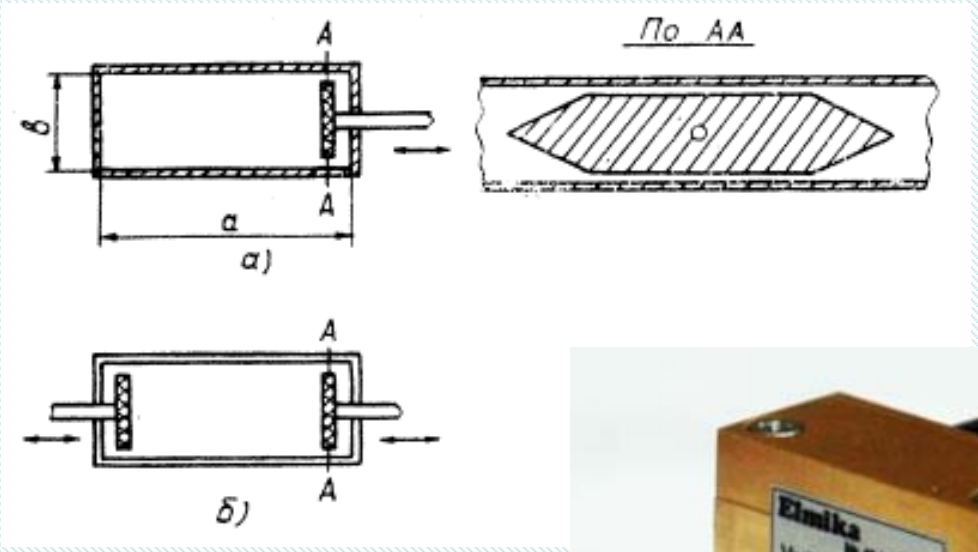


Аттенюаторы с «поглощающей пластиной». Частотозависимы и при перестройке меняют и амплитуду, и фазу проходящей волны.

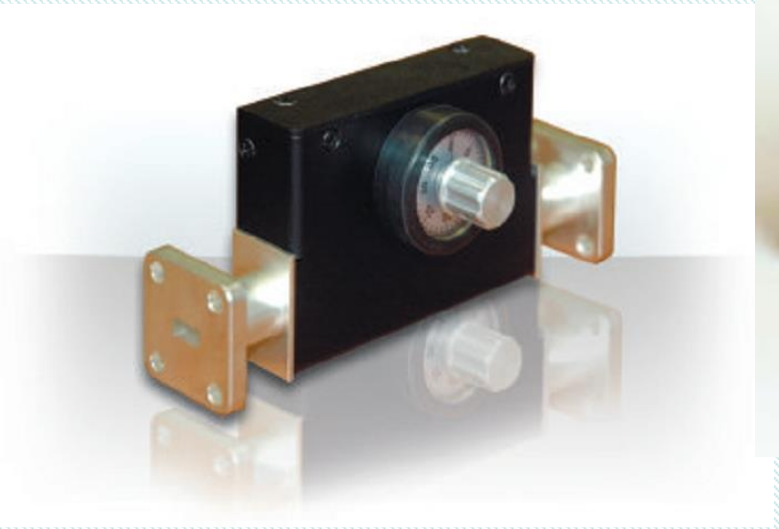


Поглощающие волноводные аттенюаторы группы Д5





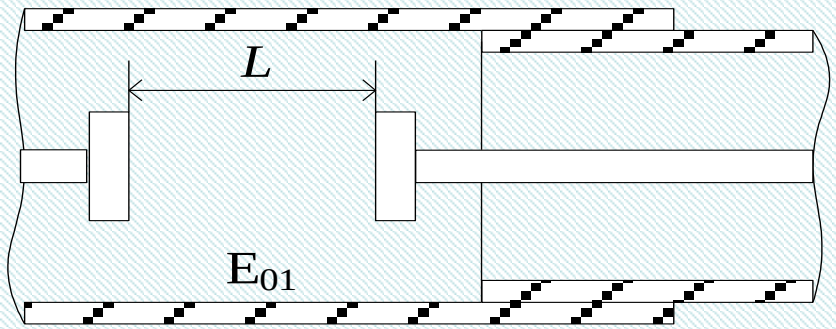


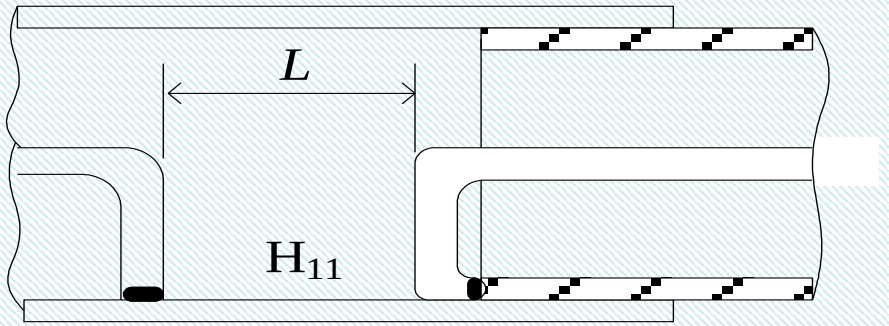




.

Предельные аттенюаторы группы Д4





$$U(z) = U_0 e^{-\alpha z}$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2 - 1} \approx \frac{2\pi}{\lambda_{кр}}$$

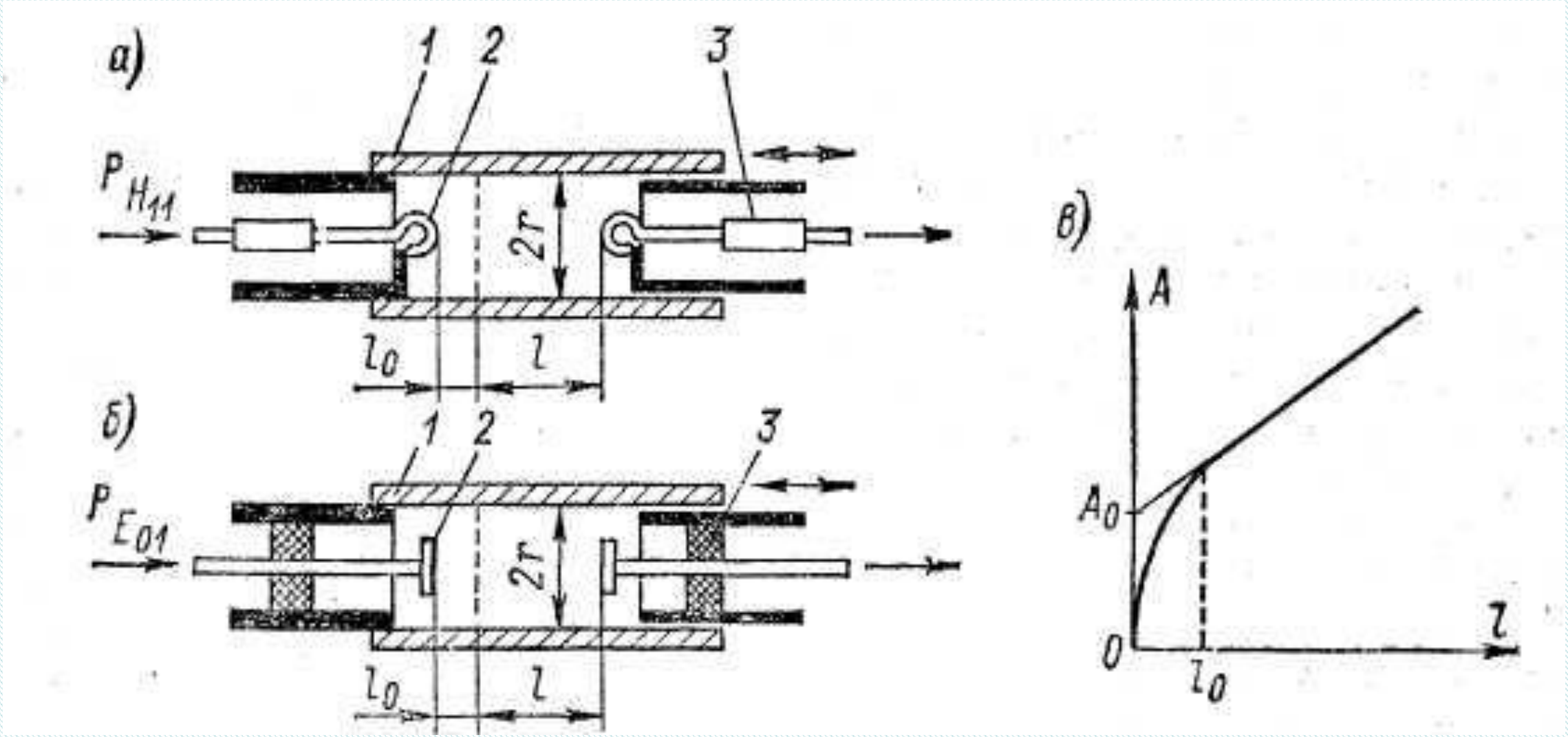
Используют волну Н11 круглого волновода

(λкр =3,41r) или волну Е01 (λкр =2,62r);

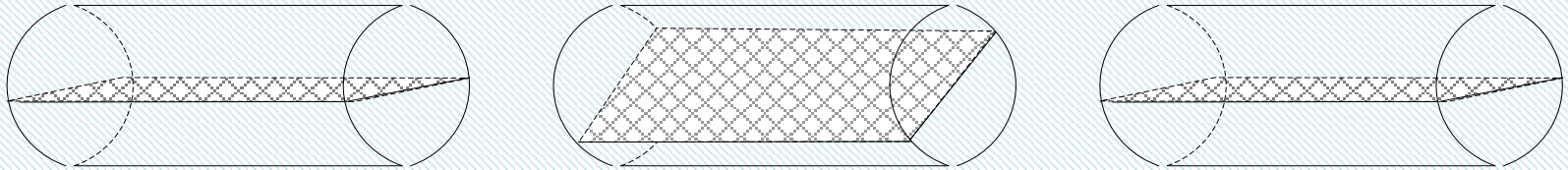
$$A, дБ = A_{нач} + 8.68 \cdot \alpha \cdot L$$

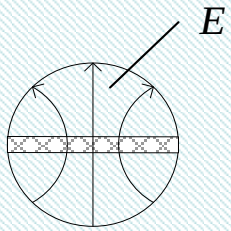


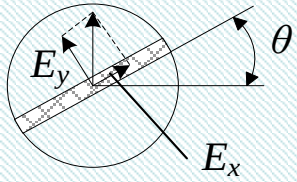
Реальные конструкции предельных аттенюаторов

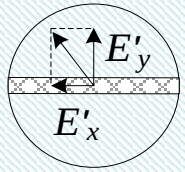


Поляризационные волноводные аттенюаторы группы Д3

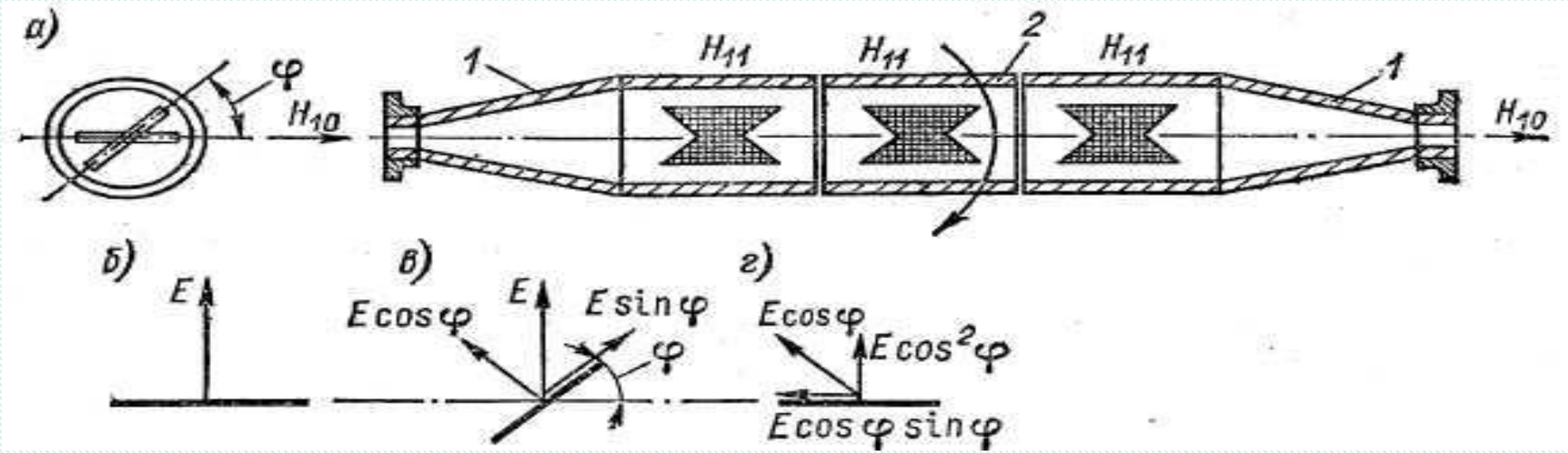








$$A, дБ = 20\lg(\sec^2(\theta)) + A_{нач}$$



Конструкция поляризационных волноводных аттенюаторов

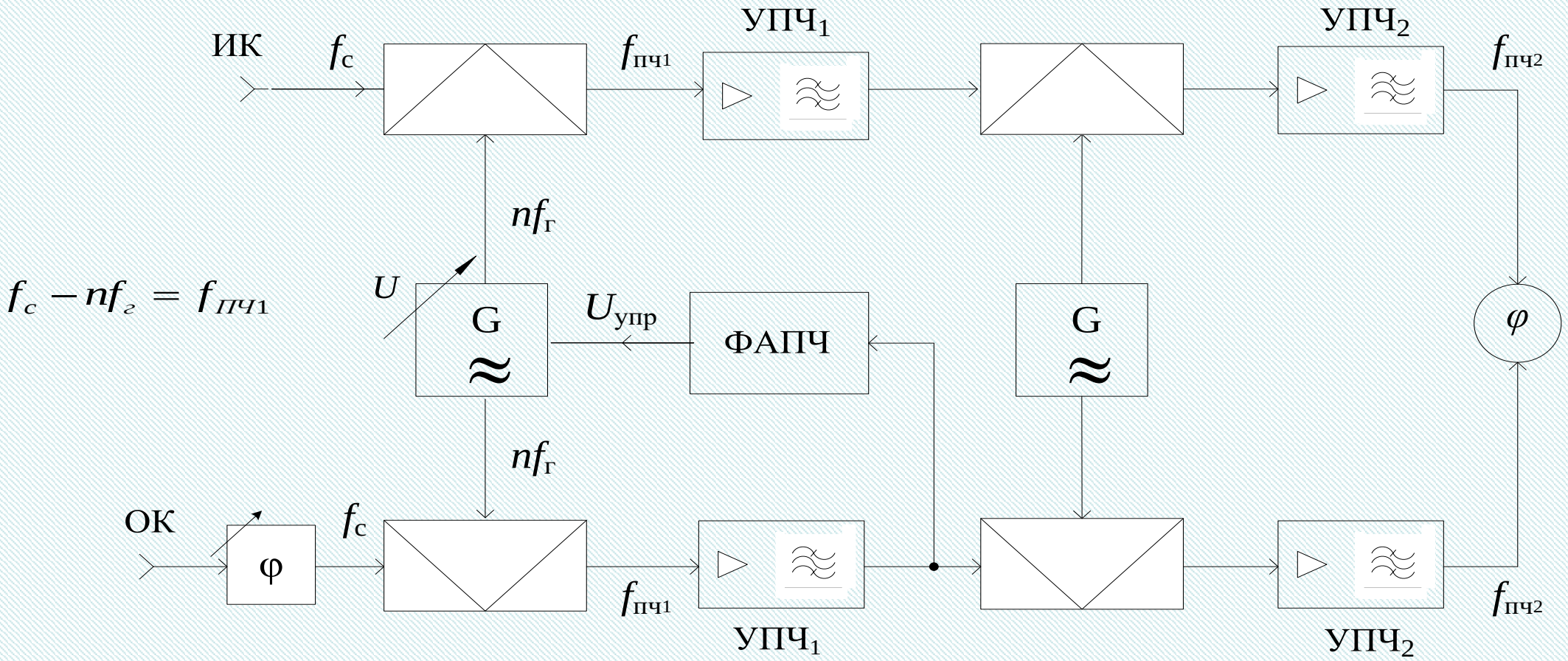






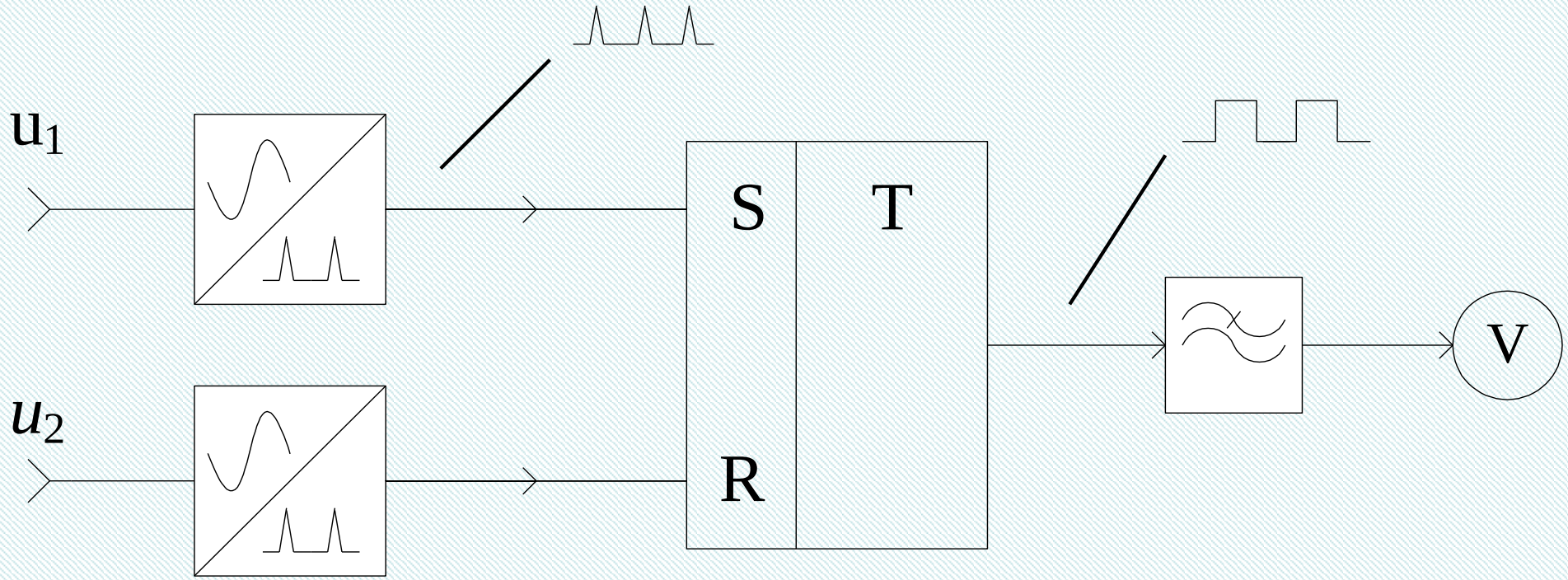


Измерение фазового сдвига на СВЧ



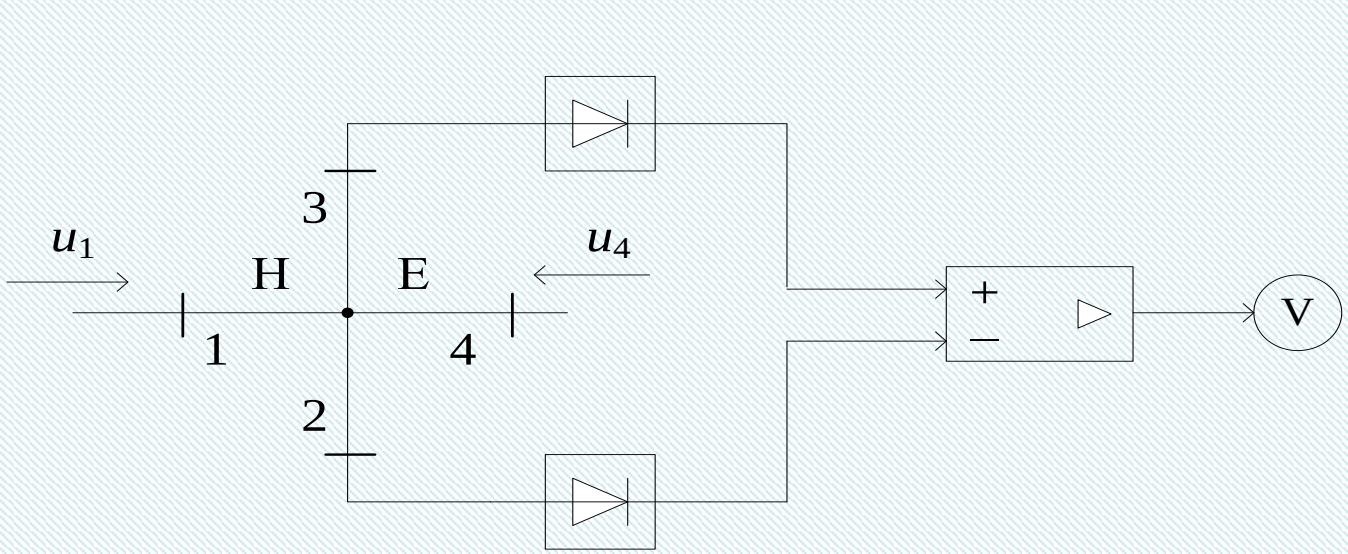
Структурная схема СВЧ фазометра с преобразованием частоты на гармониках гетеродина (стробоскопический преобразователь частоты)

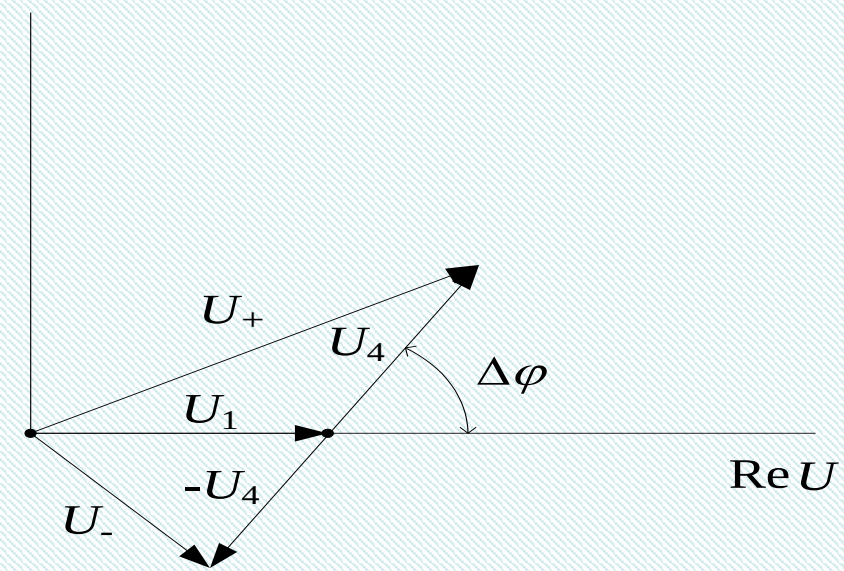
Схема НЧ-измерителя фазового сдвига с преобразованием «фаза - временной интервал – напряжение»



$$U_{изм} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)dt = \frac{U_0\tau}{T} = \frac{U_0\Delta\varphi}{360^0}$$

Суммарно-разностный фазовый детектор на основе двойного Т-моста



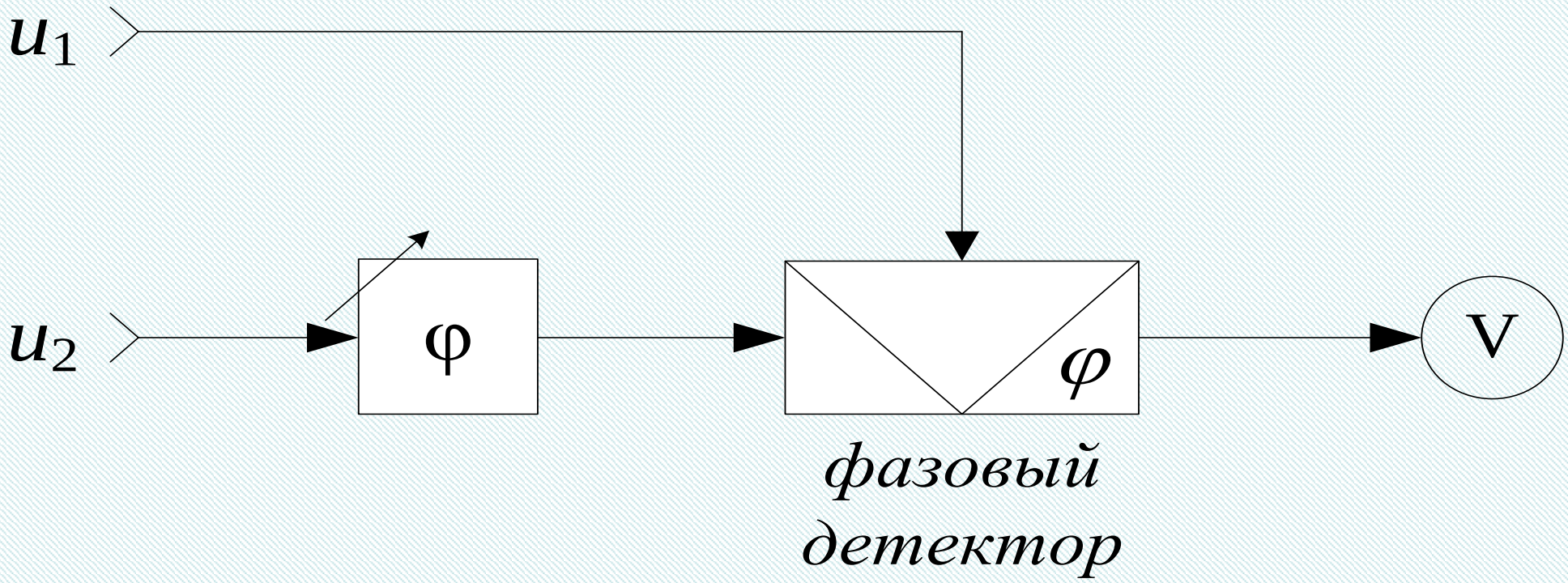


$$U_+^2 = U_1^2 + U_4^2 - 2U_1U_4\cos(\Delta\varphi) \quad , U_-^2 = U_1^2 + U_4^2 + 2U_1U_4\cos(\Delta\varphi)$$

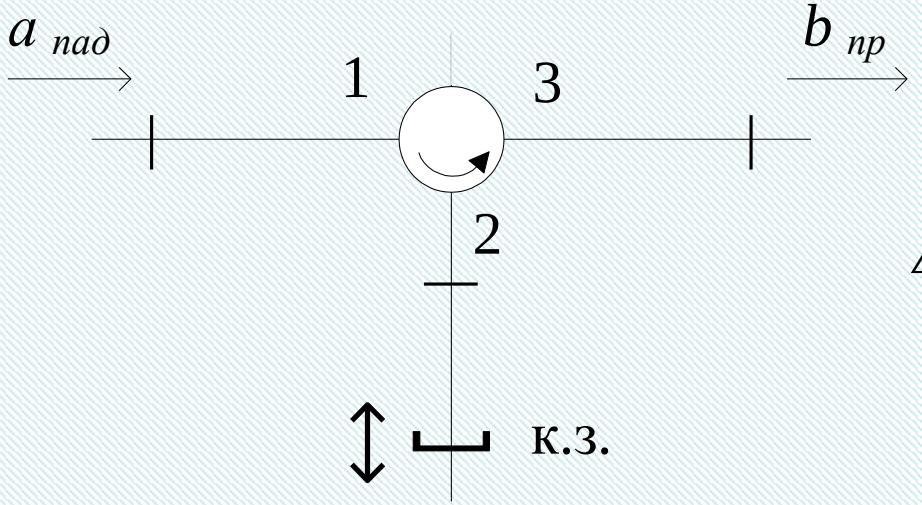
$$U_{вых} \equiv 4U_1U_4\cos(\Delta\phi)$$

Компенсационный метод измерения фазового сдвига на СВЧ

Принцип метода - сравнение измеряемого фазового сдвига с фазовым углом образцового фазовращателя . Нуль-индикатор – фазовый детектор.

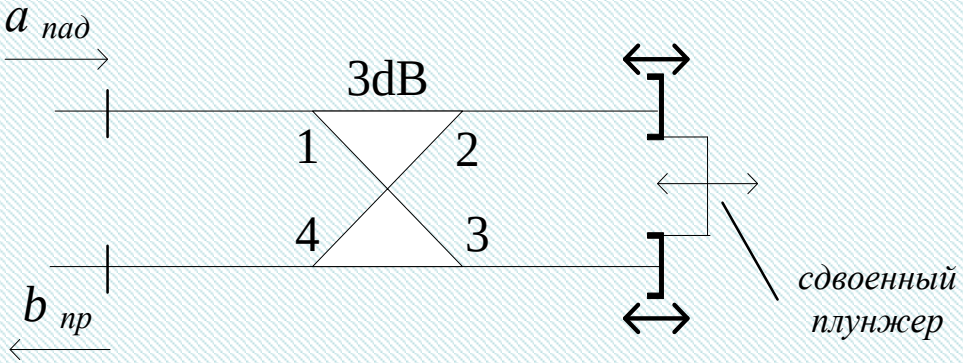


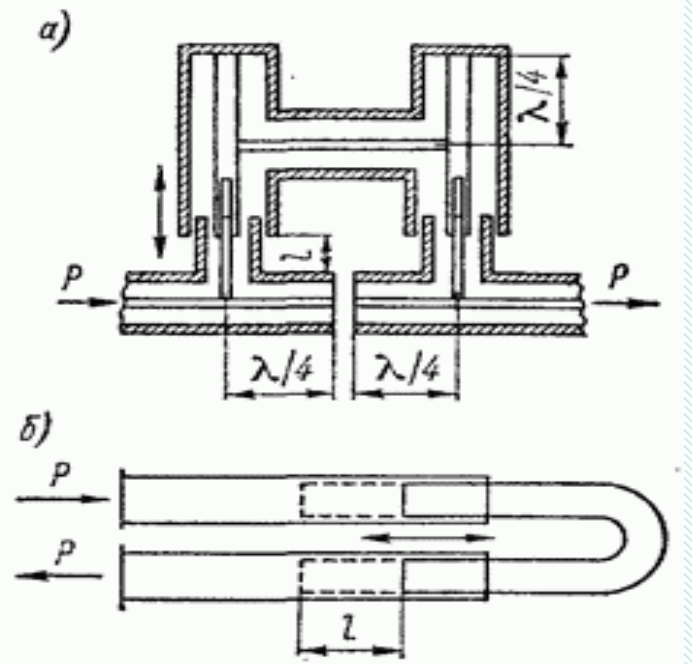
Образцовые СВЧ фазовращатели



$$\Delta\varphi^0 = \frac{720^0 l_{пл}}{\Lambda},$$

Фазовращатель *отражательного* типа. Используют передвижной короткозамыкатель (плунжер), который позволяет получить переменную фазу коэффициента отражения





Тромбонный фазовращатель в коаксиальном и волноводном варианте

Волноводный КВЧ фазовращатель



Фазовращатель диапазона КВЧ с перемещаемой диэлектрической пластиной фирмы ELMIKA (Литва) марки VPS-02E

Частотный диапазон 110 – 170 ГГц

Волновод WR - 06

Диапазон регулировки 0÷180°

КСВН не хуже 1,2

Вносимые потери – не хуже 1,0 дБ

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

А.А. Данилин

Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ» (2 редакция)

Измерение параметров диэлектриков на СВЧ

Санкт-Петербург
2025 г.

Диэлектрические и магнитные постоянные

Электрические и магнитные свойства вещества характеризуются двумя комплексными постоянными: комплексной диэлектрической постоянной и комплексной магнитной проницаемостью:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon\varepsilon_0(1 - i\tan\delta_e)$$

$$\mu^* = \mu' - i\mu'' = \mu\mu_0(1 - i\tan\delta_m)$$

Для большинства неметаллических материалов, включая все диэлектрики, применяемые в технике СВЧ, $\mu \approx 1.0,\ tg\delta_m \approx 0.0$

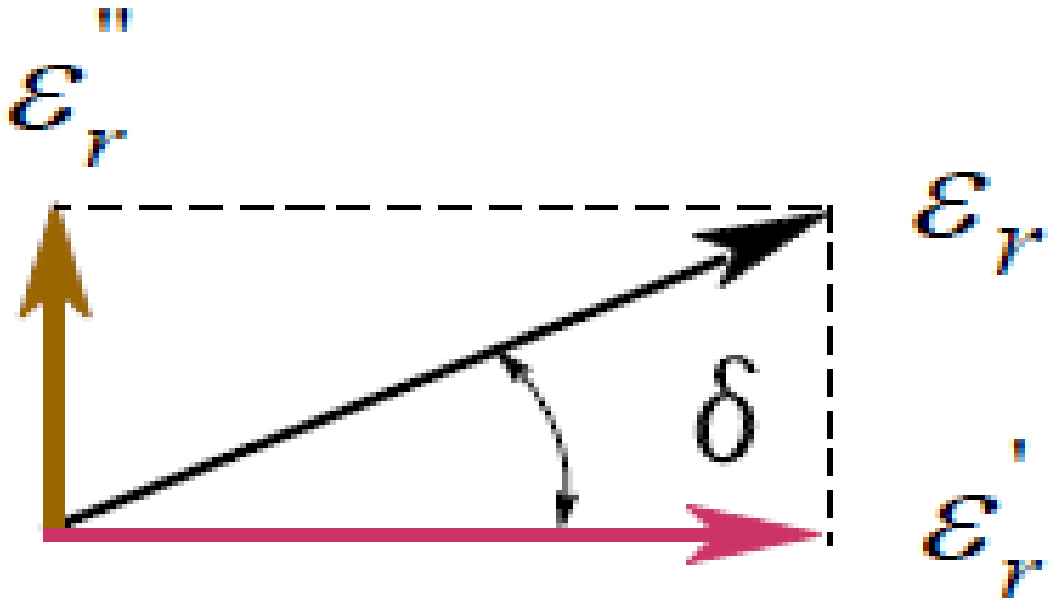
Поэтому для многих материалов измеряют только  $\varepsilon,\ tg\delta_\varepsilon$

Тангенс угла потерь (фактор потерь)

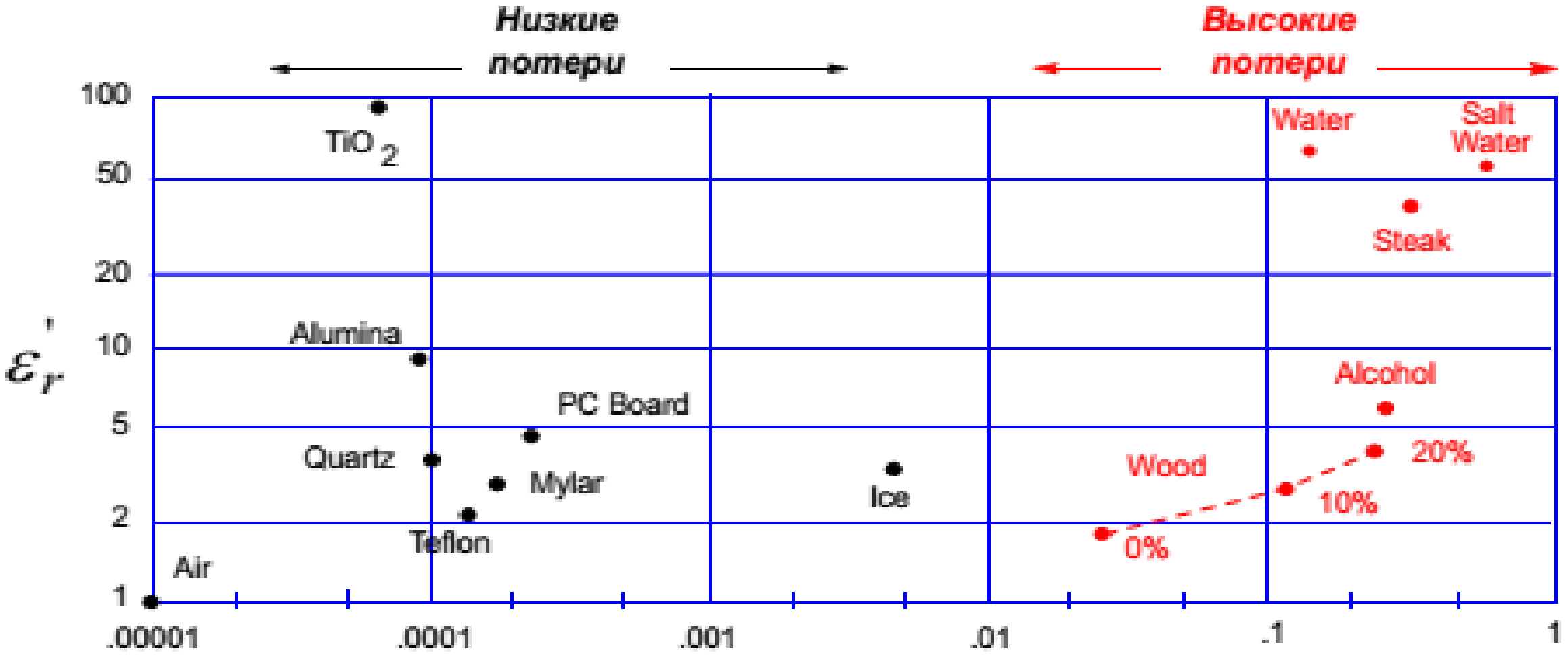
Если представить комплексную диэлектрическую проницаемость в виде вектора, то он образует угол δ с действительной осью. Этот угол - мера относительных потерь в материале (отношение потерь к запасенной энергии). Тангенс угла диэлектрических потерь (tgδ) или D- коэффициент диссипации (фактор потерь) - отношение мнимой части диэлектрической проницаемости к ее действительной части. Q – добротность материала – обратная величина фактора потерь.

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \mathrm{D} = \frac{1}{\mathrm{Q}}$$

$$= \frac{\text{Потери энергии за цикл}}{\text{Запасенная энергия за цикл}}$$



Свойства диэлектриков (при 3 ГГц)

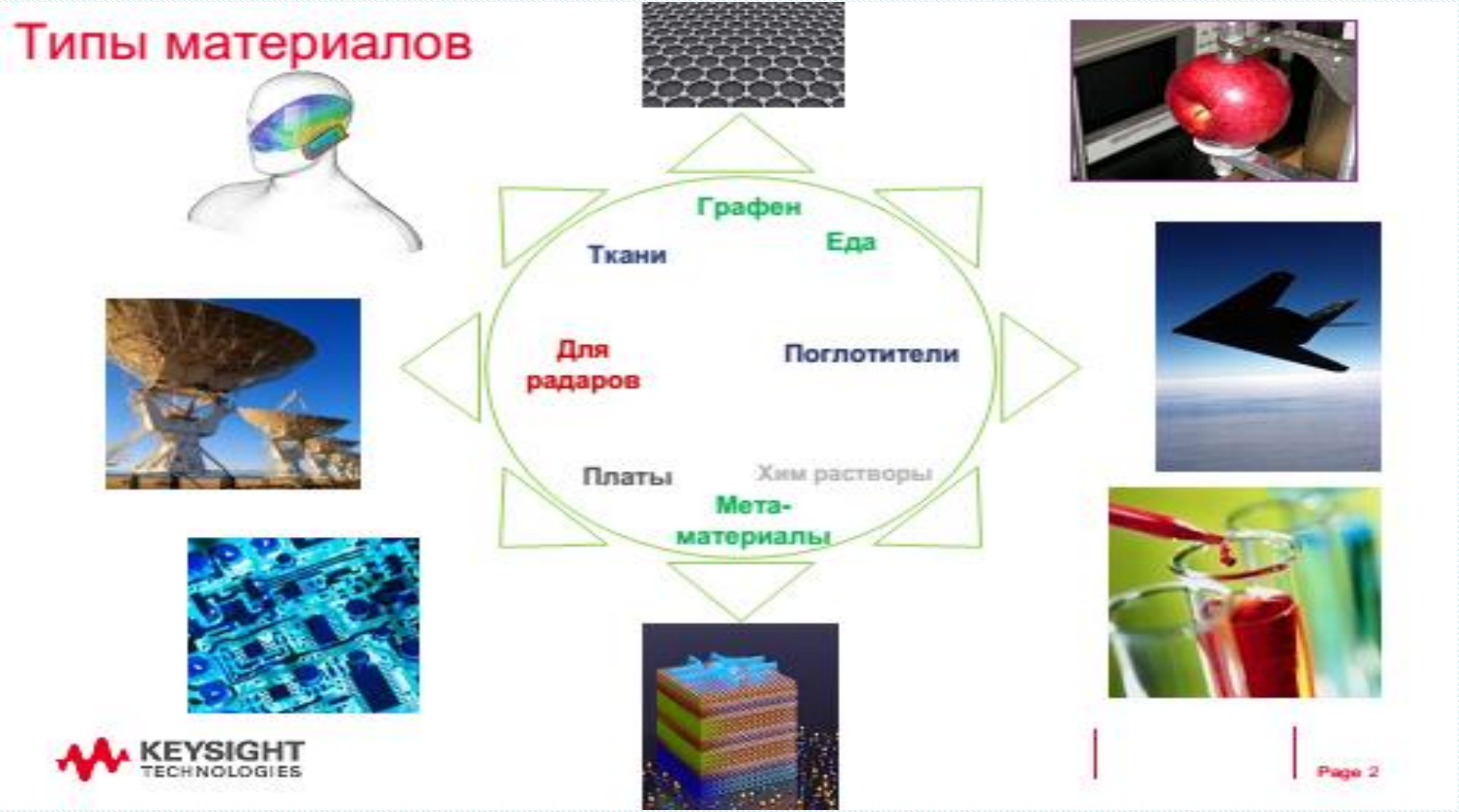


$$\tan\delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r'$$

Параметры некоторых диэлектриков с малыми и большими потерями

Материал диэлектрика	Диэлектрическая проницаемость	Фактор потерь	Предельная частота, ГГц
Фторопласт (PTFE)	2.0…2.1	$(0.1…0.3)\cdot 10^{-3}$	100
Стеклотекстолит (FR-4)	4.0…4.5	0.02…0.03	2
Дерево (средние показатели)	2..6	0.01…0.5	
Береза (влажность 10%)	2.8…3.8	0.02..0.06	10
Поглотитель –углеродный композит (10 % углерода)	5…10	0.1…0.3	10
20% углерода	8…15	0.2…0.5	10
30% углерода	10…20	0.3…0.8	10
Полимерная матрица композита (эпоксидная смола)	3…4	0.01…0.02	

Виды диэлектриков, используемых на СВЧ



Методы измерения параметров диэлектриков





Линия передачи

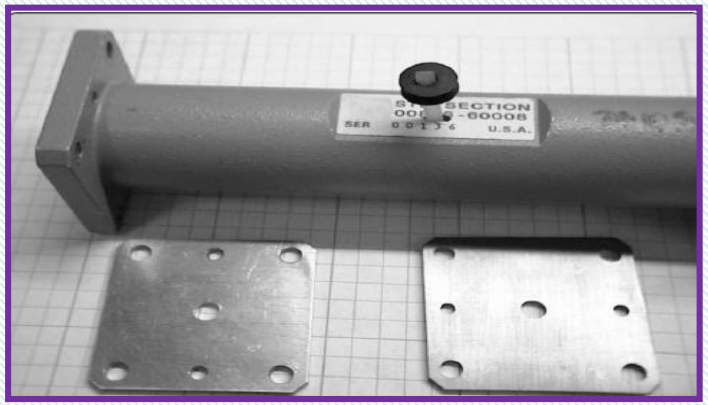
Коаксиальные пробники



Свободное пространство

Резонатор





Средства измерения диэлектриков – 3 компонента

Прибор





Оснастка











Програмное обеспечение

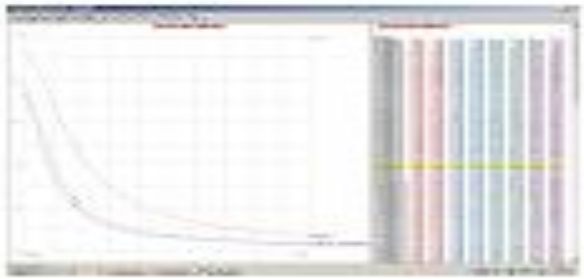
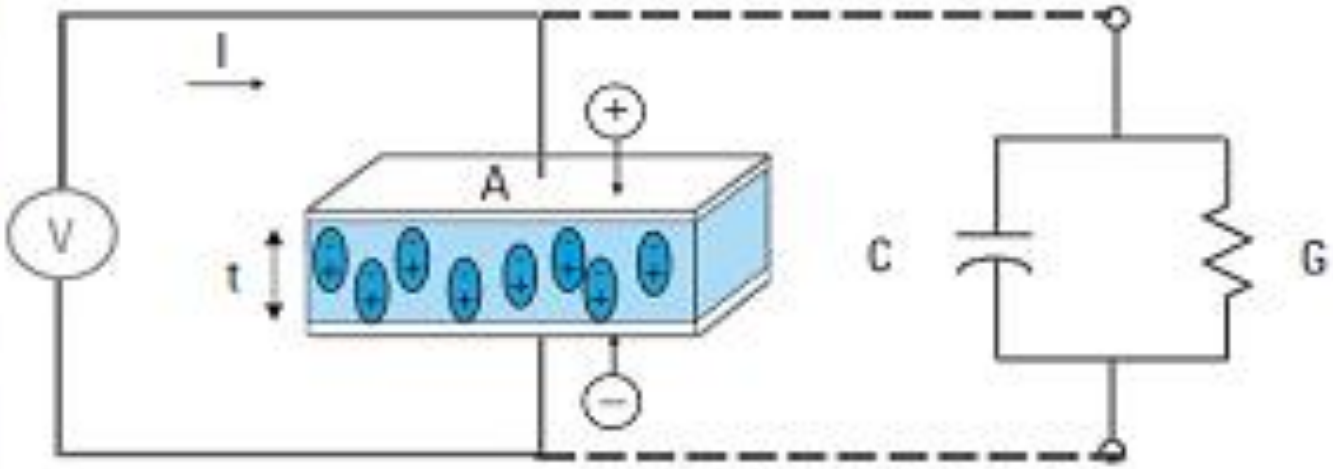


Схема измерения параметров диэлектриков на НЧ и ВЧ

Анализатор импеданса/LCR метр





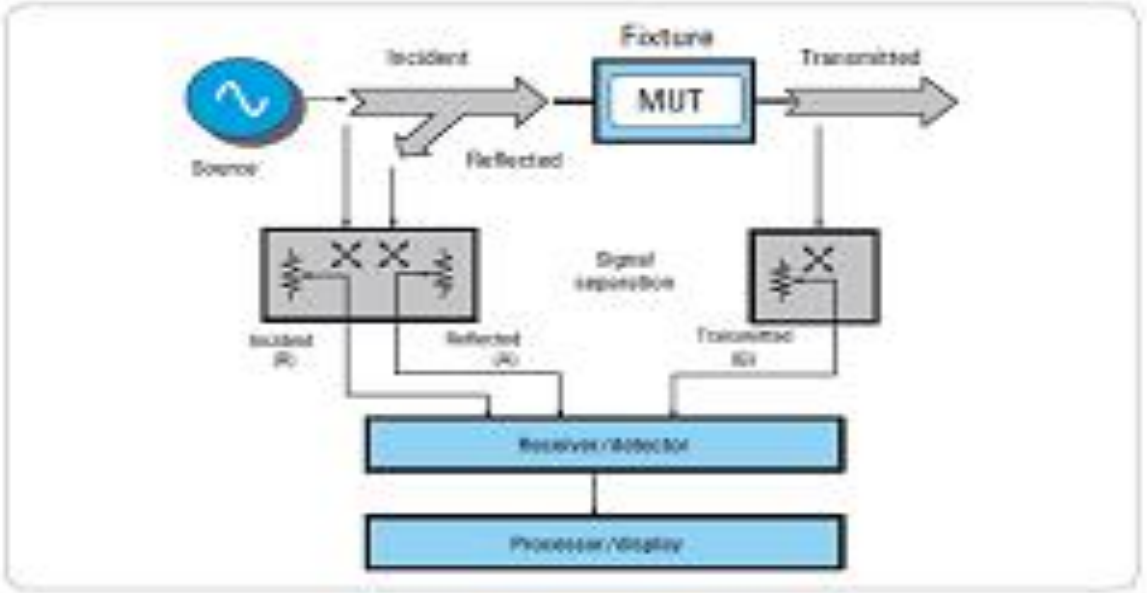
На обазец подается переменное напряжение и производится измерение падения напряжения на образце. Параметры материала вычисляются из емкости, тангенса угла диэлектрических потерь и размеров материала.

СХЕМА измерения НА СВЧ

Анализатор цепей







Типы оснасток

16454A







16451B/53A

Индуктивные

Коаксиальный зонд

Параллельные пластины (Емкость)

Резонатор

Линия передачи

Свободное пространство





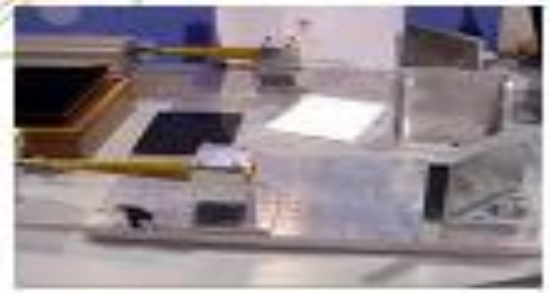
SPDR



ASTM 2520



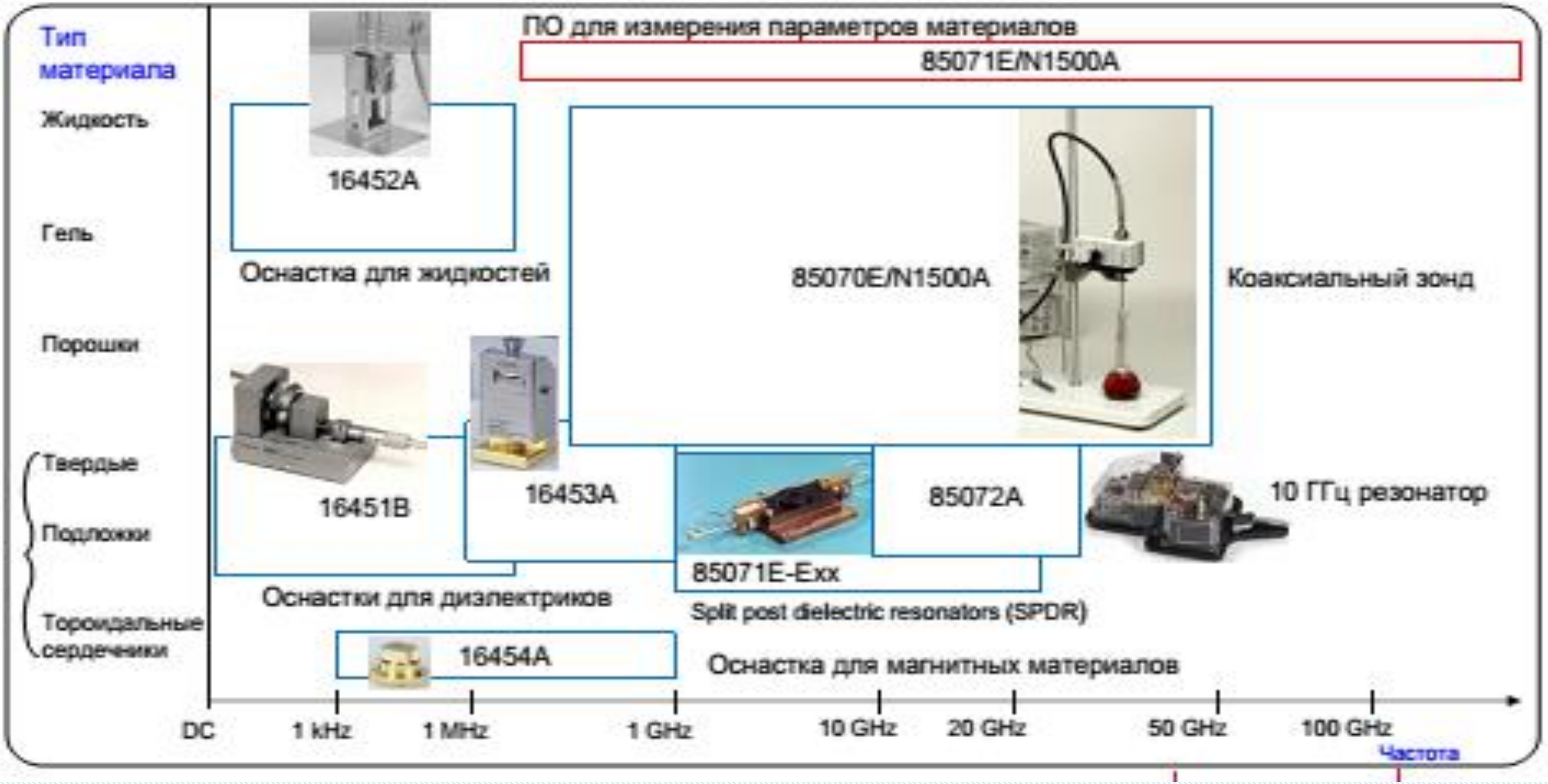






KEYSIGHT TECHNOLOGIES

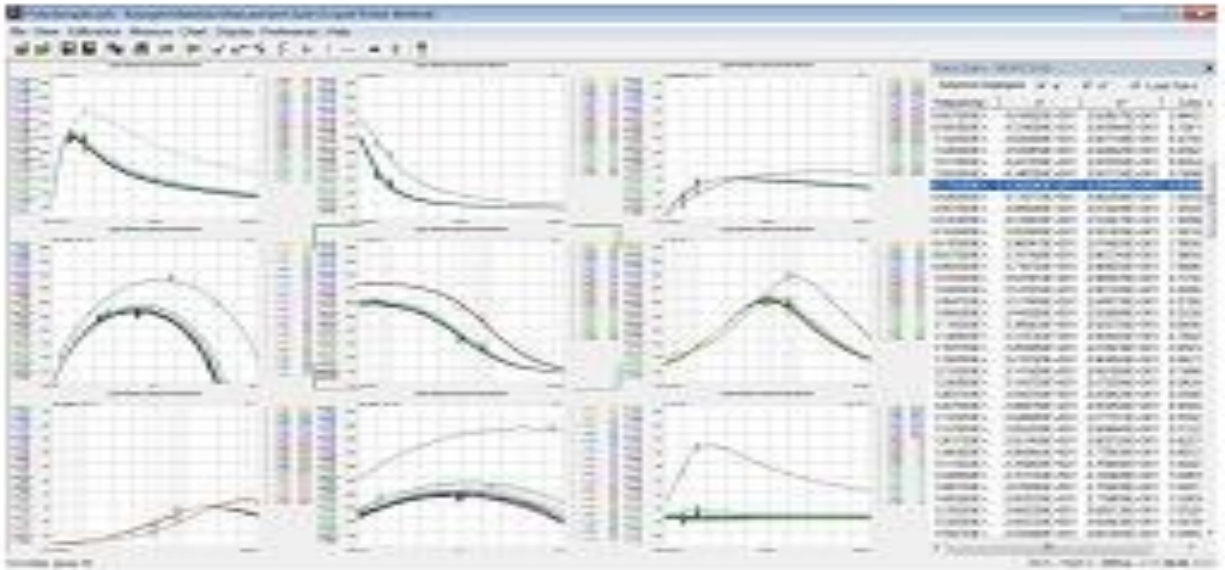
Типы оснасток



Измерительная система

Программное обеспечение







Измеренные параметры (S-параметры, емкость...) сами по себе не дают информации о таких параметрах материалов как ε и μ, поэтому, необходимо ПО для пересчета полученных данных в диэлектрическую и магнитную проницаемости. Также ПО позволяет учесть положение материала внутри оснастки, чтобы наиболее точно вычислить результат моделирования.

Какой метод выбрать?

Факторы, влияющие на выбор метода и средства измерения :

- Частота
- Ожидаемое значение ε
- Требуемая точность измерения
- Свойства материала (однородный, изотропный и др.)
- Вид материала (жидкость, порошок, твердый, листовой)
- Ограничения на размер образца
- Разрушающий или неразрушающий метод
- Контактный или бесконтактный
- Температура
- Стоимость

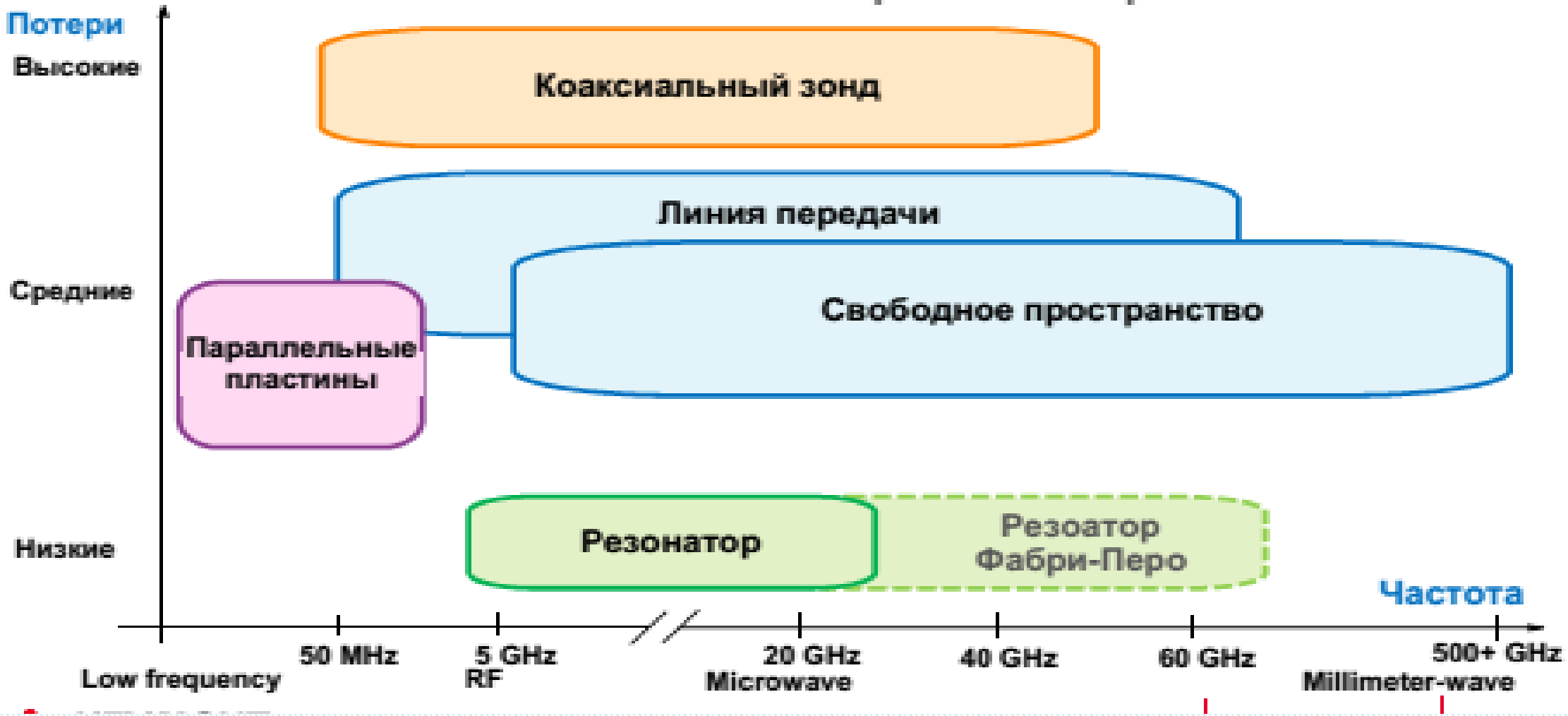
Что выбрать в зависимости от типа материала и частоты ?



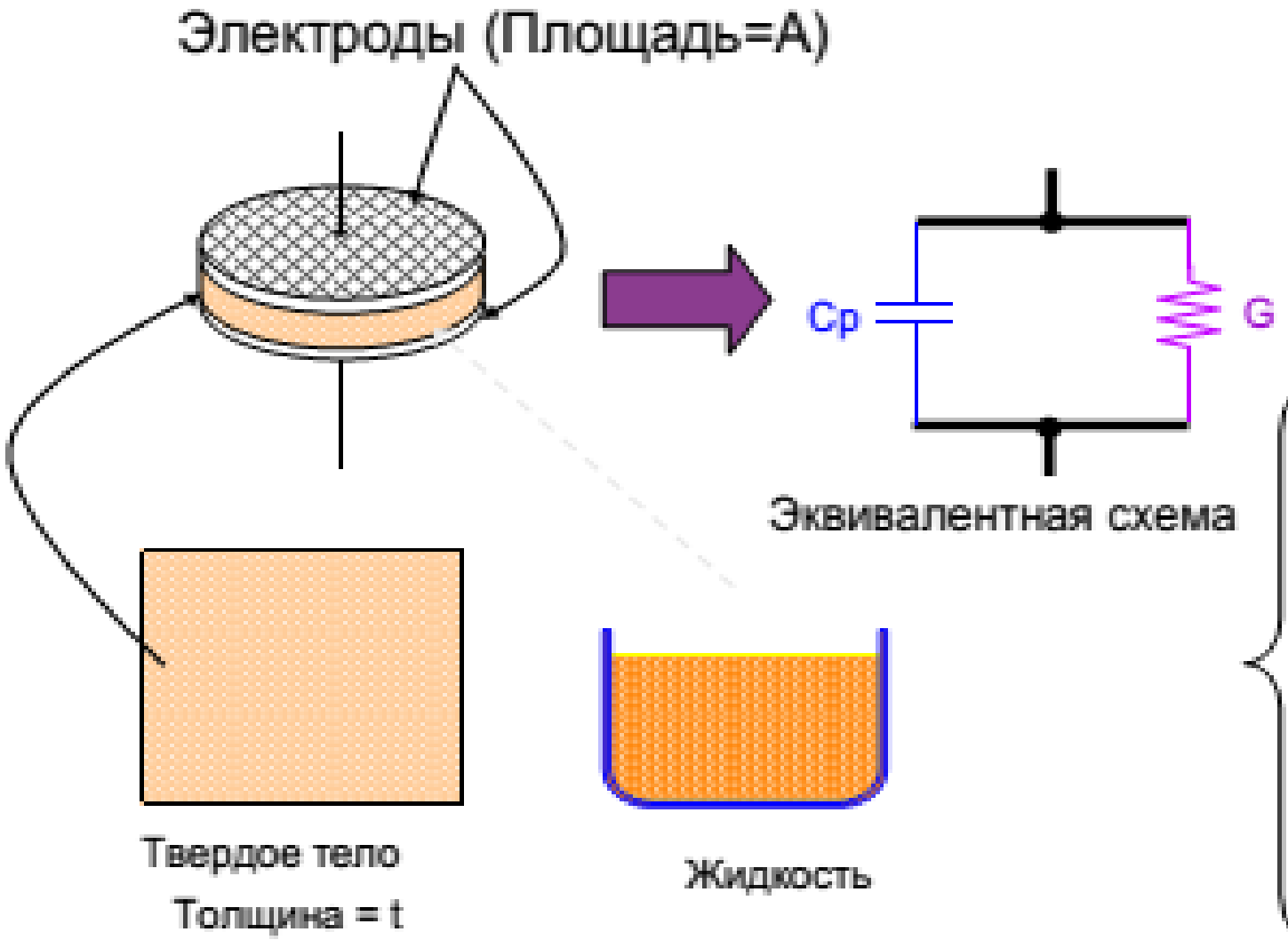
Что выбрать в зависимости от потерь в материале ?

Методики измереня

Зависимость от частоты и потерь в материале



Метод параллельных пластин



$$Y = G + j\omega C_p$$

$$= j\omega C_0\left(\frac{C_p}{C_0} - j\frac{G}{\omega C_0}\right)$$

Co : Air Capacitance

$$\varepsilon_r^* = \frac{C_p}{C_0} - j\frac{G}{\omega C_0}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_r' = \dfrac{t \cdot C_p}{A \cdot \varepsilon_0} \\ \varepsilon_r'' = \dfrac{t \cdot G}{\omega \cdot A \cdot \varepsilon_0} = \varepsilon_r' . \tan\delta \end{cases}$$

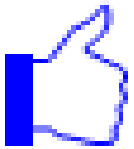
Приборы для измерения методом параллельных пластин



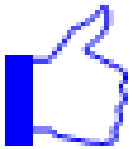


НЧ/ВЧ Решение (от 20 Гц до 30 МГц) ВЧ решение (от 1 МГц до 1 ГГц)

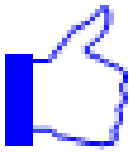
Метод параллельных пластин



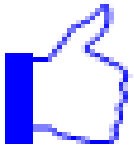
Относительно простые вычисления ε, из C и D



Хорошо работает для тонких образцов: платы, пленки и т.д.



Недорогой



Точный: Лучшая точность для НЧ



Ограничение по частоте до 1 ГГц



Образец должен иметь ровную гладкую поверхность

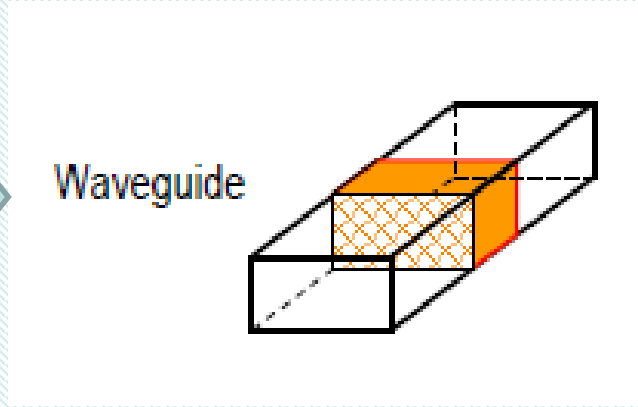
Методы линии передачи (фидерные методы)

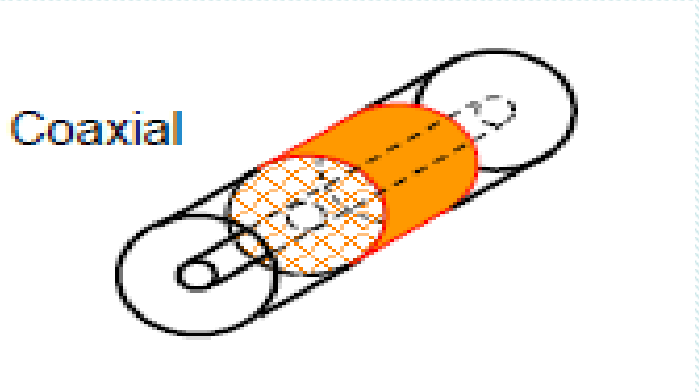
Фидерные методы

Волноводные

Коаксиальные

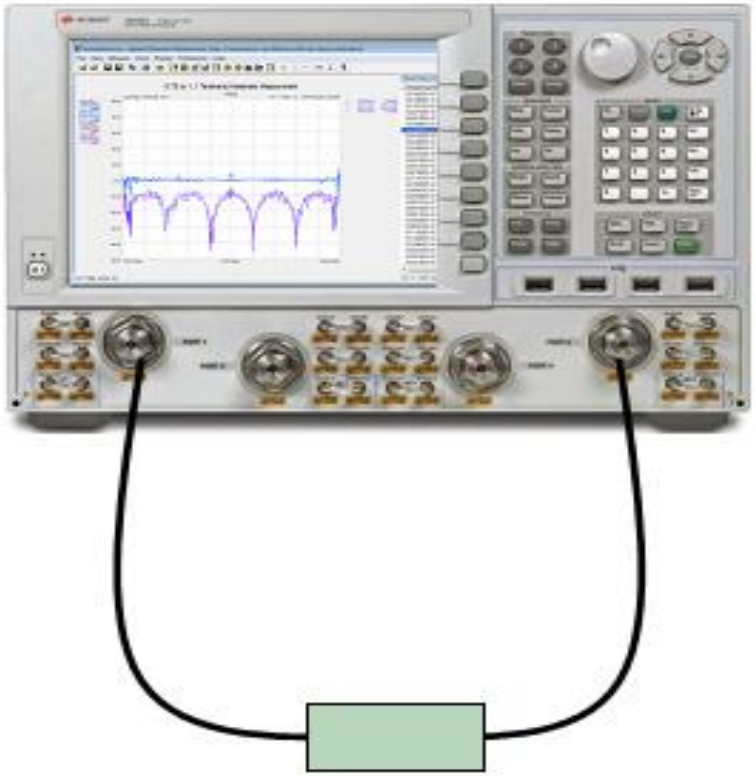
- **Метод полного заполнения сечения волновода**
- **Метод короткого замыкания и холостого хода**
- **Метод "бесконечного" слоя**
- **Метод волноводных мостов**



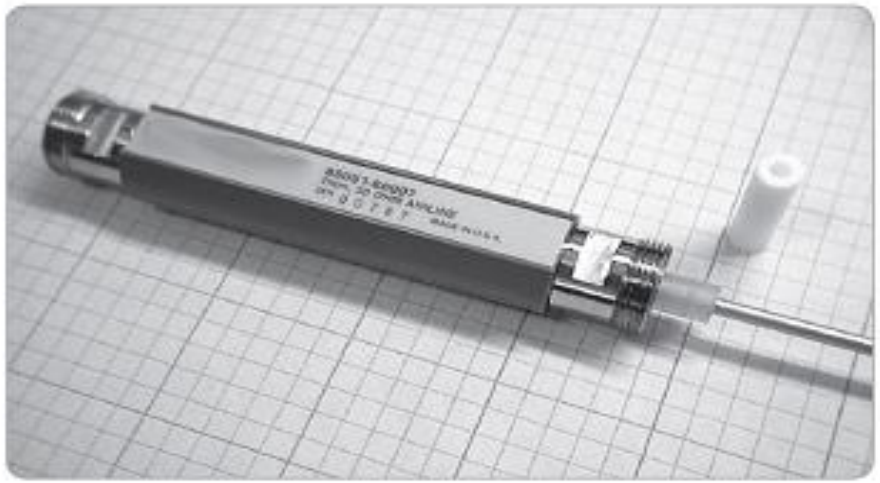


Метод линии передачи

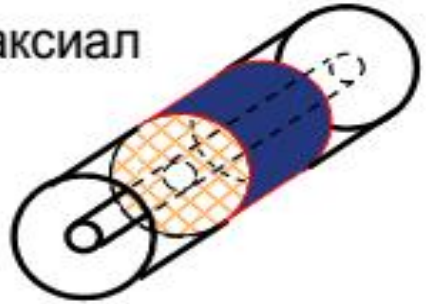
Анализатор цепей

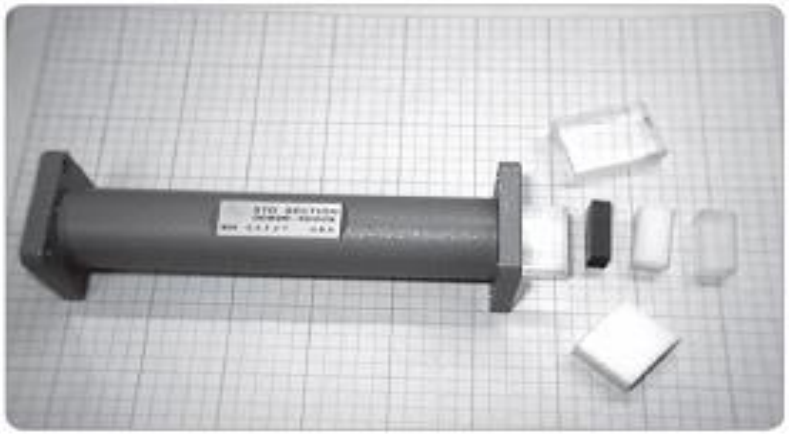


Держатель образца подключается между коаксиальными кабелями

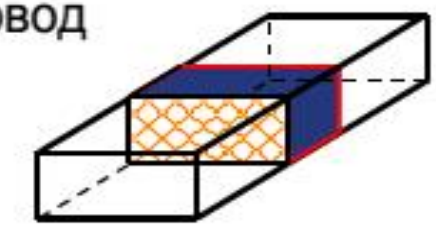


Коаксиал



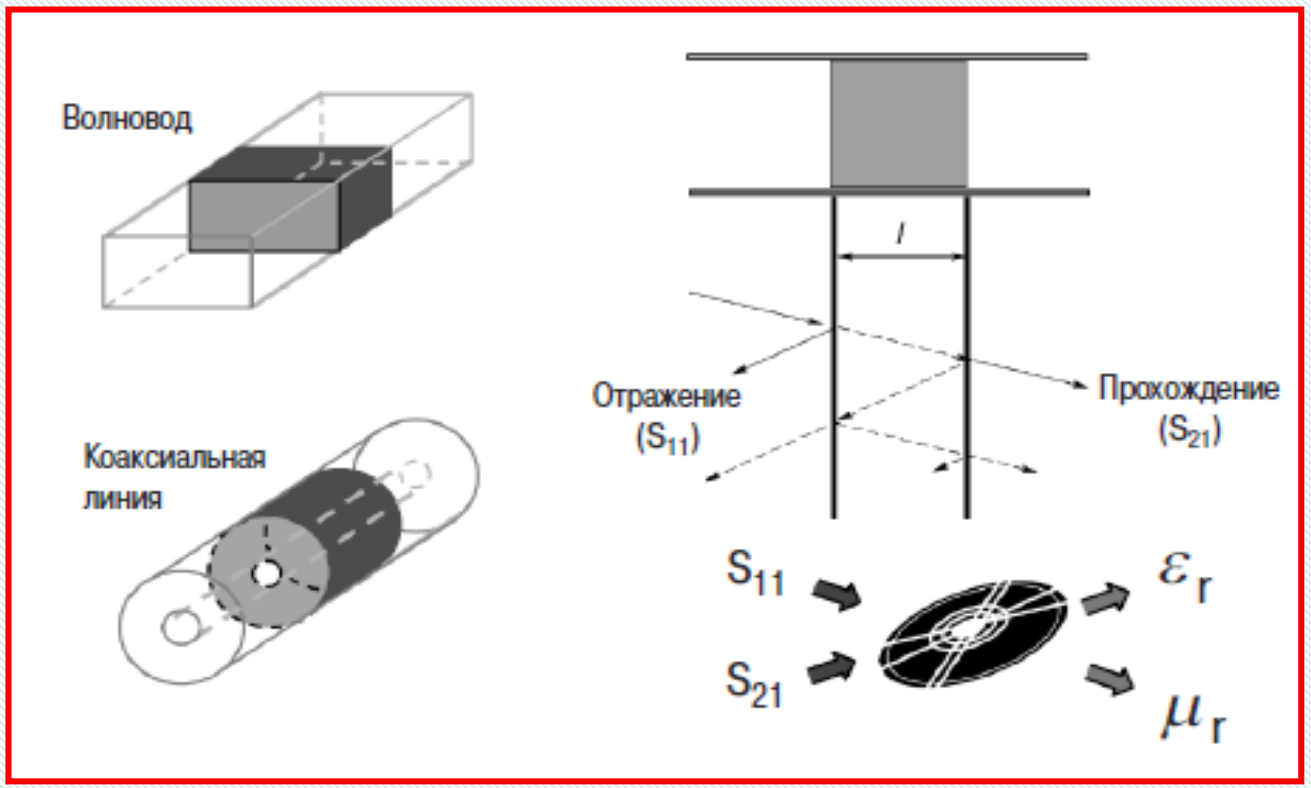


Волновод



Необходима калибровка

Размещение материала внутри закрытой линии передачи (измерительной ячейки). Обычно это отрезок прямоугольного волновода или коаксиальной линии. ε и μ вычисляют из измеренных величин S11 и S21.



Требования к образцу:

- Заполняет сечение линии, не должно быть щелей между образцом и стенками
- Ровные гладкие поверхности, перпендикулярные продольной оси ячейки
- Однородные по структуре образцы

Достоинства фидерного метода (линии передачи):

- -Широкополосный (0.1-110 ГГц)
- -Доступность элементов коаксиальных и волноводных типов;
- -Возможность применения стандартного оборудования и известных методик измерения;
- -Несложность изготовления измерительной ячейки для жидких и порошковых материалов;
- Возможность измерять магнитные материалы;

Недостатки методов на основе отрезка линии передачи:

- Необходимы большие образцы для низких частот, малые образцы для высоких частот;
- Менее точен для измерения малых факторов потерь;
- Твердые вещества должны иметь плоскую поверхность, не должно быть воздушных зазоров;

Особенности применения:

- Используется для материалов со средними и большими потерями;
- Твердые материалы, поддающиеся механической обработке;
- Жидкие, порошковые и газообразные вещества должны быть размещены в специальной измерительной ячейке

Метод линии передачи



Измерение ε_r и μ_r



Легко найти оснастку



Широкий диапазон частот (0.1-110 ГГц)



Совместим с методом свободного пространства



Ограничение по частоте (диапазоны волновода)



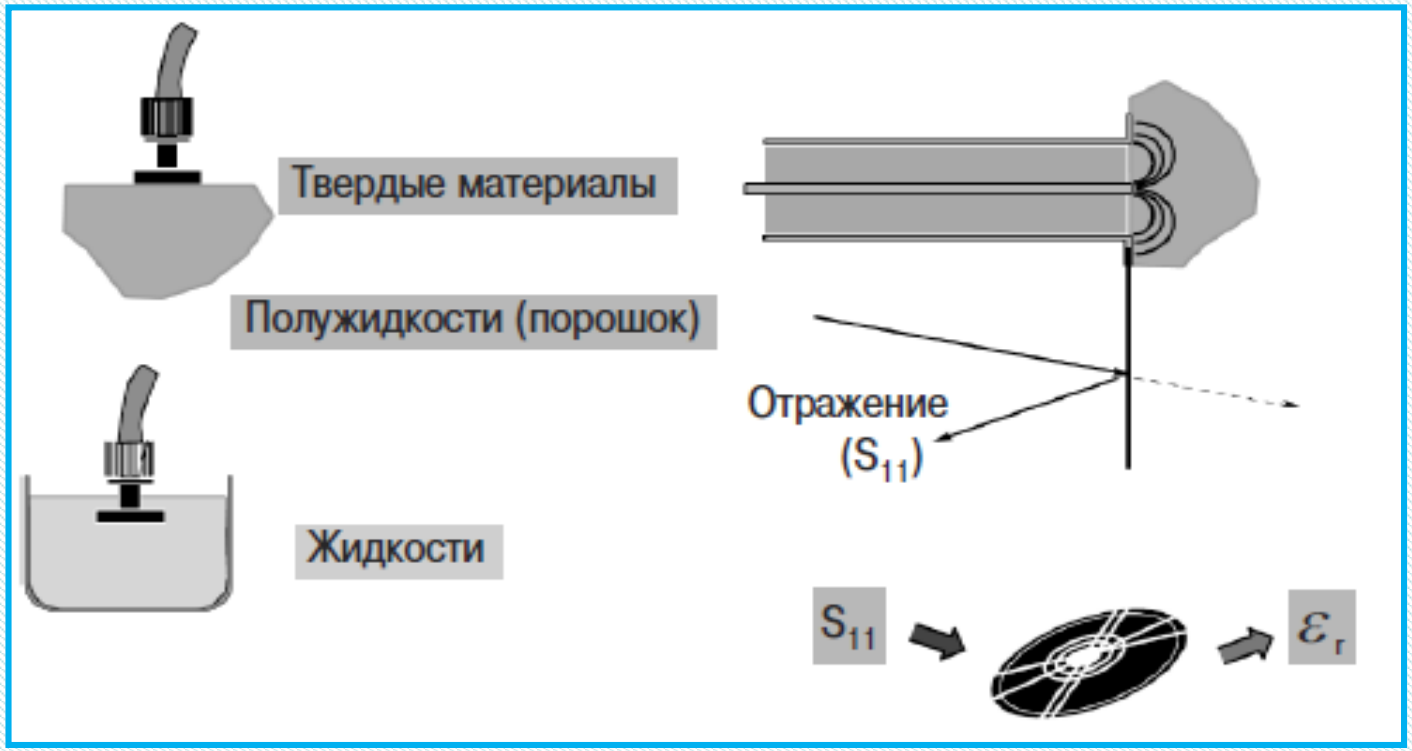
Точное изготовление образца (механическая обработка)

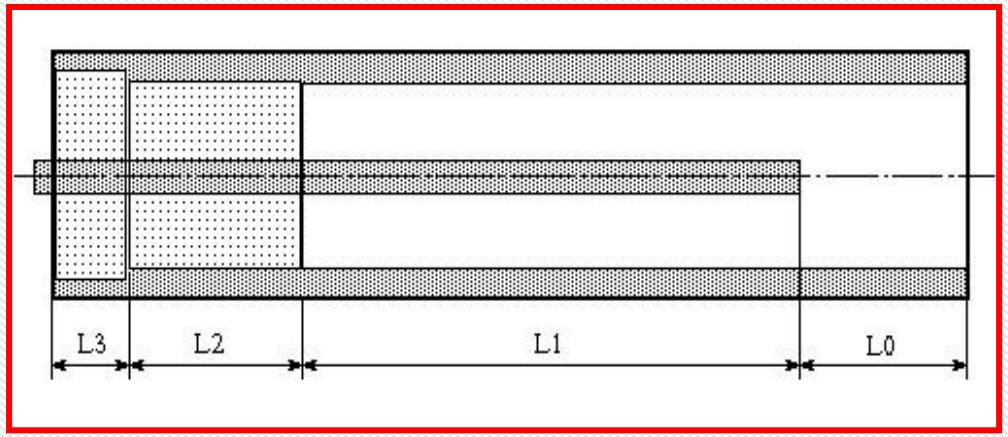


Ограниченная точность при низких потерях

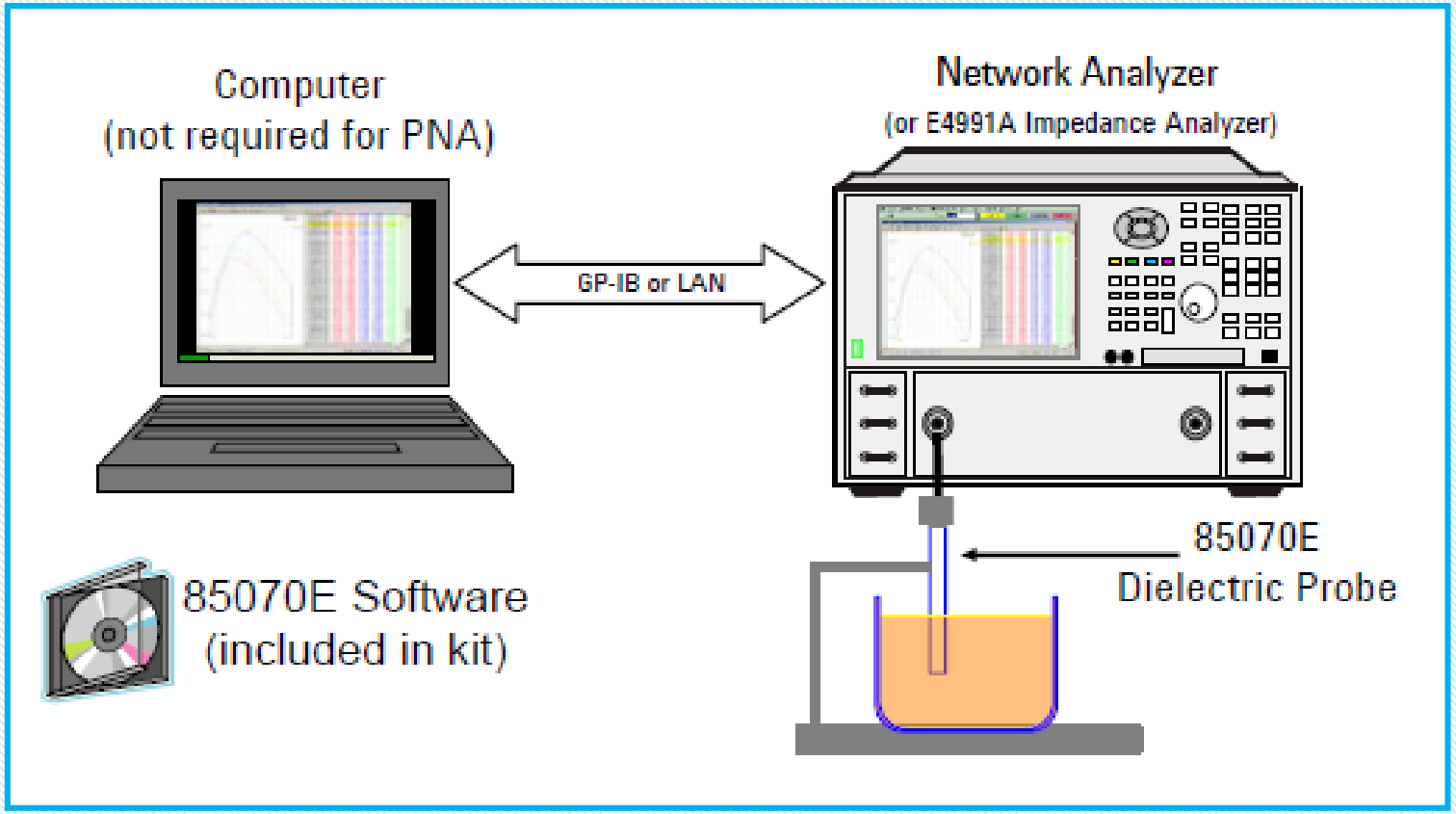
Коаксиальные пробники

Разомкнутый коаксиальный пробник - открытый конец линии передачи. Свойства материала измеряются при погружении пробника в жидкость (порошок) или при касании пробником плоской поверхности твердого материала. Измеряют только S11.





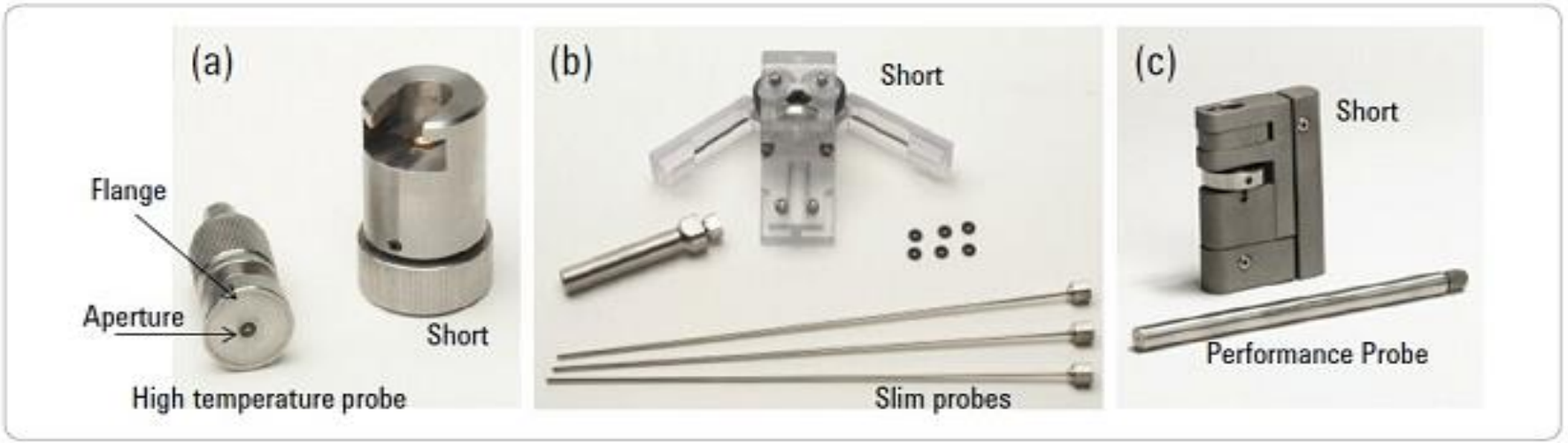
Измерительная система, состоит из анализатора цепей или импеданса, коаксиального пробника и программного обеспечения.

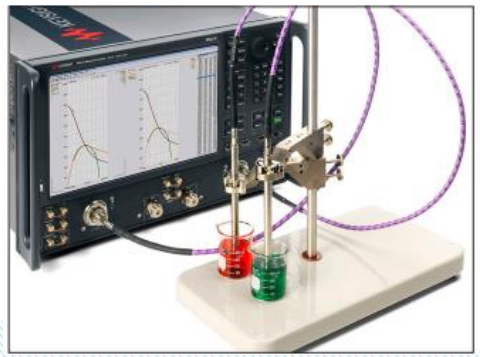


Два пробника, поставляемые в составе комплекта 85070E: высокотемпературный пробник (a) и пробник малого диаметра (b). Три пробника малого диаметра показаны в нижней части рисунка (b) с короткозамыкающим устройством сверху

Система с коаксиальным зондом

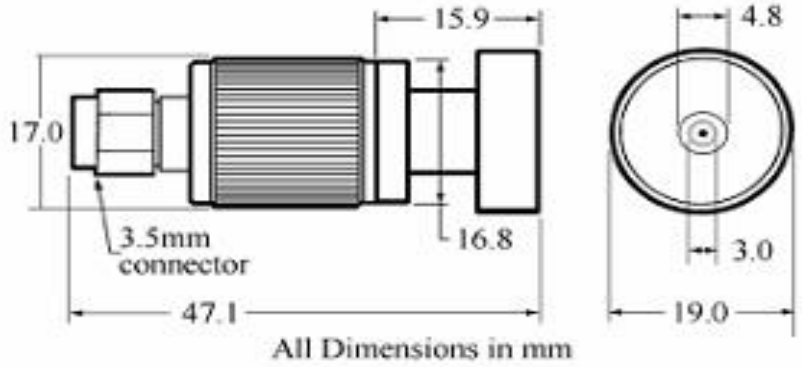
Необходима калибровка







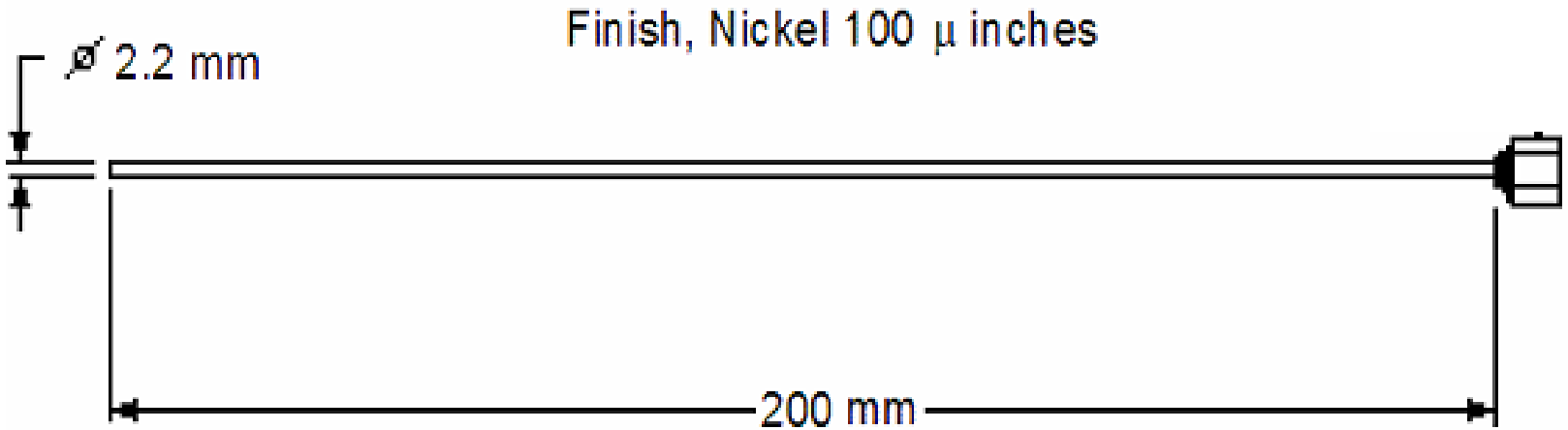
Три варианта зондов





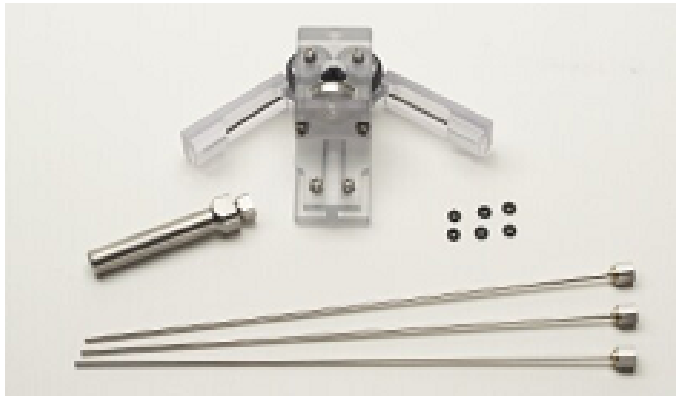
Высокотемпературный зонд

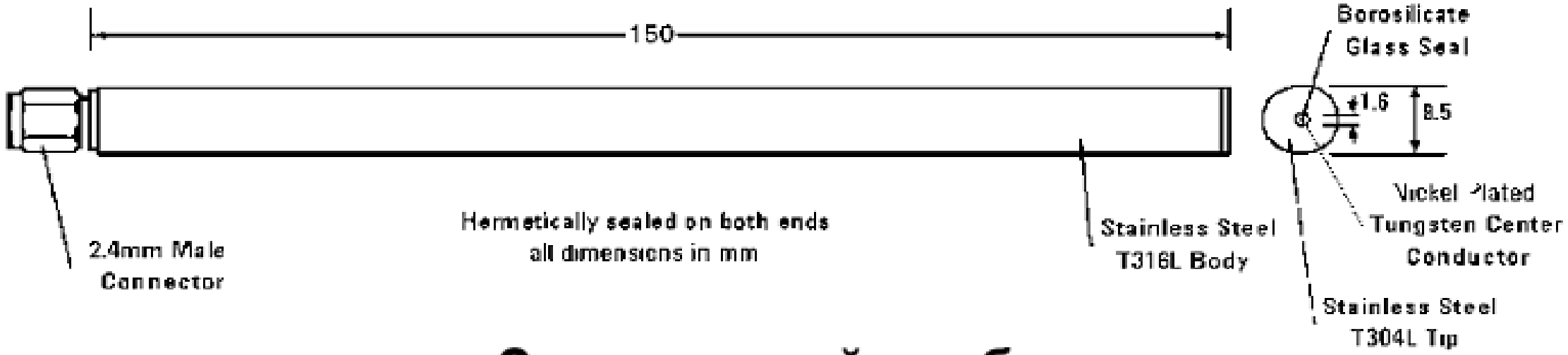
- 0.200 – 20ГГц (от 10МГц с анализатором импеданса)
- Диапазон температур от -40 до +200 градусов С
- Устойчив к химическому воздействию (устойчив к коррозии)
- Плоский дизайн контактной площадки повышает точность измерения твердых материалов с плоской поверхностью.



Тонкий зонд

- 0.500 – 50ГГц
- Низкая стоимость
- Подходит под узкие отверстия
- Только для жидкостей, гелей и порошков





Специальный пробник

Объединяет преимущества высокотемпературного и тонкого зонда.



- 0.500 – 50ГГц
- Диапазон температур от -40 до +200 градусов С
- Герметичный, подходит для автоклав
- Сталь пищевой марки, можно использовать для контроля продуктов

Компания ПЛАНАР: Система измерения диэлектричесой проницаемости вина





ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Диапазон частот *	от 4 МГц до 54 ГГц
Диапазон ε_r	от 1 до 200
Диапазон tan δ	от 0,02
Диапазон температур измеряемого материала	от 0 до 60 °С
Измеряемые параметры	ε', ε'', σ, tan δ
Форматы вывода результатов: графики в линейной и логарифмических шкалах, диаграмма Смита, Cole-Cole	
Графический интерфейс для настройки, калибровки и измерений	

Достоинства метода с коаксиальным пробником:

-Широкополосный (0.2-50ГГц);

-Неразрушающий контроль;

-Удобный, простой в применении

Недостатки:

-Требуется толщина образца порядка полдлины волны и более;

-Образец должен быть однородным и изотропным;

-Твердые вещества должны иметь плоскую поверхность, не должно быть воздушных зазоров;

-Нет возможности измерять магнитные материалы.

Особенности применения:

-Используется для материалов с большими потерями;

-Ограниченные точность измерения tgδ при низких потерях

-Наиболее пригоден для измерения жидких и полутвердых диэлектриков

-Необходимо очищать кончик зонда, избегать сильного изгиба кабелей, следить за пузырьками в жидкости!

Система с коаксиальным зондом



Проста в использовании



Не требуется особая подготовка образца



Неразрушающая для большинства материалов



Идеальна для жидкостей и полу-твердых образцов



Широкий частотный диапазон (0.2-50 ГГц в зависимости от ε_r)



Необходима толщина образца > 1 cm (тип)



Твердые образцы должны иметь гладкую поверхность



Точность ε'_r ($\pm$ 5%) и разрешение tanδ ($\pm$ .05)



Не работает для образцов с высоким ε'_r и низким ε''_r



Не измеряет μ_r

Резонаторный метод (метод резонансной полости)

Образец материала, помещенный в объемный резонатор, влияет на резонансную частоту (f) и добротность (Q_c). Комплексная диэлектрическая проницаемость (ε_r) или магнитная проницаемость (μ_r) материала вычисляется с помощью этих параметров.

Методика резонансной полости

fc = Резонансная частота пустой полости

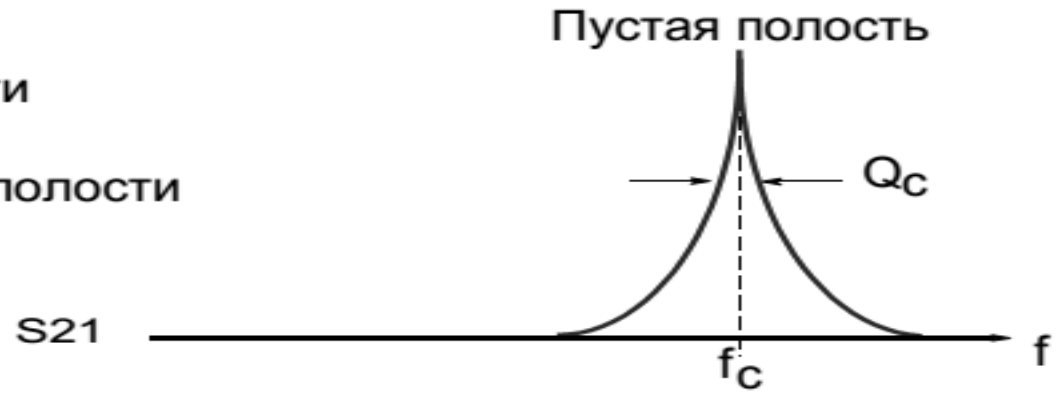
fs = Резонансная частота заполненной полости

Qc = Q пустой полости

Qs = Q заполненной полости

Vs = Объем пустой полости

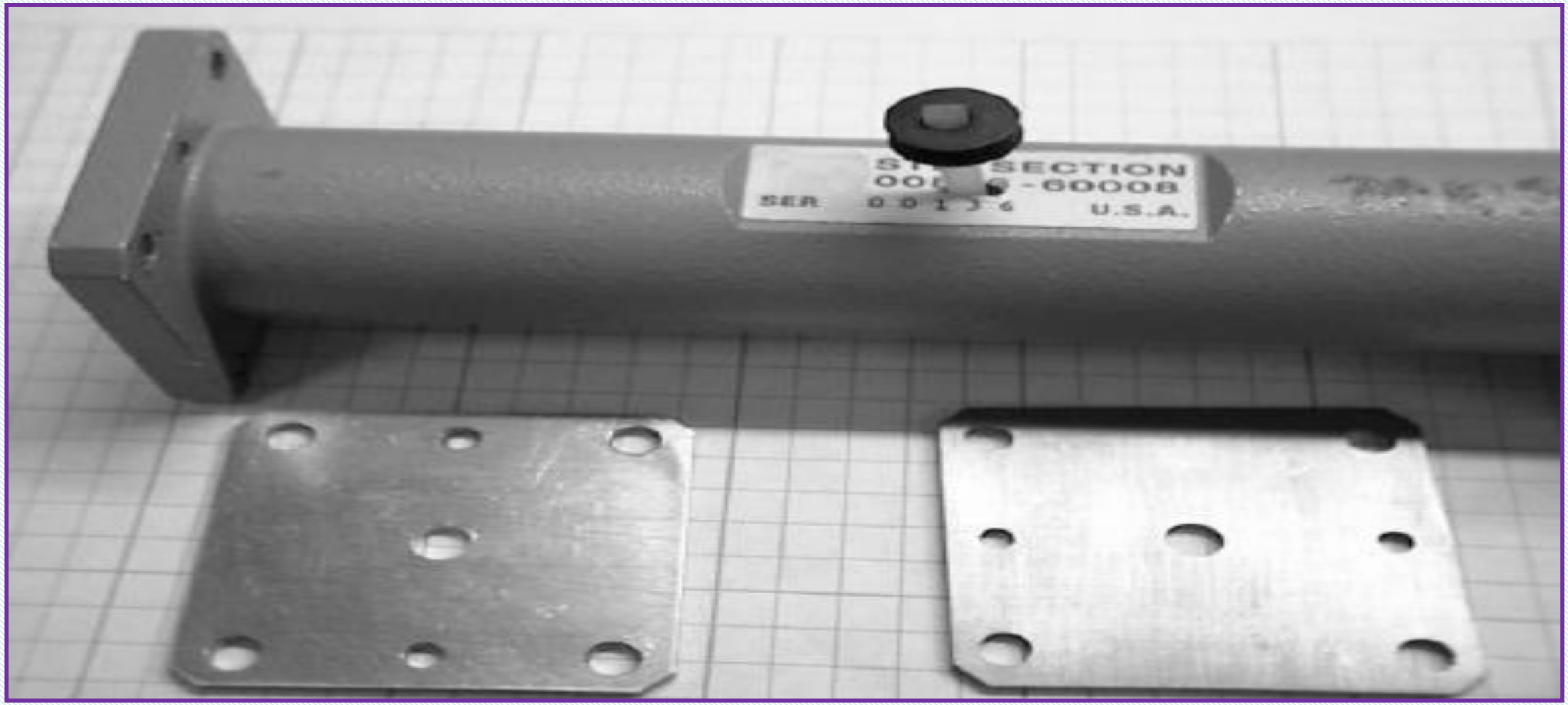
Vc = Объем заполненной полости



$$\varepsilon_r' = 1 + \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s}$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{V_c}{4V_s}\left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c}\right)$$

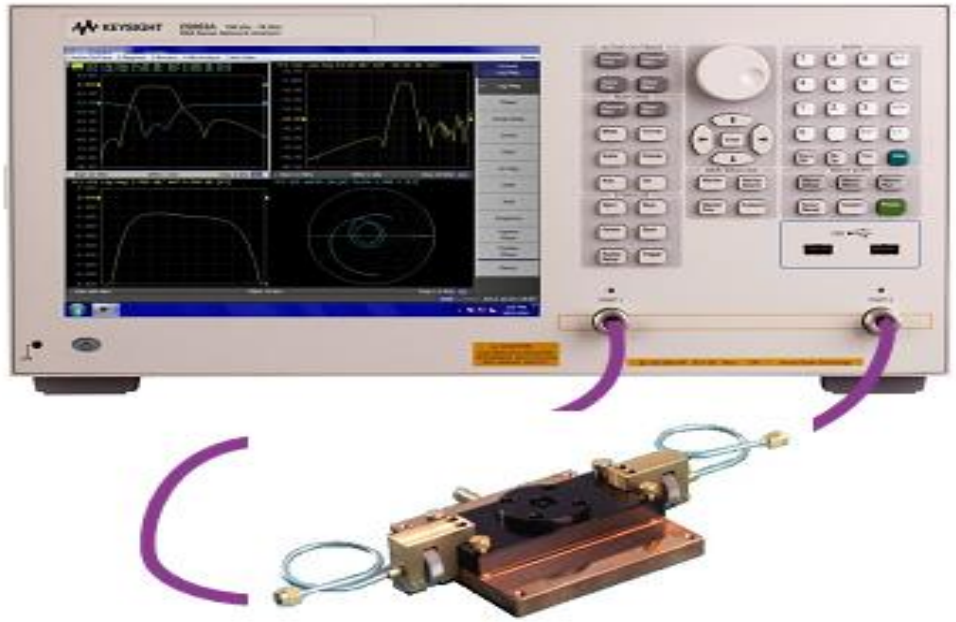
Вариант метода - резонатор в виде прямоугольного волновода с торцевыми диафрагмами Диэлектрик должен быть расположен в максимуме электрического поля, магнетик - в максимуме магнитного поля.



Метод резонансной полости



Keysight Split Cylinder Resonator IPC TM-650-2.5.5.5.13



Split Post Dielectric Resonators from QWED

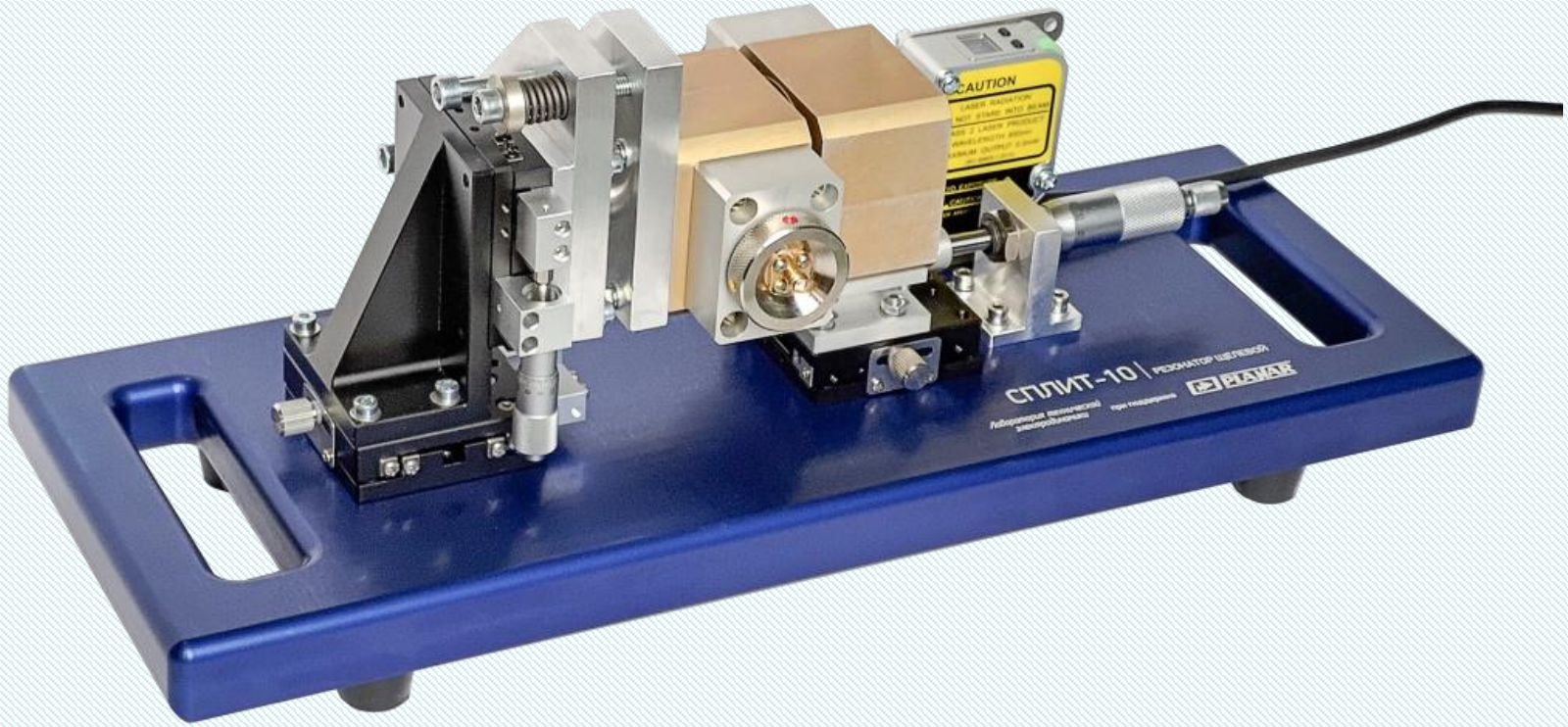
ASTM 2520 Волноводные резонаторы



IPC ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Резонатор для измерения комплексной диэлектрической проницаемости листовых материалов в диапазоне СВЧ (фирма «ПЛАНАР)



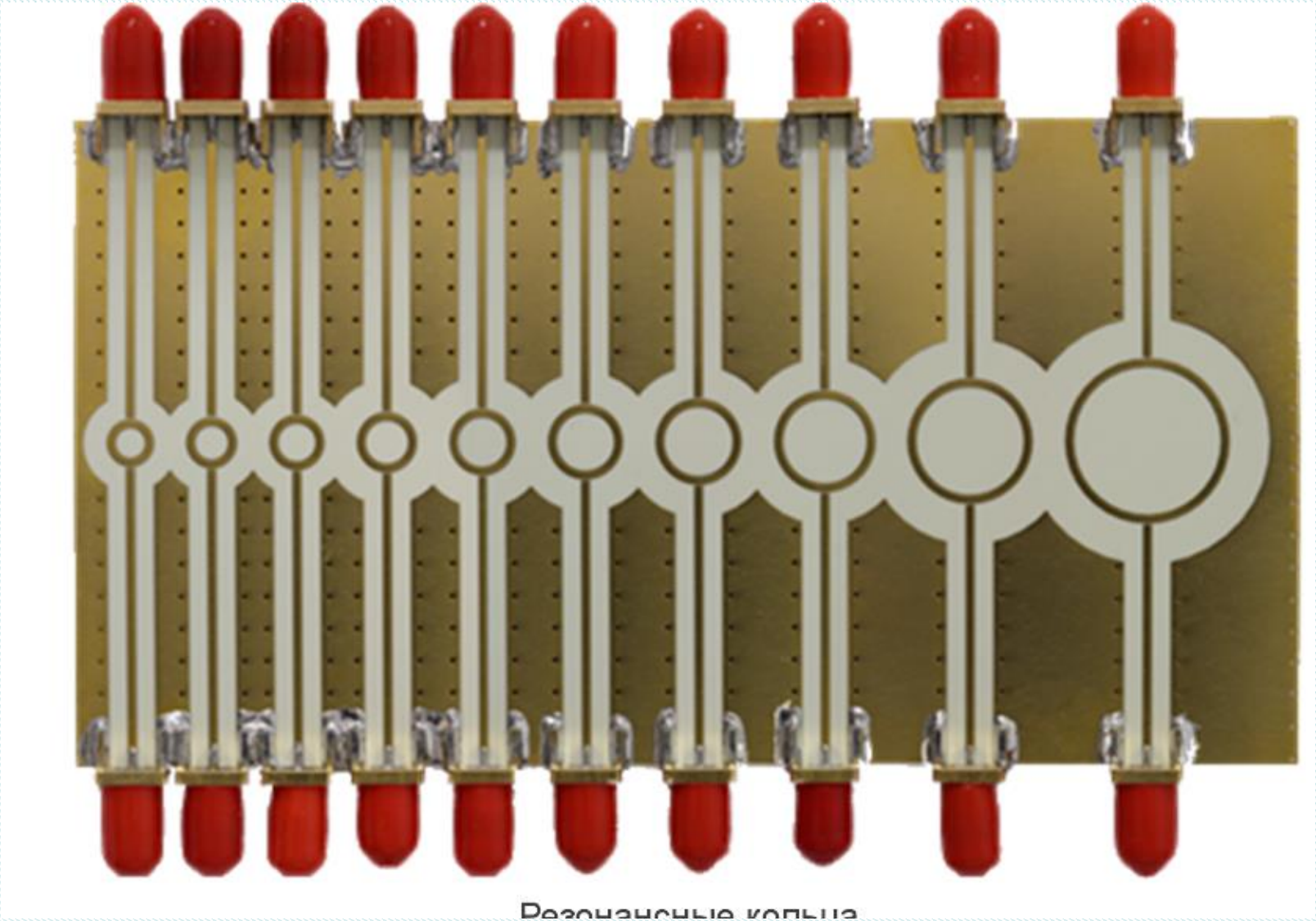
Частоты измерений лежат в диапазоне 8–20 ГГц (точные значения зависят от параметров образца, возможна разработка резонатора под требуемый диапазон частот)

Относительная диэлектрическая проницаемость от 1.2 до 20

Тангенс угла диэлектрических потерь от 0.3×10-4 до 100×10-4

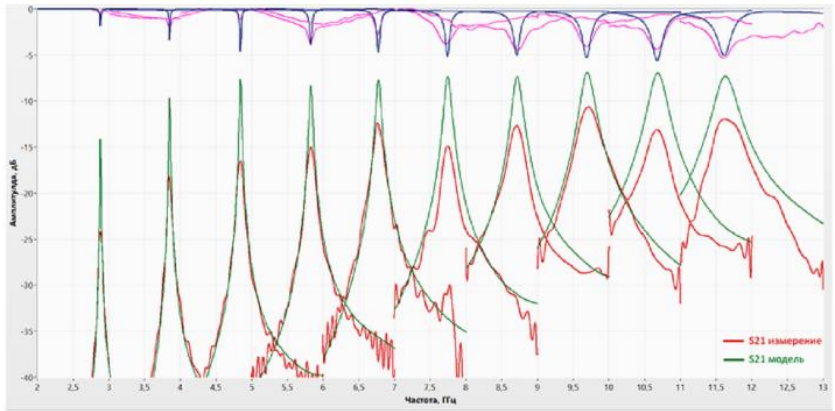
Толщина образца от 0.5 до 2.5 мм

Кольцевые резонаторы для измерения параметров СВЧ подложек



Резонансные кольца

Каждое кольцо рассчитано на одну частоту – в пределах 4 Ггц…12 ГГц. Красным отмечены экспериментальные данные, зеленым – результаты моделирования



Достоинства метода с использованием резонатора:

- -Достаточно точный;
- -Чувствительный для материалов с малыми потерями;
- -Использует известную методику обработки результатов и стандартную аппаратуру;
- -Нагляден и прост;
- -Есть возможность измерять магнитные материалы;

Недостатки метода с использованием резонатора:

- -Резонатор имеет узкий диапазон перестройки. Надо иметь набор измерительных ячеек для измерений в широком диапазоне частот;
- -Сложен механизм перестройки резонатора и его и градуировка;
- - В НЧ части СВЧ диапазона размеры резонаторов становятся чрезмерно большими;
- -Снижение точности при больших потерях в диэлектрике;
- -Измерения возможны только с маленькими образцами.

Особенности применения:

- Используется для материалов с низкими потерями;
- Измерения на фиксированных частотах;

Метод резонансной полости



Очень точный, лучший для материалов печатных плат .



Очень чувствительный при низких потерях (до 10^{-6} в некоторых резонаторах)



Различные конструкции резонаторов, чаще неразрушающее воздействие

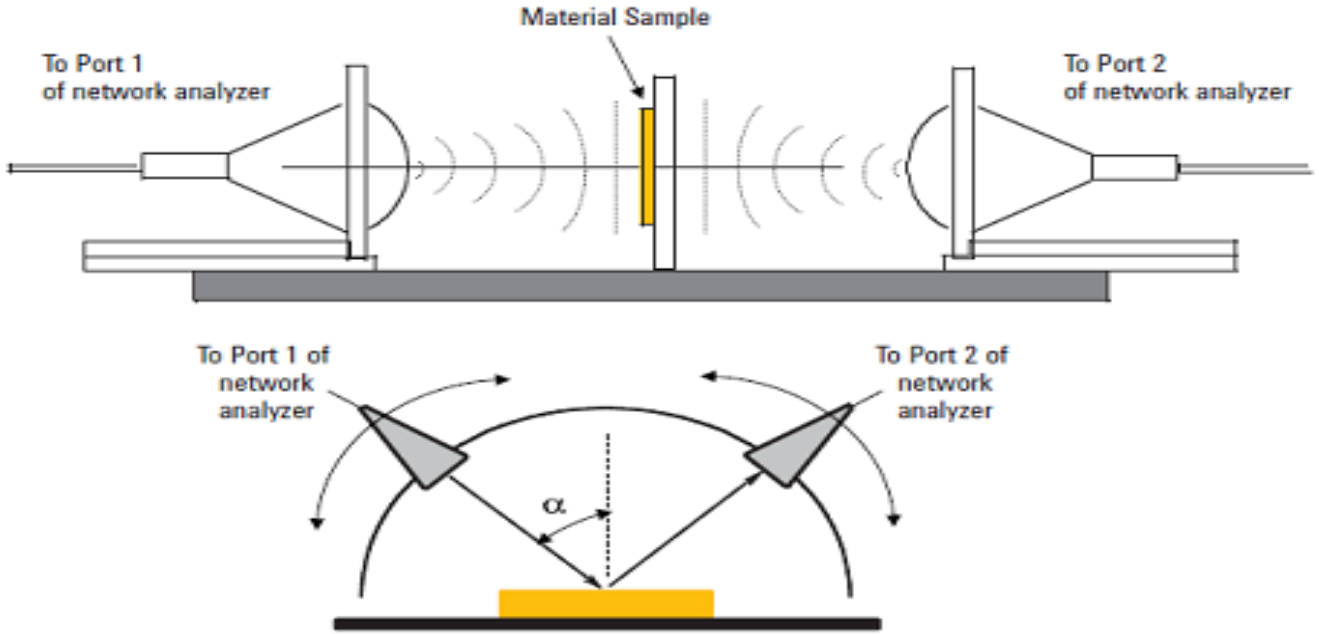


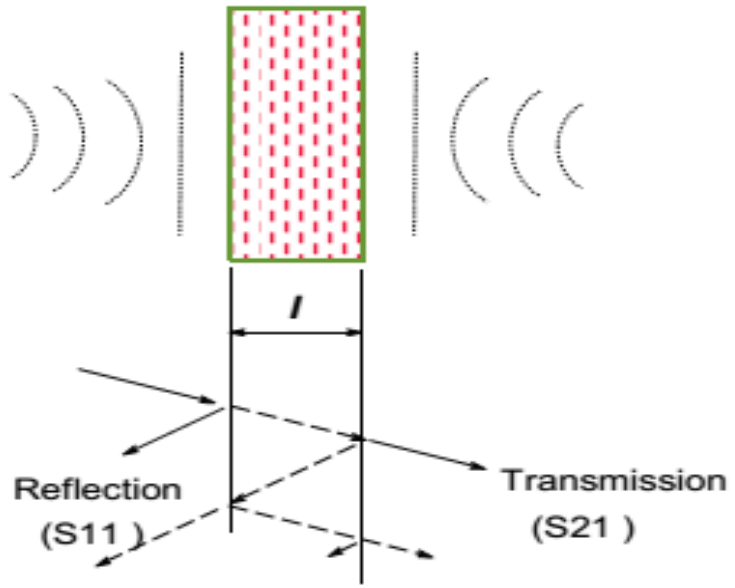
Не позволяет получить данные в диапазоне частот



Высокая точность изготовления образца для волноводных резонаторов ASTM .

Измерение в свободном пространстве





Требования к образцу:

- Плоские образцы с параллельными гранями (плоскостями)
- Образец должен находиться вне реактивной области антенны
- Образец должен перекрывать большую часть луча
- Толщина в пределах от 20 до 360 градусов

Особенности метода

- Неконтактный, неразрушающий
- Высокочастотный – нижняя частота ограничивается размерами образца и антенн
- Широкий диапазон температур
- Можно изменять поляризацию антенны при измерении анизотропных материалов
- Измерение магнитных материалов

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

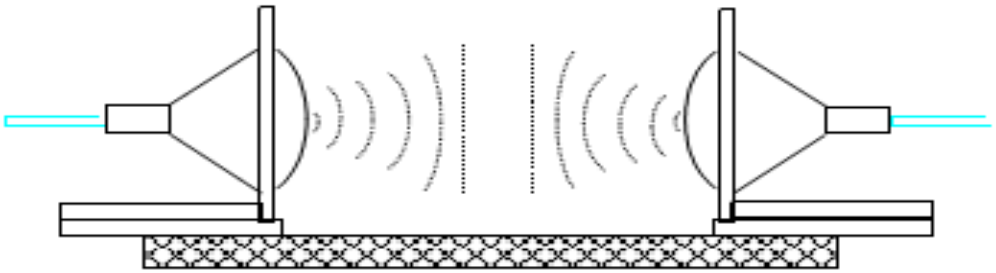
Измерение в свободном пространстве



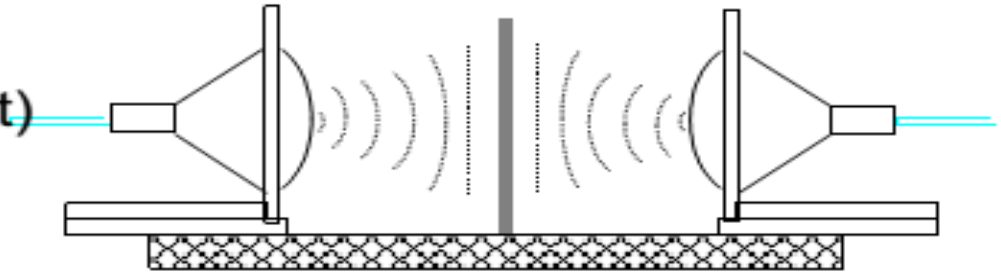
Установка для измерения диэлектрической проницаемости в свободном пространстве

Калибровка TRM

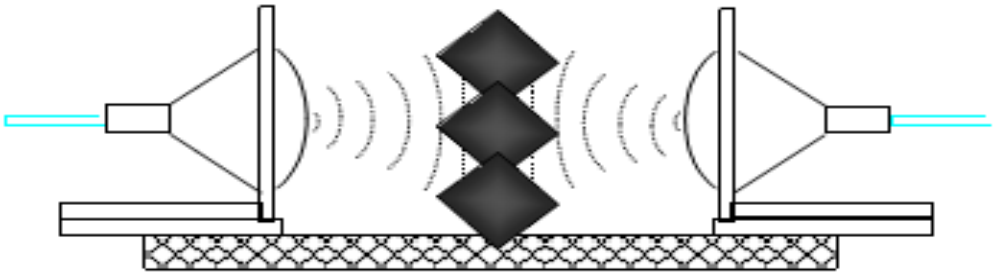
Проход (Thru)



Отражение (Reflect)



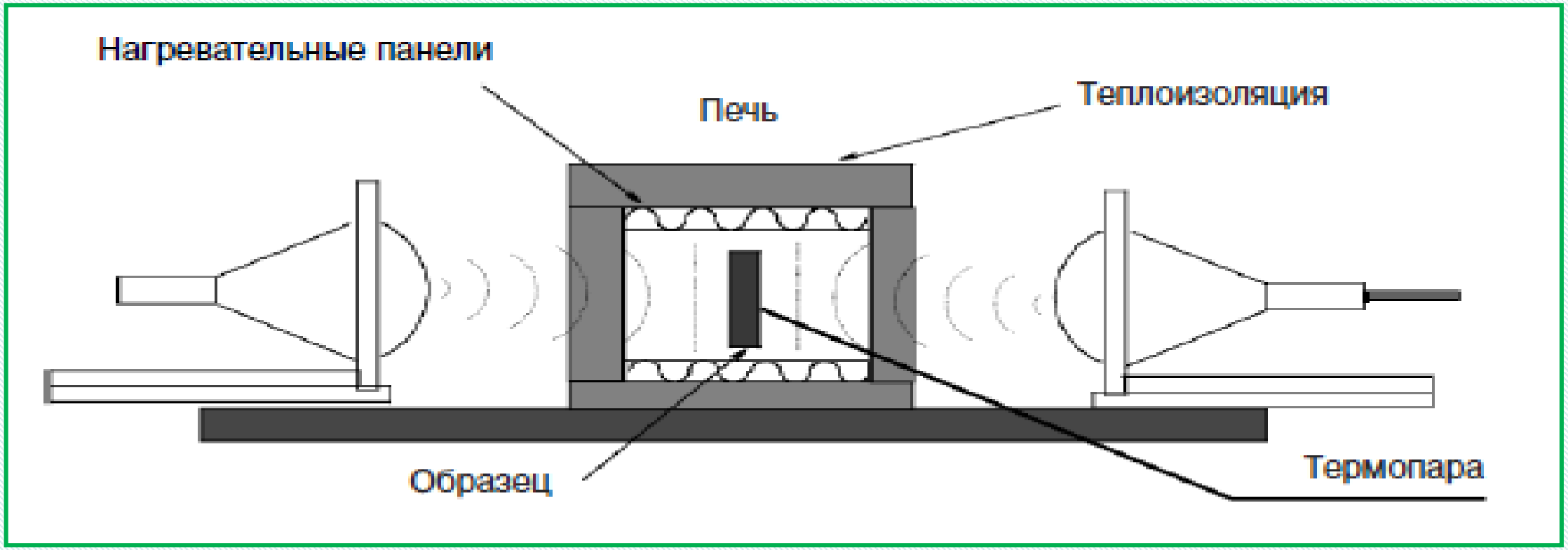
Нагрузка (Match)



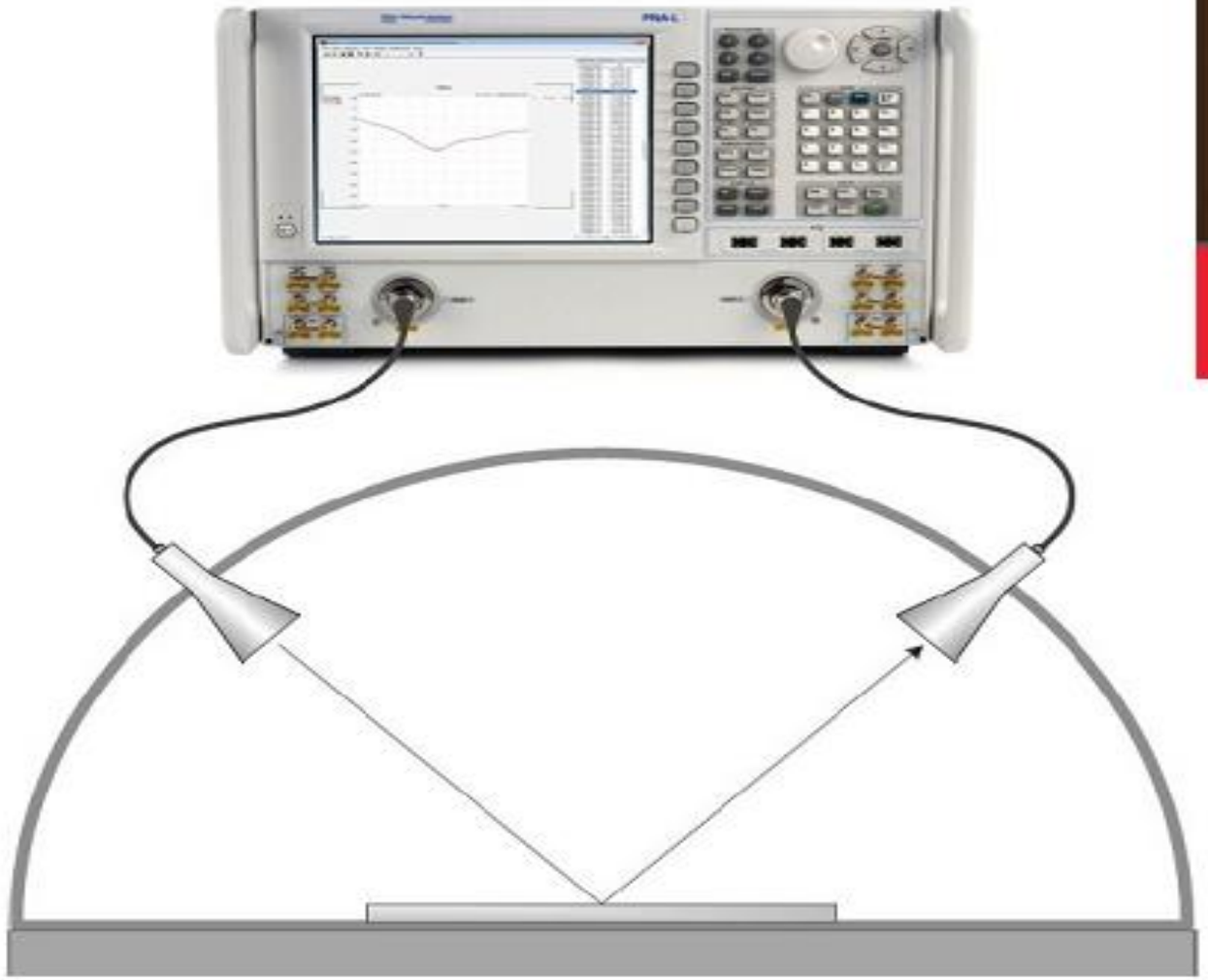
Сложно найти широкополосные поглотители с точными характеристиками

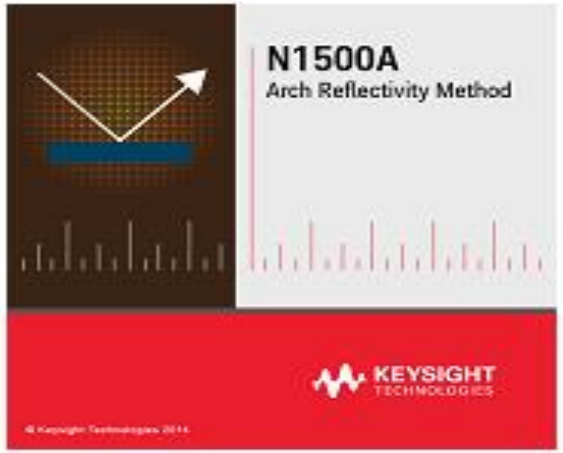
Термоиспытания диэлектрических и магнитных материалов

В свободном пространстве легко осуществить высокотемпературные измерения, поскольку отсутствует контакт с образцом. Образец может нагреваться при помещении в печь, имеющую “окна” из изоляционного материала, который прозрачен для СВЧ излучения.

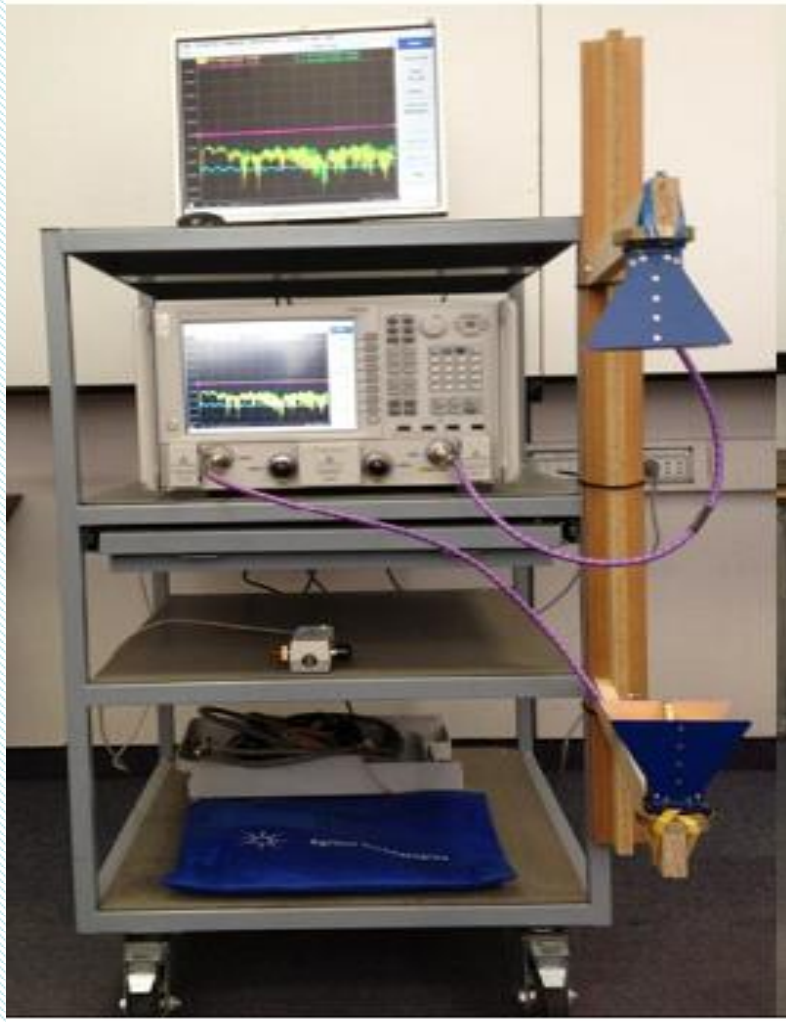


Измерения на отраженном сигнале





Измерение в свободном пространстве



Установка



Измерение шины



Измерение шины с землей

Достоинства метода измерения в свободном пространстве:

-Бесконтактный, неразрушающий;
-Идеален на удаленных измерениях;
-Широкополосный (крайняя частота 325 ГГц, определяется антенной);
-Применяется на высоких температурах;
-Возможность измерения магнитных материалов;
-Возможно переключение поляризации антенны для измерения свойств анизотропных материалов.

Недостатки:

-Образец должен иметь плоские параллельные грани;
-Необходимы очень большие образцы на низких частотах;

-Особенности применения:

-Используется для материалов со средними потерями

Измерение в свободном пространстве



- Безконтактный, неразрушающий
- Не требуется точная механическая обработка
- Высокотемпературный
- Высокая точность



- Калибровка GRL
- Гейтинг во временной области



- Измерение диэлектрической и магнитной проницаемости



Необходим достаточно большой и тонкий образец с параллельными гранями



Необходимо точно знать толщину металлической пластины

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

А.А. Данилин

***Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ»
(2 редакция)***

Измерение мощности на СВЧ

**Санкт-Петербург
2025 г.**

Определение мощности сигнала

Мощность сигнала – квадрат напряжения сигнала на нагрузке 1 Ом. Мгновенная мощность меняется во времени: .

$$p(t) = u(t)i(t) = \frac{u^2(t)}{1Ом},\ Вт$$

Наиболее часто измеряют *среднюю мощность* за заранее выбранный интервал времени Т (много больший периода низшей частоты спектра). Для периодических сигналов – за целое число периодов. Для сигналов с модуляцией – Т должно быть много больше периода сигнала модуляции.

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt$$

Логарифмическая единица мощности «дБм»: $\mathrm{P, дБ} = 10\lg(\frac{\mathrm{P}}{\mathrm{P_0}})$

P0- опорный уровень (P0=1 мВт или 1 Вт). Логарифмическая единица мощности обозначается дБ·мВт (сокращенно дБм) или дБ·Вт.. (dbm, dbw)

Для импульсных сигналов измеряют *импульсную мощность* $P_и$
- среднюю мощность при времени усреднения T, равном длительности импульса.

Иногда используют термин *пиковая мощность* $P_{пик}$ - она равна мгновенной мощности в пике сигнала. Для радиоимпульсов $P_{пик}$ измеряется как мощность, усредненная за период несущей в максимуме огибающей импульса.

При прямоугольной огибающей пиковая и импульсная мощности совпадают.

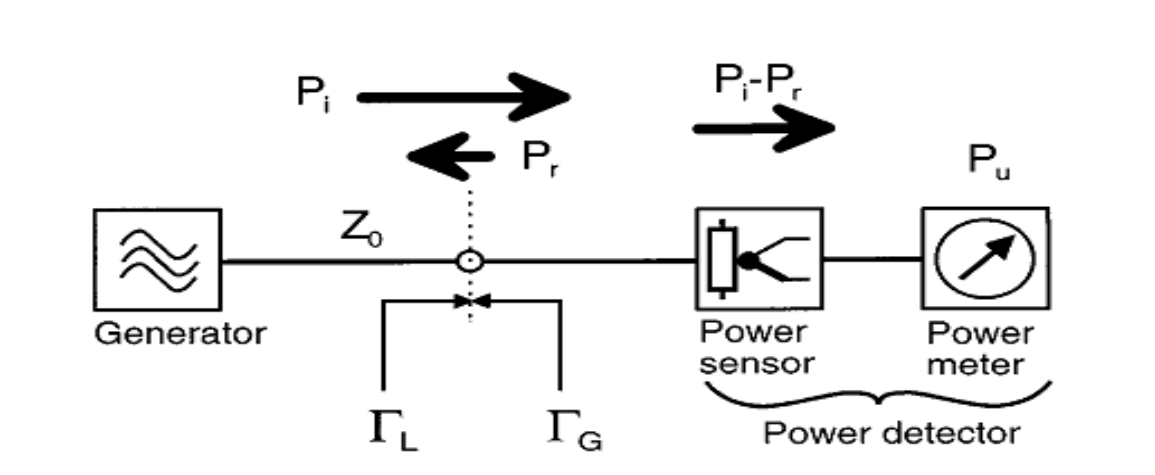
Отношение пиковой и средней мощности называют *пик-фактор* сигнала.

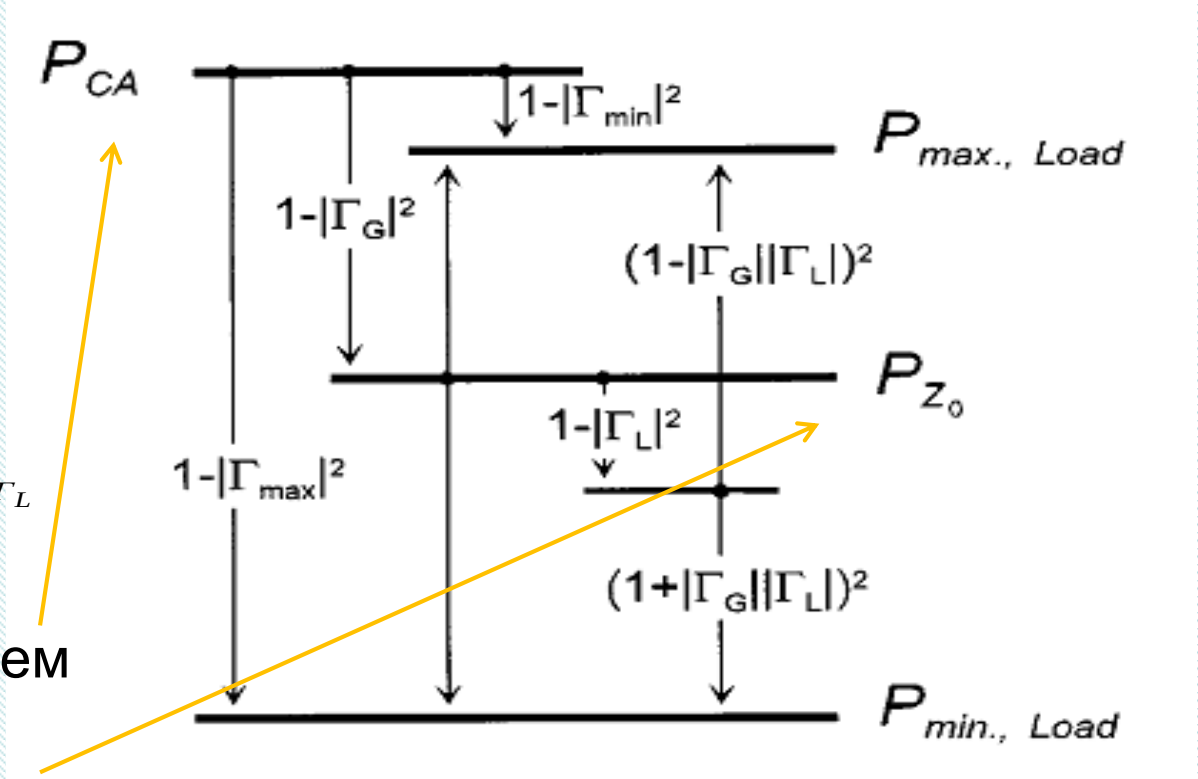
СВЧ приборы для измерения мощности (power meters) разделяют на ваттметры поглощающего типа (вид М3) и ваттметры проходящей мощности (вид М2).

Измерительный тракт *ваттметра поглощаемой мощности* содержит *согласованный* приемный преобразователь (датчик) с разъемом (фланцем) и измерительную НЧ схему, которая позволяет оценить результат преобразования СВЧ энергии.

В *ваттметрах проходящей мощности* измерительный тракт состоит из отрезка стандартной линии передачи и измерительного преобразователя, выделяющего часть сигнала волны. Ваттметр включают в линию передачи между источником сигнала и нагрузкой. Он измеряет мощность, проходящую в нагрузку!!!! Это не мощность падающей волны, это разность между падающей и отраженной мощностью.

Измерительный тракт для рассогласованных генератора и датчика мощности





- Conjugate available power P_{CA} – максимальная мощность в нагрузке, комплексно сопряженной с сопротивлением генератора $Z_L=Z_G^*$;
- P_{Z0} - Available power – мощность в *согласованной* нагрузке при *рассогласованном* генераторе;
- Pmax, Pmin load – интервал мощности в рассогласованной нагрузке при рассогласованном генераторе.

$$P_{Z0} = P_{CA}\left(1-|\Gamma_G|^2\right)$$

$$P_{Load} = P_{Z0}\left(1-|\Gamma_L|^2\right)\Big/|1-\Gamma_L\Gamma_G|^2$$

Параметры ваттметров СВЧ

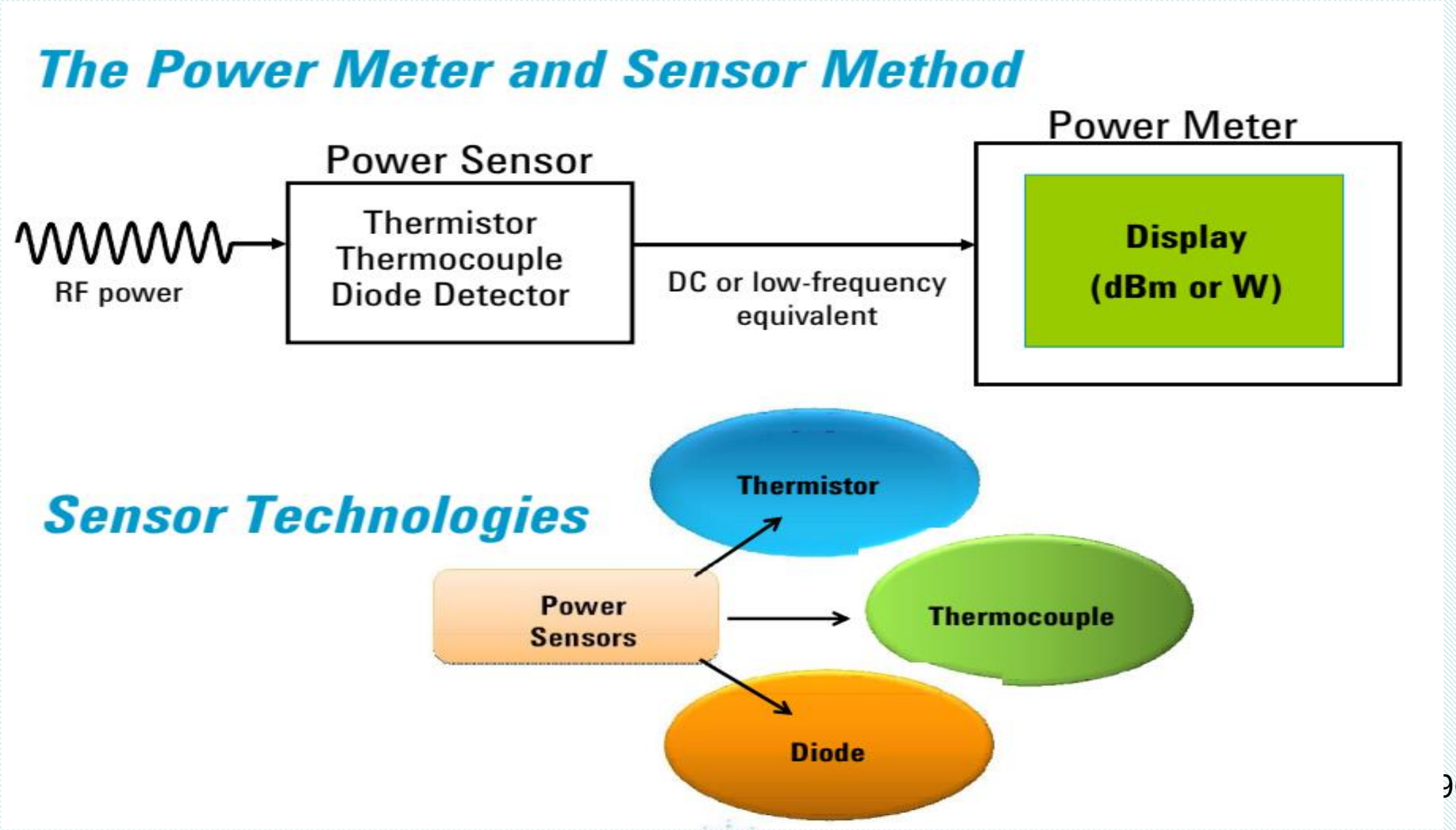
- Рабочий диапазон частот -полоса частот, в которой погрешность ваттметра не превышает паспортную. Для коаксиальных приборов перекрытие частот не менее октавы (в 2 и более раз). Волноводные ваттметры работают в полосе частот соответствующего волновода.
- Пределы измерения мощности. Современные ваттметры обеспечивают диапазон измерений от долей мкВт до десятков Вт и более (до 140 дБ). Различают ваттметры малой (до 10 мВт), средней (10 мВт-10 Вт) и большой (более 10 Вт) мощности;
- КСВН входа ваттметра. Определяет систематическую погрешность рассогласования ваттметра. Обычно находится в пределах 1,1 – 1,7;

•Динамический диапазон ваттметра – это соотношение мощностей максимального и минимального сигналов, которые могут быть измерены одновременно без искажения. Динамический диапазон определяется нелинейностью измерительного преобразователя;

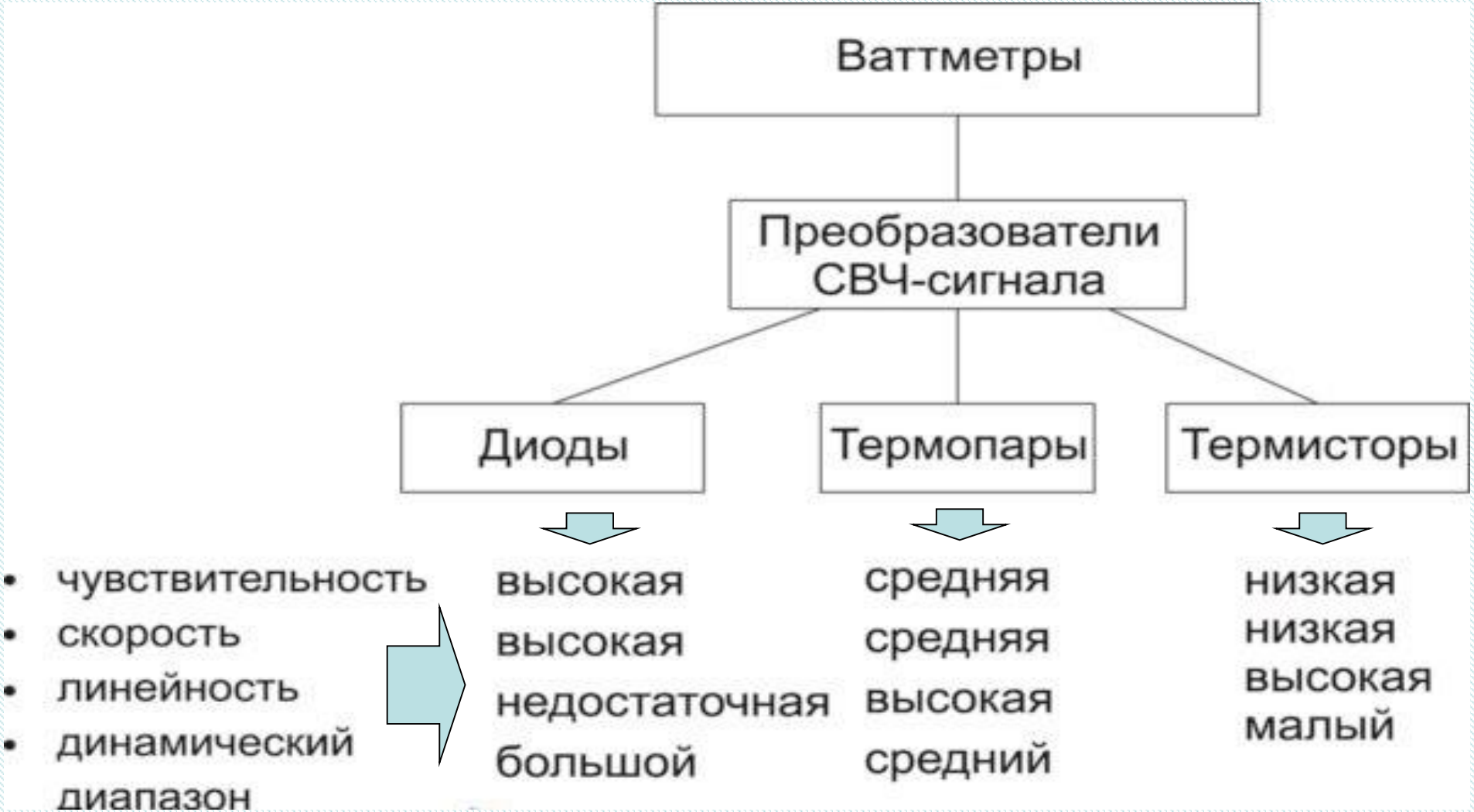
•Основная погрешность и класс точности. Класс точности дает оценку предела допустимой погрешности прибора. Используют ваттметры с классом точности от 1,0 до 25,0;

•Коэффициент эффективности. Используют при калибровке ваттметра на постоянном токе. Характеризует эквивалентность замещения СВЧ мощности. Типовые значения коэффициента эффективности – 0,7 – 1,0.

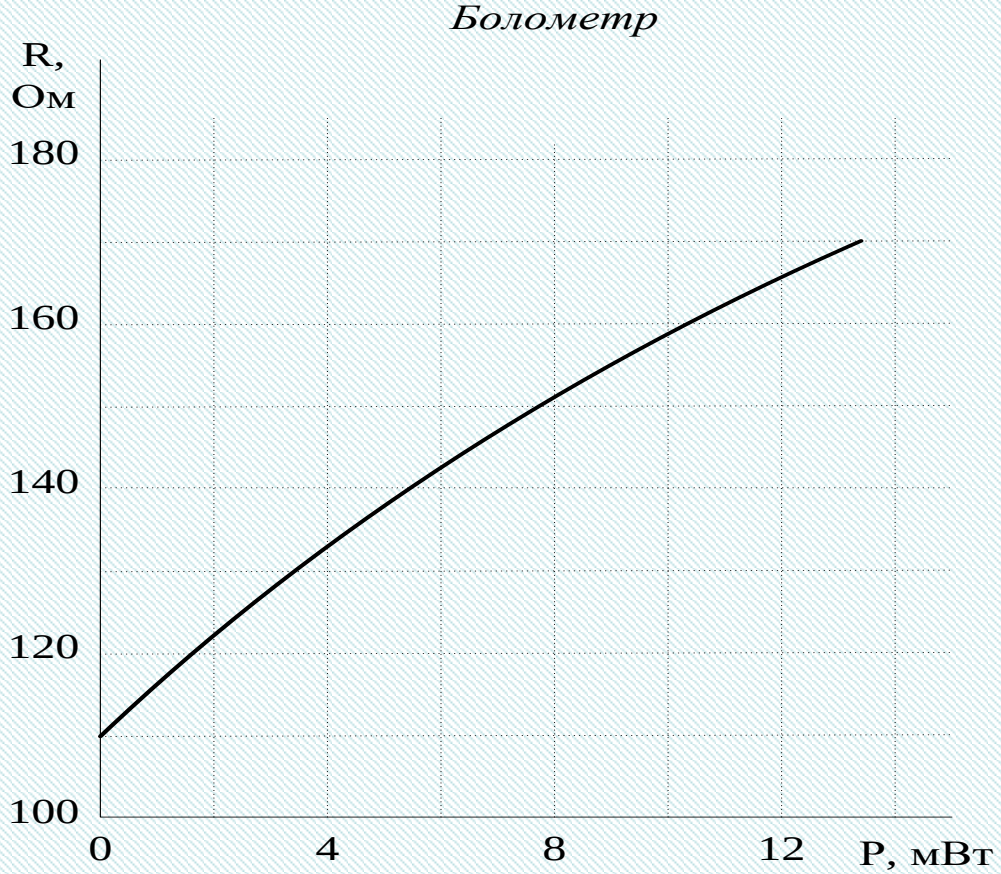
Структура измерителей мощности и датчики СВЧ



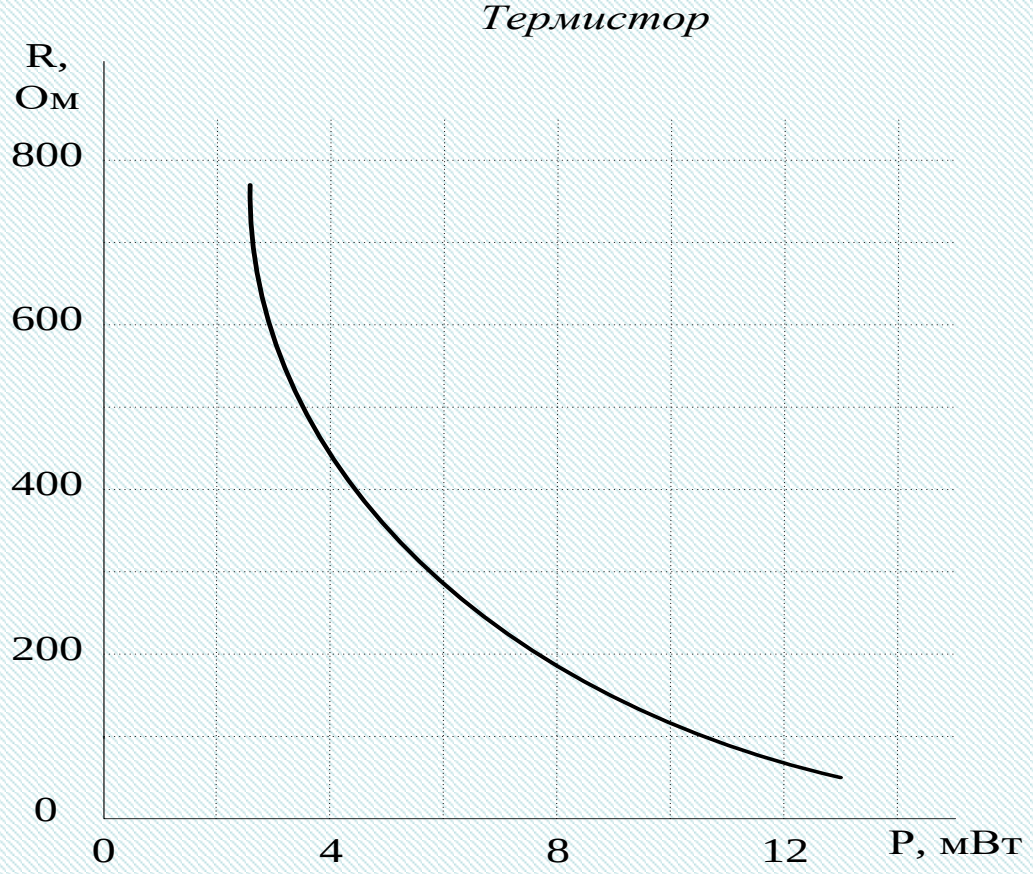
Классификация измерителей мощности СВЧ



Терморезисторные преобразователи (датчики)



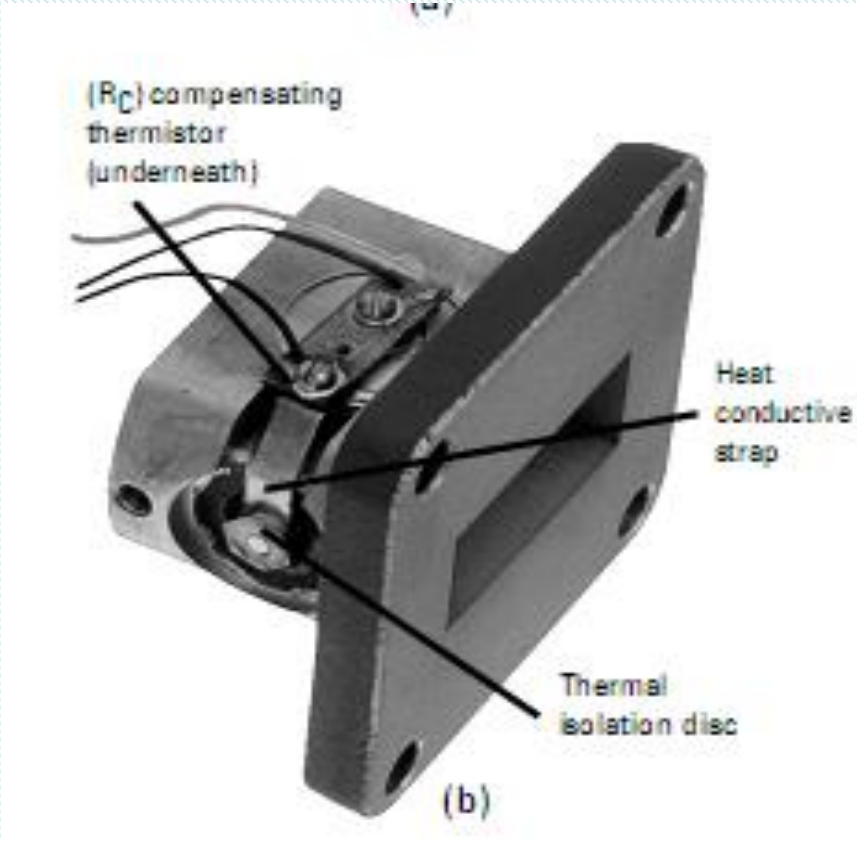
а)

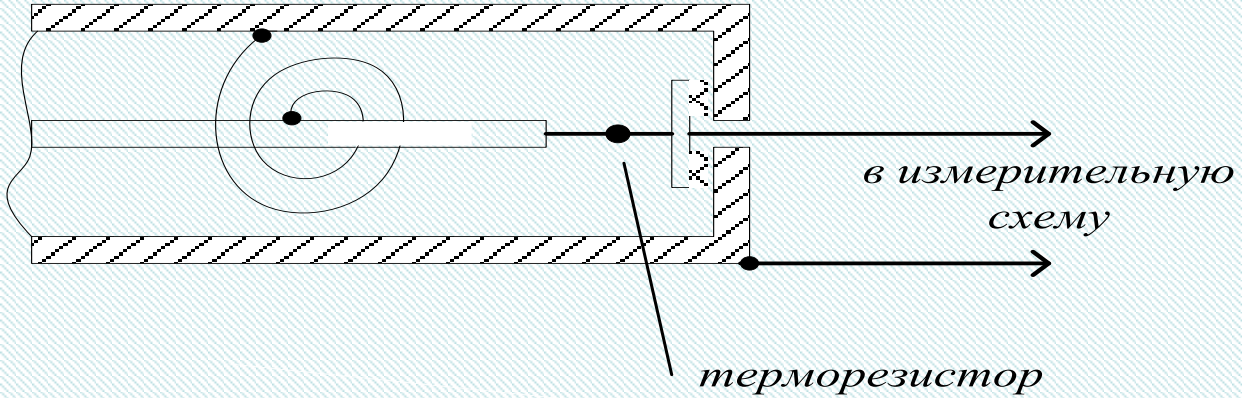


б)

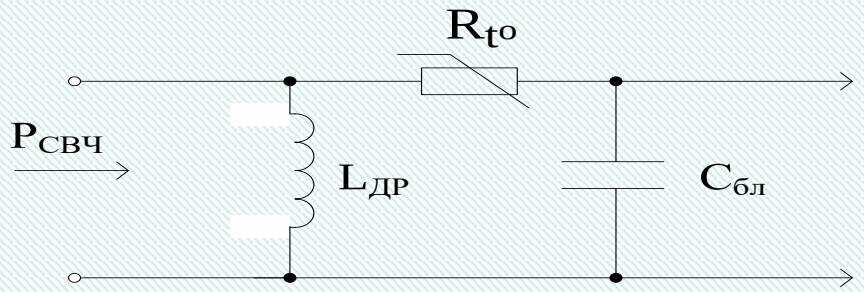
Зависимость сопротивления болометра (а) и термистора (б) от рассеиваемой в нем мощности СВЧ

Конструкция терморезисторного датчика





а)

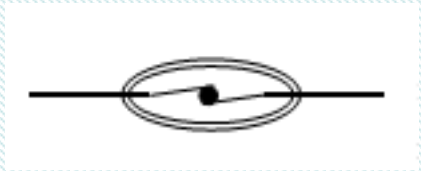


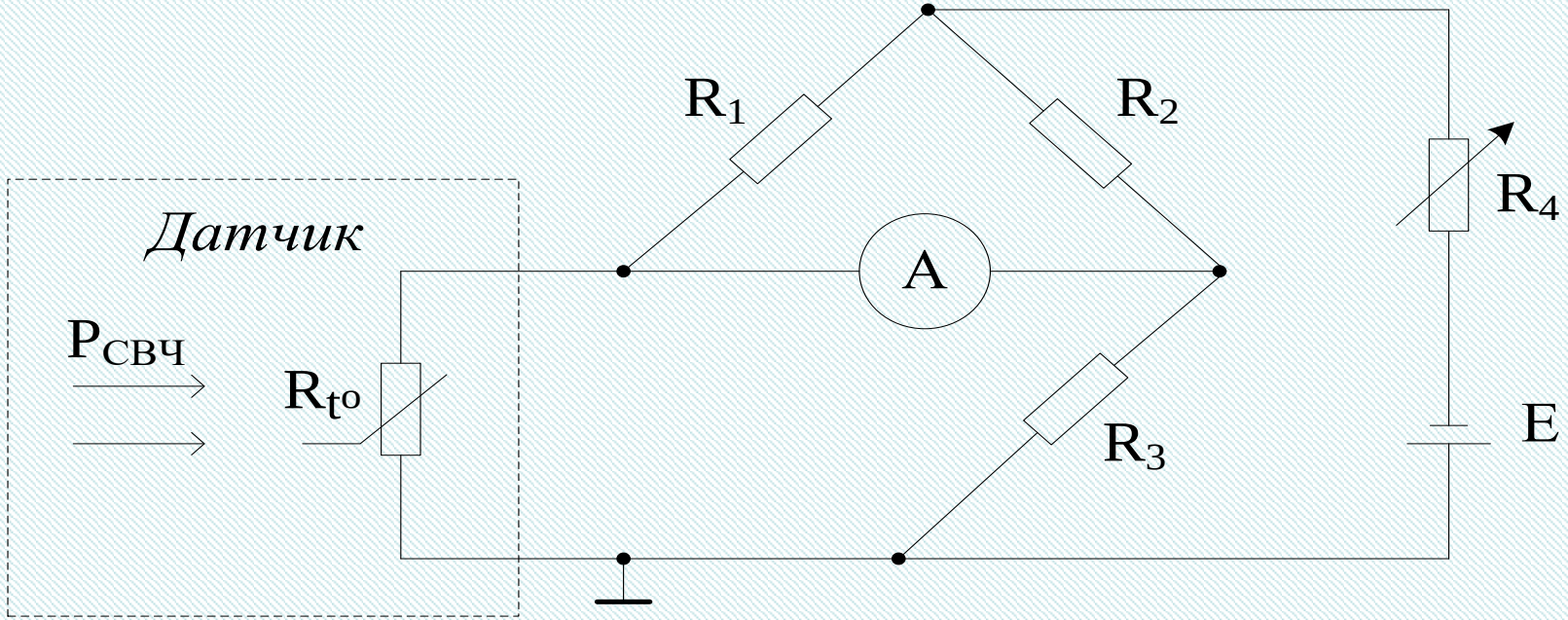
б)

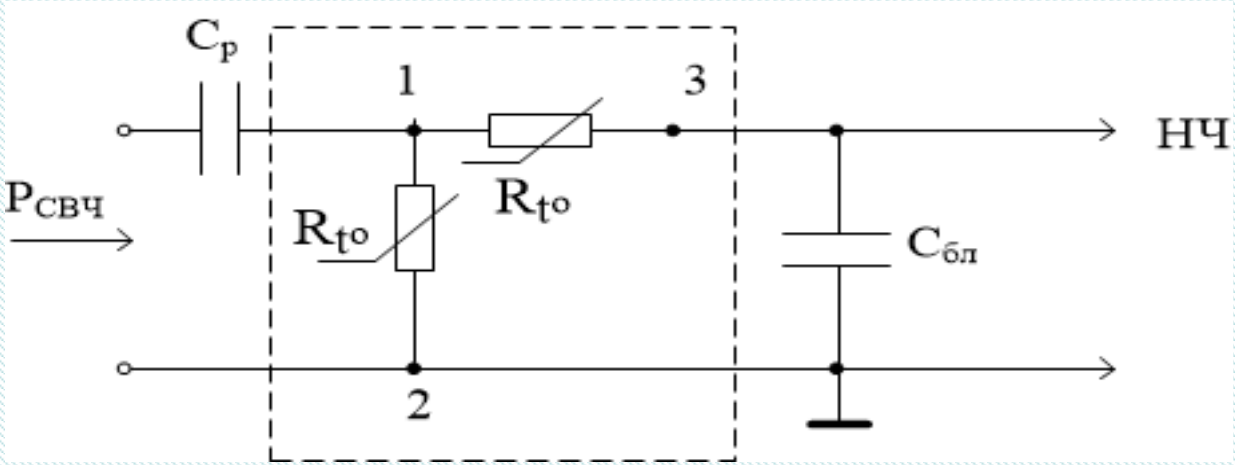
Волноводная и коаксиальная термисторные головки

Терморезисторный ваттметр СВЧ

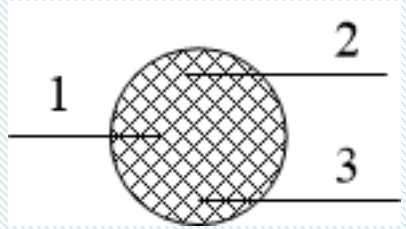
Измерительный мост и конструкция коаксиальной терморезисторной головки



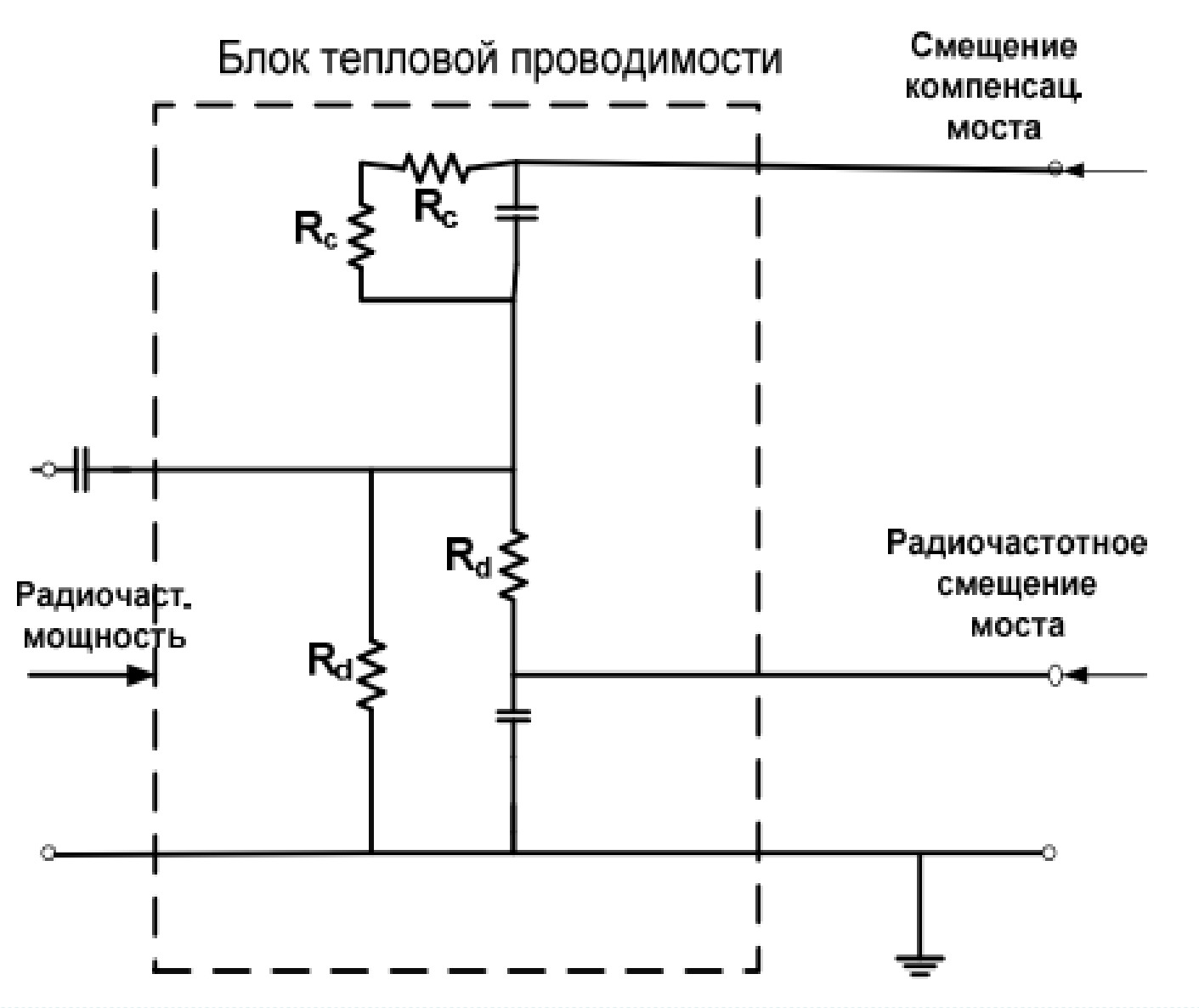




Термокомпенсированная термисторная головка



Конструкция термисторной головки Keysight 8478B

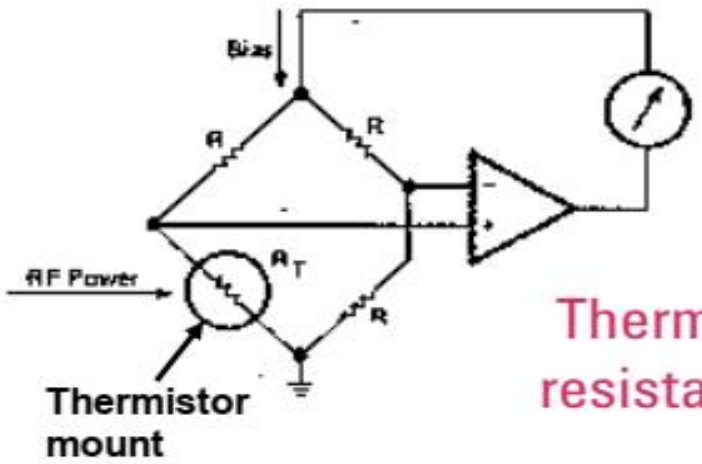


Она содержит 4 согласованных термистора: два измерительных Rd и два термокомпенсационных Rc . Может измерять мощность в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц. Измерительные термисторы по 100 Ом каждый включены последовательно (200 Ом) в балансном мосте по постоянному току и параллельно по радиочастоте, образуя нагрузку 50 Ом для измеряемого сигнала.

Thermistors



- One of the earliest types of power sensors
- Have been replaced in most applications by thermocouples and diode detectors
- Still used for power transfer standards in metrology applications



Thermistor : Semiconductor that changes resistance due to change in temperature

Термоэлектрический датчик мощности

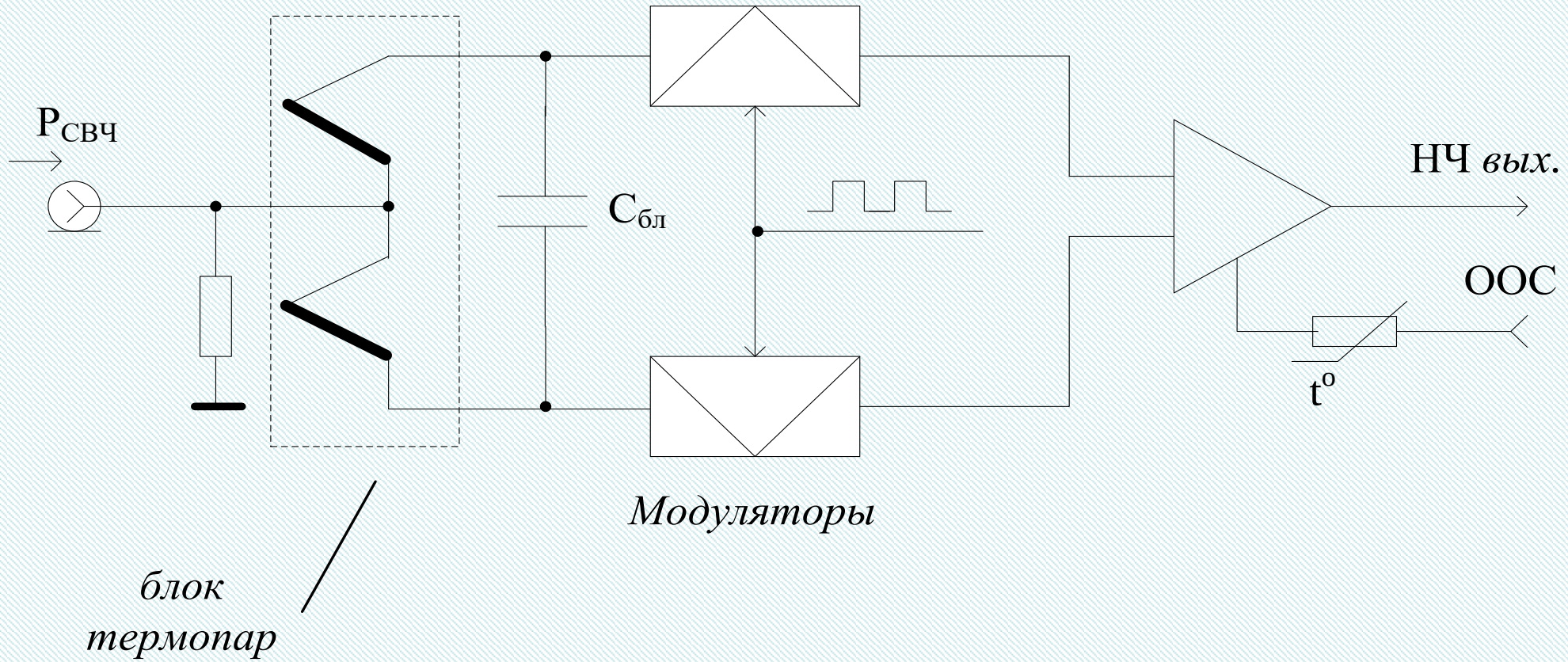
Термопара спай сурьмы и висмута, а также тонких пленок совместно с полупроводниковыми подложками. По сравнению с терморезисторами имеют преимущество в чувствительности, большей механической жесткости, квадратическая характеристика преобразования. Аналог среднеквадратичного вольтметра на термопаре.

Диапазон измерений от 0.1 мкВт до 1 Вт; может быть расширен вверх с помощью калиброванных аттенюаторов. Главные характеристики термопарного сенсора:

- Широкий динамический диапазон порядка 70 дБ.
- Высокая температурная стабильность (с термокомпенсацией).
- Частотный диапазон от постоянного тока до 40 ГГц.
- Высокая точность (порядка 1%)
- Большее быстродействие , чем у терморезисторак.
- Стойкость к кратковременным перегрузкам

Требует малошумящих усилителей, экранировки от помех, предварительной калибровки по эталону мощности

Термоэлектрический сенсор Keysight 8480A



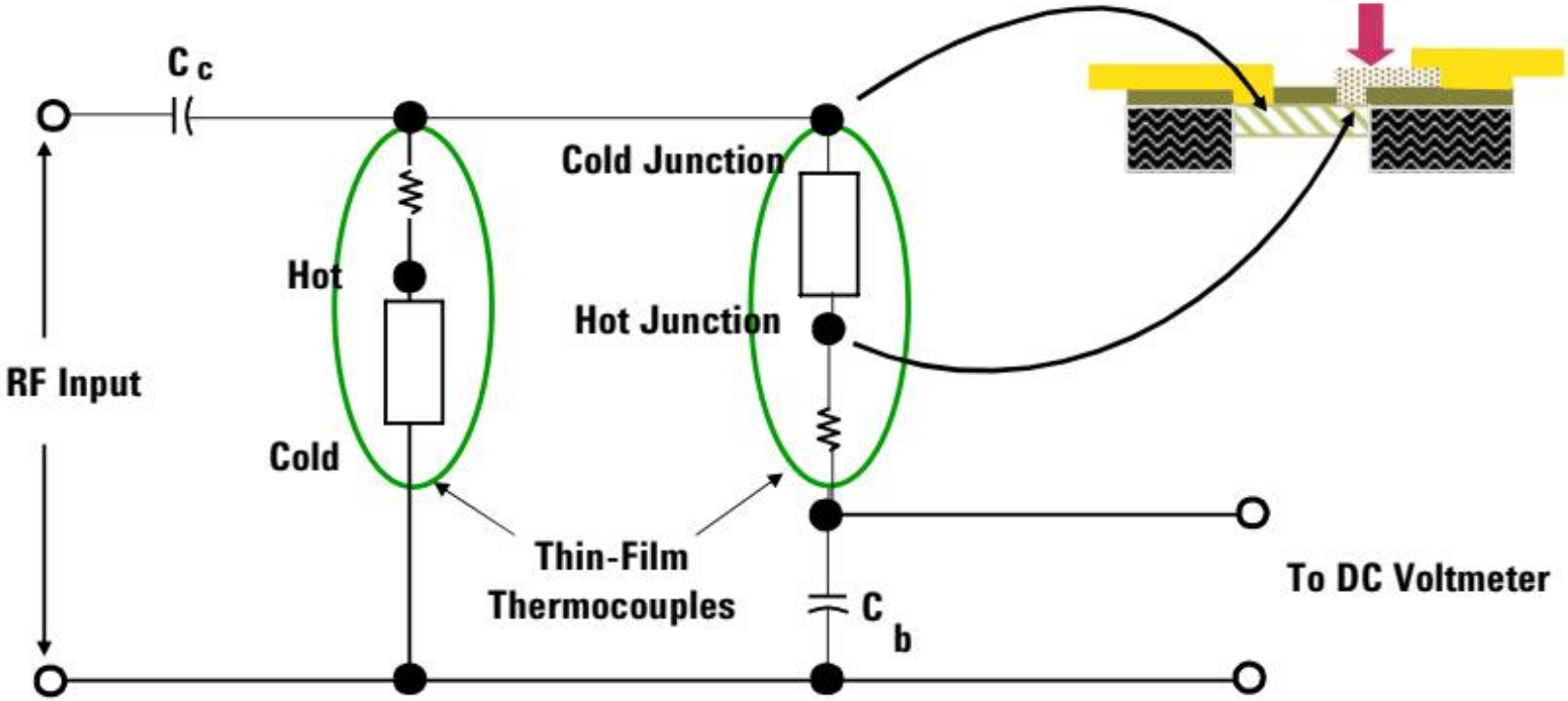
Диапазон частот 100 кГц …50 ГГц, динамический диапазон -30 до +20 дБм (от 1 мкВт до 100 мВт). Максимальная средняя мощность 300 мВт, импульсная – до 10 Вт. КСВН в пределах 1,1 – 1.28. Коэффициент эффективности в пределах 0,95-1. Используются с ваттметрами E4416A…E4419B и HP435A …HP438A.

Термоэлектрические датчики мощности с термокомпенсацией

Thermocouples



- A junction of two dissimilar metals generates a voltage related to temperature
- Junction temperature is directly related to RF power



Термоэлектрический измеритель мощности Agilent E4418B

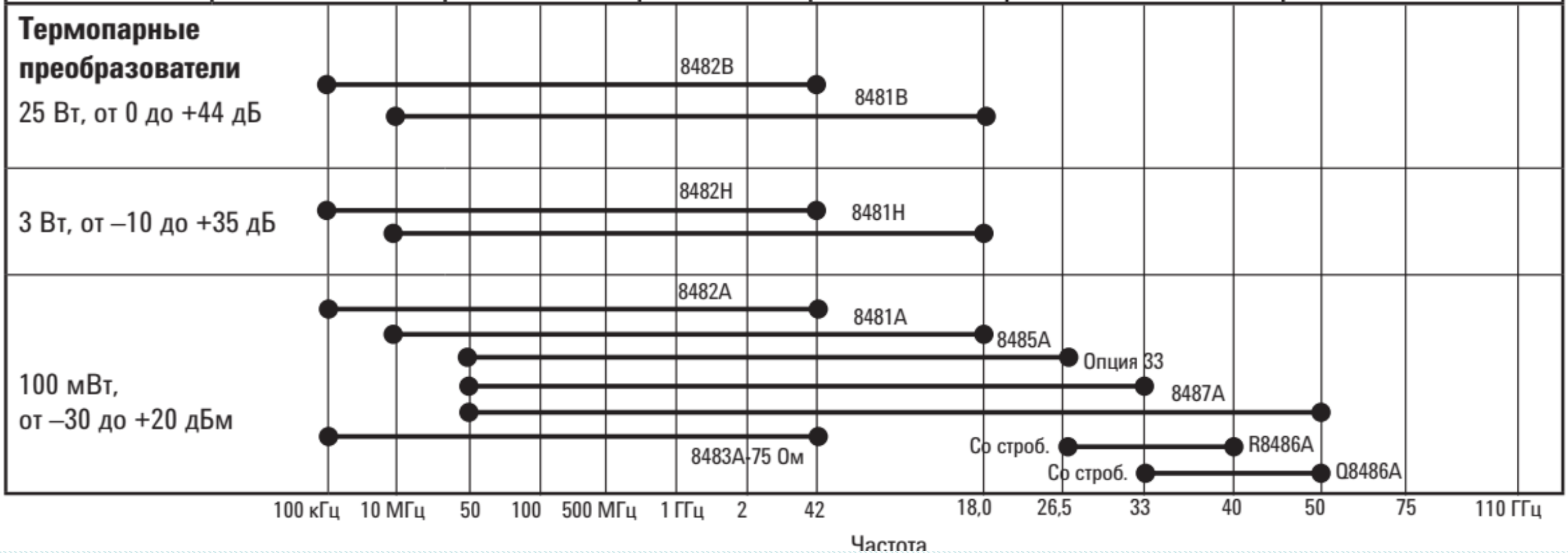
EPM series power meters



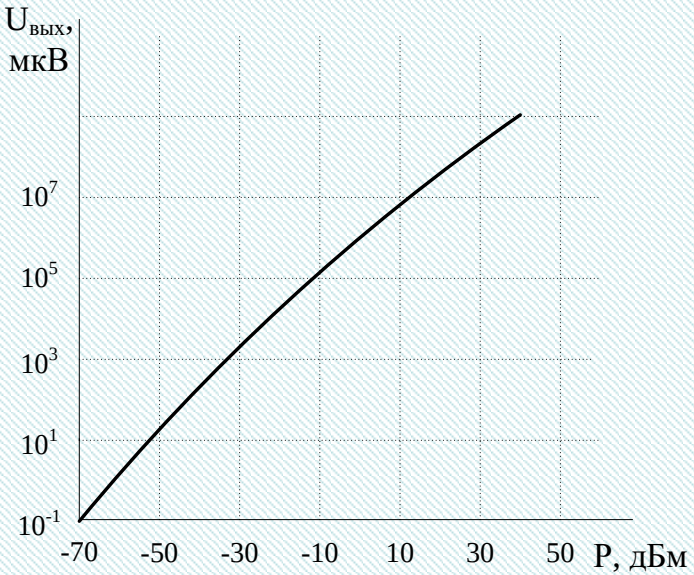
Figure 4-11. E4418B features many user-conveniences and a 90 dB dynamic measurement range. The 50 MHz, 1 mW reference output connector is at the top-right.

Таблица 5. Преобразователи мощности Agilent

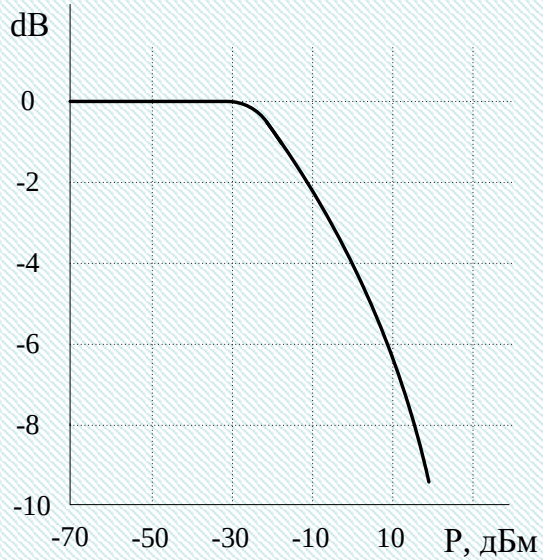
Семейство преобразователей	Технология	Макс. динамический диапазон	Частотный диапазон[1]	Диапазон мощности[1]	Тип сигнала	Макс. скорость измерений, изм./с
Серия 8480	Термопара	50 дБ	От 100 кГц до 50 ГГц	От –30 до +44 дБм	Все типы сигналов в неограниченной полосе	40 (режим x2)



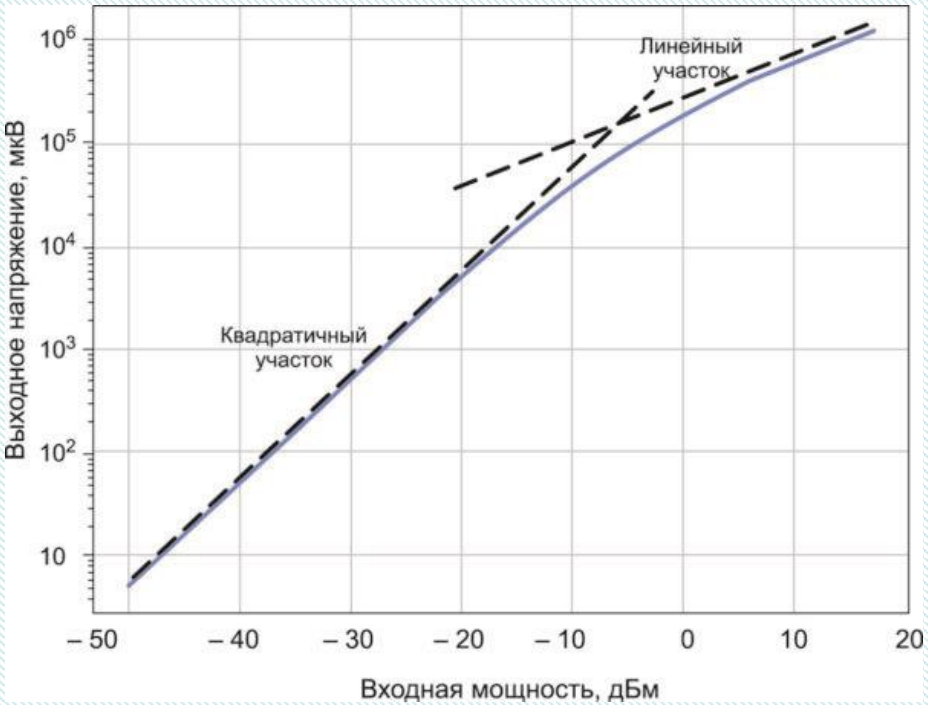
Диодные преобразователи СВЧ мощности



а)



б)



Характеристика датчика мощности с диодом Шоттки.

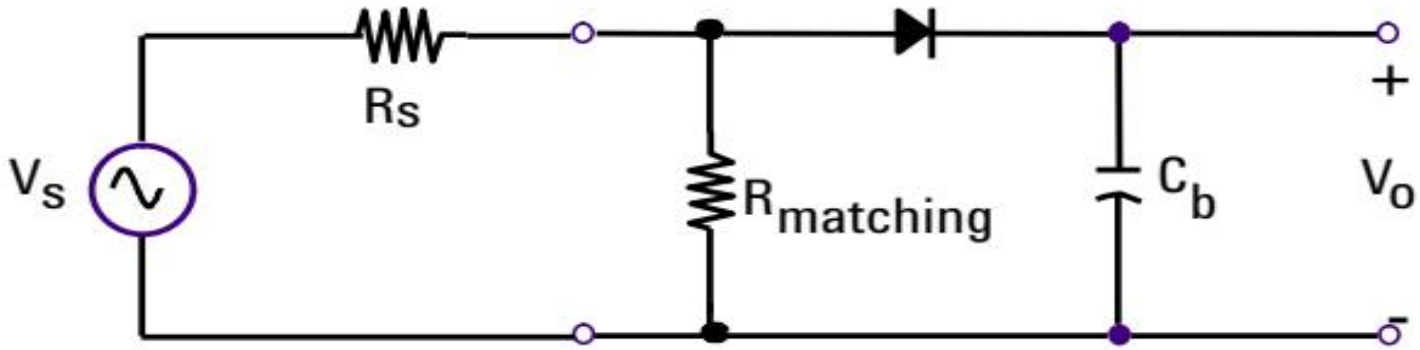
а- зависимость выходного напряжения от мощности в логарифмической системе координат

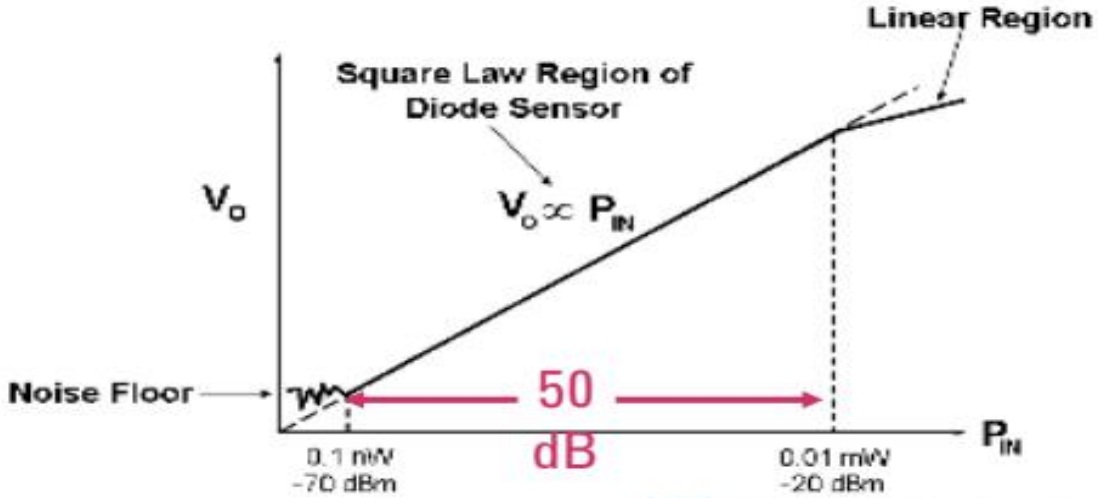
б – отклонение детекторной характеристики от квадратичной- «область обнаружения пиковых значений» (линейный участок ВАХ)

Diode Detectors



Depend on the rectifying characteristics of non-linear microwave detection curve

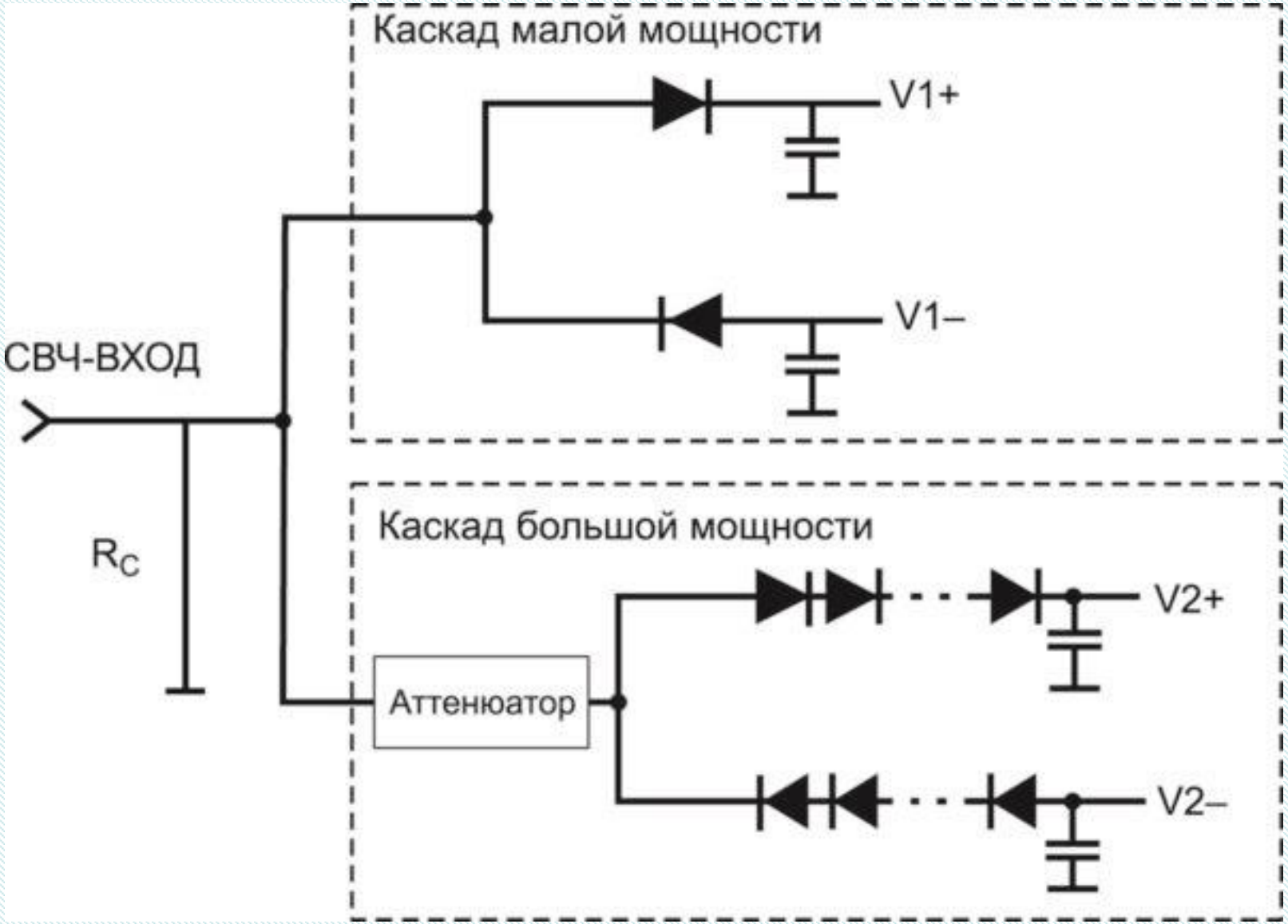




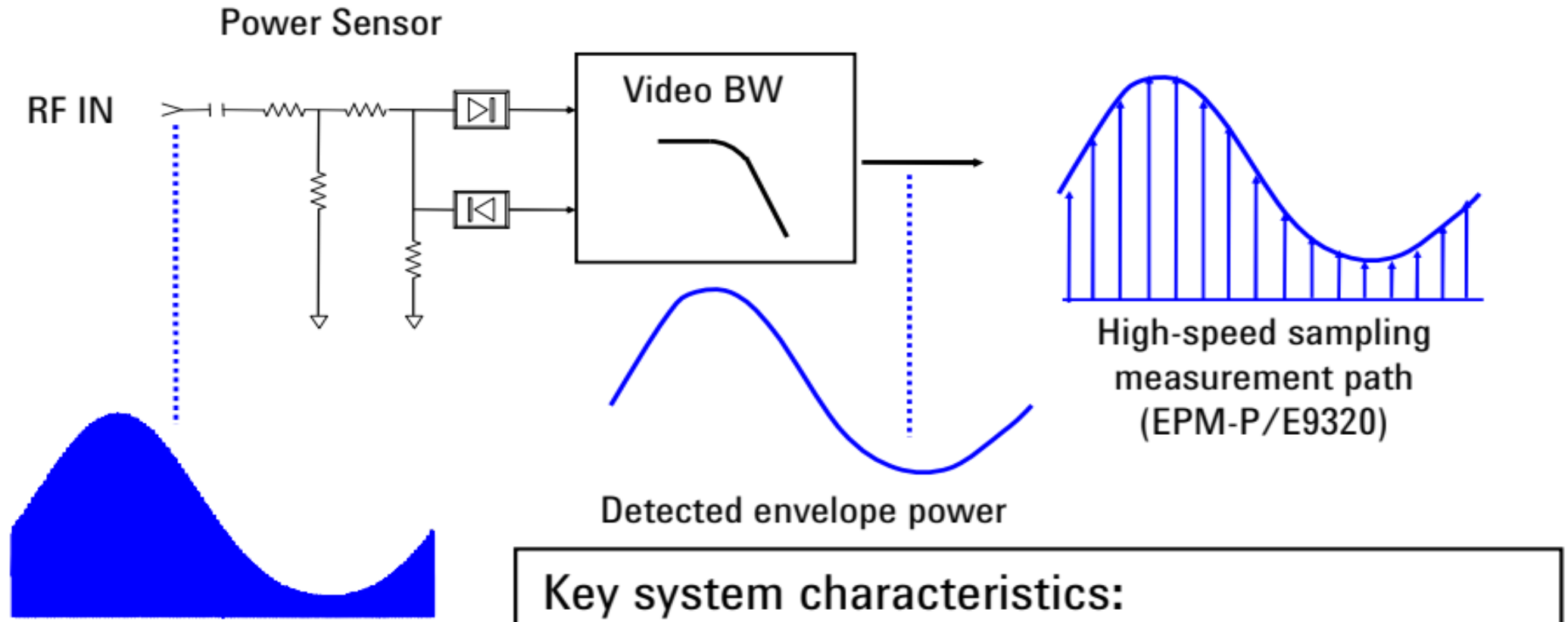
- Характеристика диодного преобразователя:
  - квадратичен от уровня внутренних шумов диода (-70 дБм) до значения порядка -20 дБм
  - переходный участок (-20…0) дБ
  - С уровня 0 дБм характеристика приближается к линейной.
- Диодные преобразователи обладают высокой чувствительностью и используются в диапазоне мощностей от -70 до +20 дБм.
- Малая инерционность диода (до нс) позволяет измерять импульсную и пиковую мощности сигналов со сложными законами широкополосной модуляции
- Приборы с диодными преобразователями позволяют вывести на экран измерительного блока форму огибающей мощности исследуемого импульса (с полосой видеосигнала до сотни МГц). .

Пример: двухканальный ваттметр HP8990A позволяет измерить пиковую и среднюю мощность в диапазоне 0,5 – 40 ГГц (с несколькими преобразователями) с точностью порядка 3.5%. Рабочий диапазон мощностей - 32…+20 дБм.

Расширение диапазона квадратичного детектирования достигается увеличением числа каскадов детектирования (с предварительным ослаблением сигнала перед отдельными каскадами) и включением последовательно нескольких диодов (датчики мощности компаний Keysight Technologies, Rohde&Schwarz, Anritsu)



Диодные датчики для измерения пиковой и мгновенной мощности



Key system characteristics:

- Sufficient video (modulation) bandwidth
- Wide dynamic range
- High-speed, continuous sampling

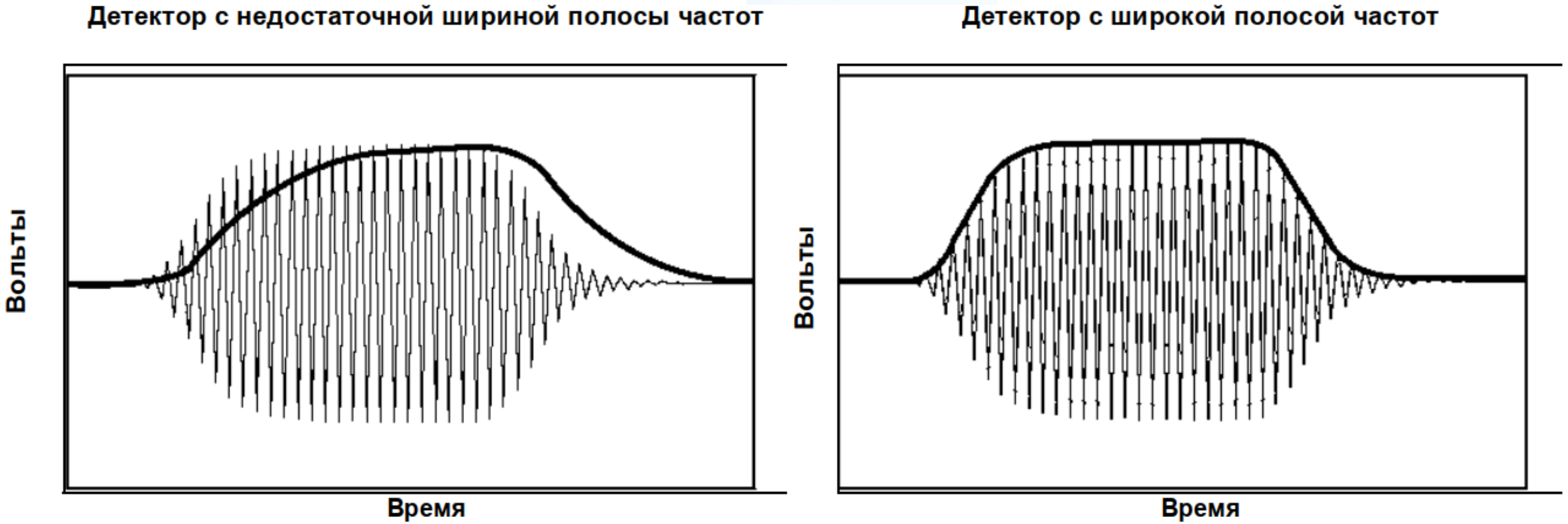
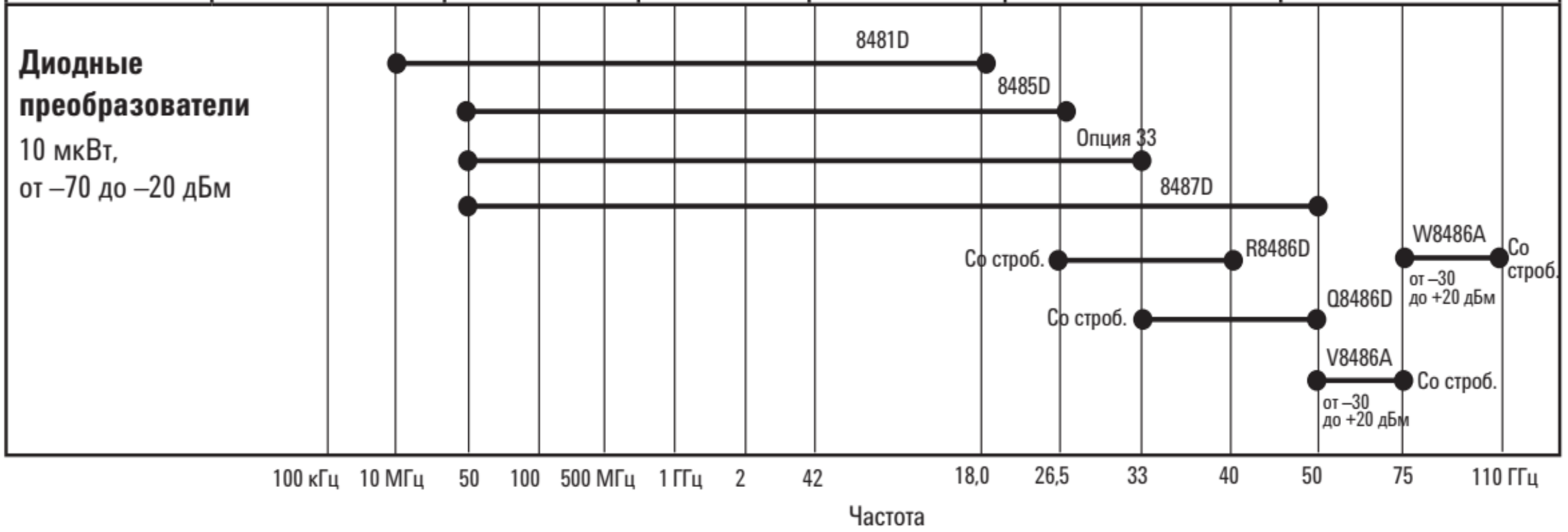


Рис. 3.3.1. Воздействие ширины полосы частот на обнаруженный импульсный сигнал

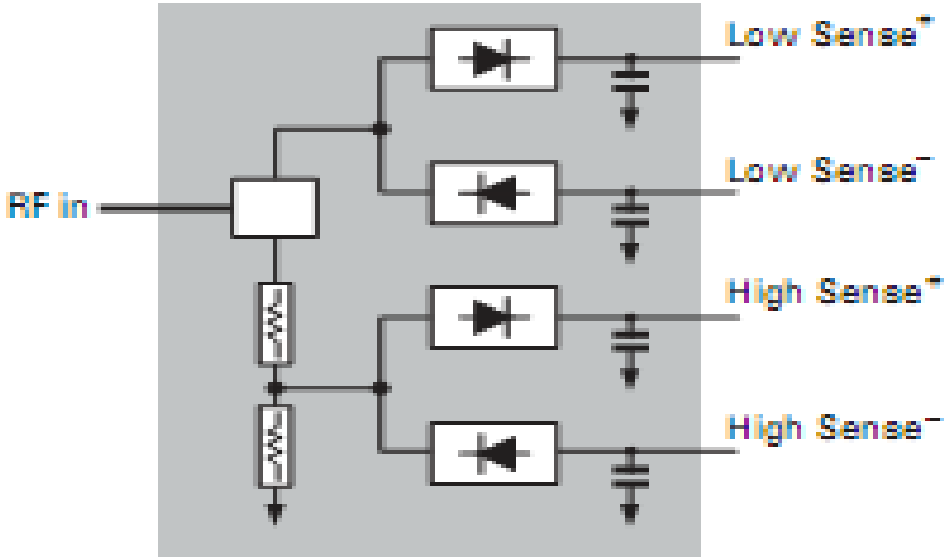
Искажения огибающей мощности радиоимпульса при недостаточной ширине полосы пропускания видеофильтра диодного преобразователя

Семейство преобразователей	Технология	Макс. динамический диапазон	Частотный диапазон[1]	Диапазон мощности[1]	Тип сигнала	Макс. скорость измерений, изм./с
Серия 8480	Диод	50 дБ	От 100 МГц до 110 ГГц	От –70 до –20 дБм	Все типы сигналов в неограниченной полосе	40 (режим x2)



USB датчик мощности (Keysight, серия U2000)





Частотный диапазон 9 кГц - 18 ГГц;
Динамический диапазон измерения: -60…+44 дБм (серия датчиков);

Быстродействие - до 250 отсчетов в секунду

Программное обеспечение - N1918A Power Analysis Manager



Линейка современных измерителей мощности Keysight





Использование датчиков мощности U2000 в скалярном анализаторе цепей СВЧ

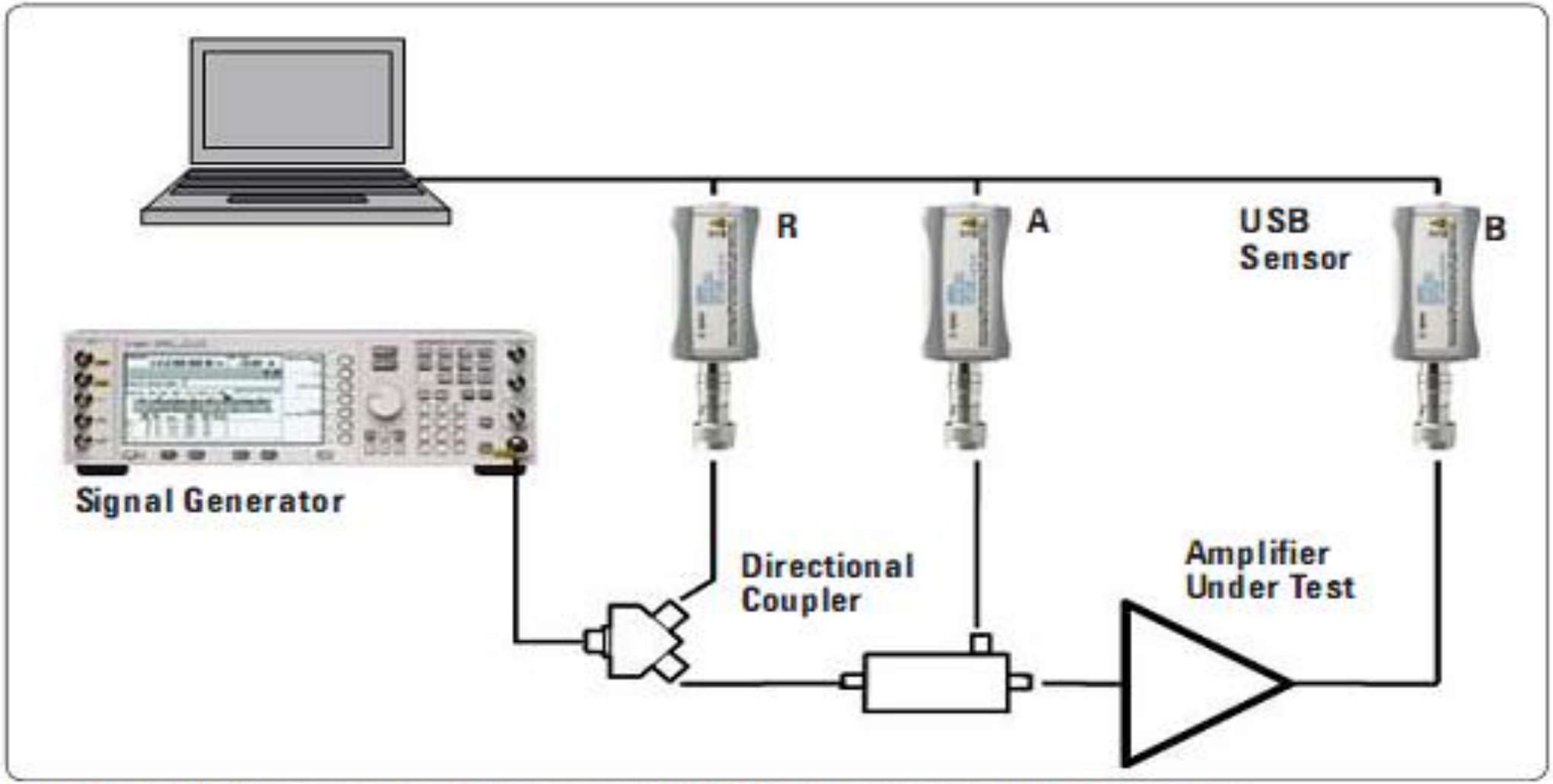


Figure 9: Simplified setup and low cost solution for scalar power measurements

Ваттметры производства АО «НПФ «Микран»



Диапазон рабочих частот, ГГц 0,05–26,50 / 0,05–50 Диапазон измерений мощности, дБм −50…20

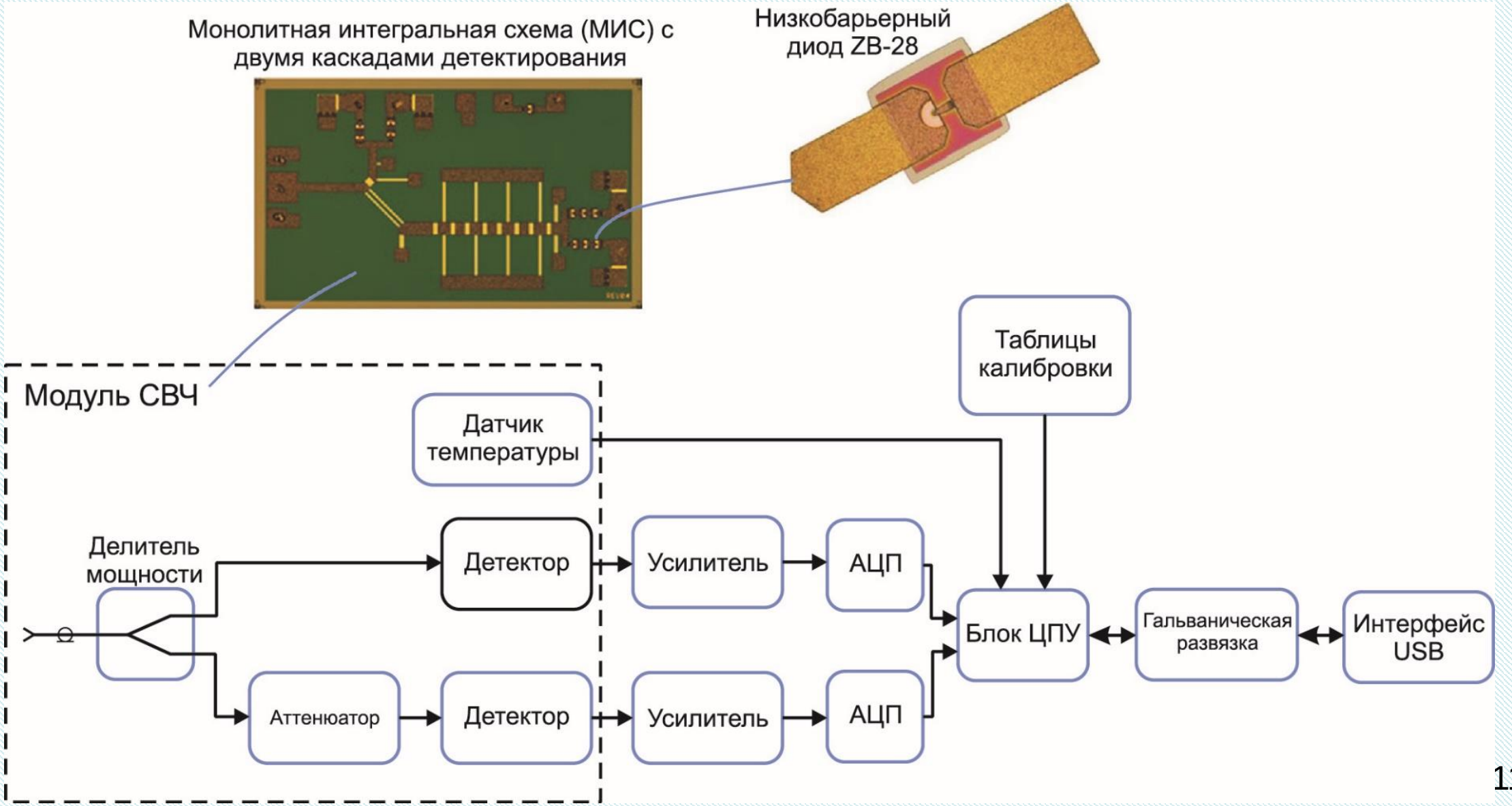
Коэффициент стоячей волны, не более 1,2 (0,05–18 ГГц)

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений, % в диапазоне частот 5–18 ГГц

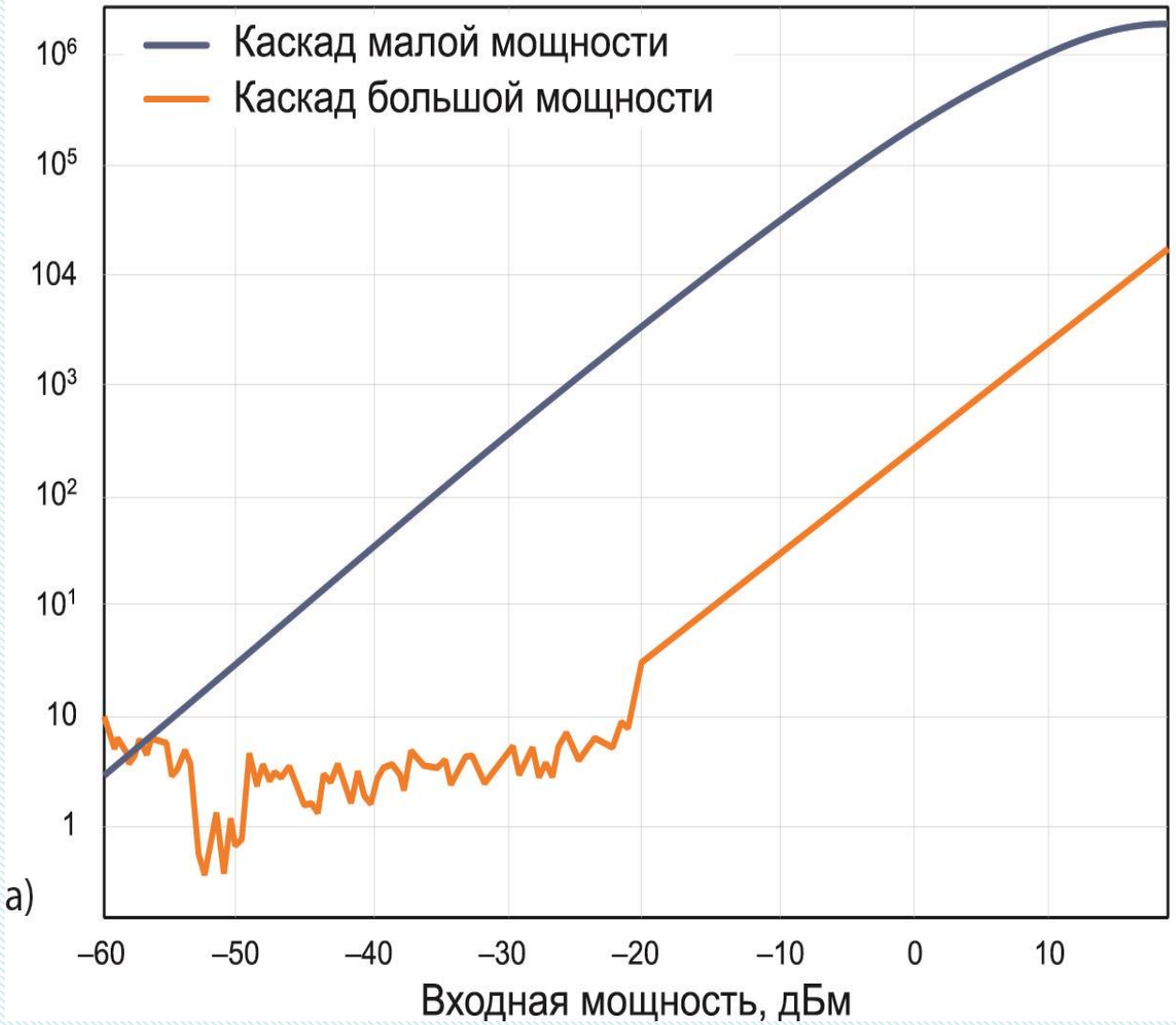
± 15 (–50…–40 дБм), ± 7 (–40…–10 дБм), ± 5 (–10…20 дБм)

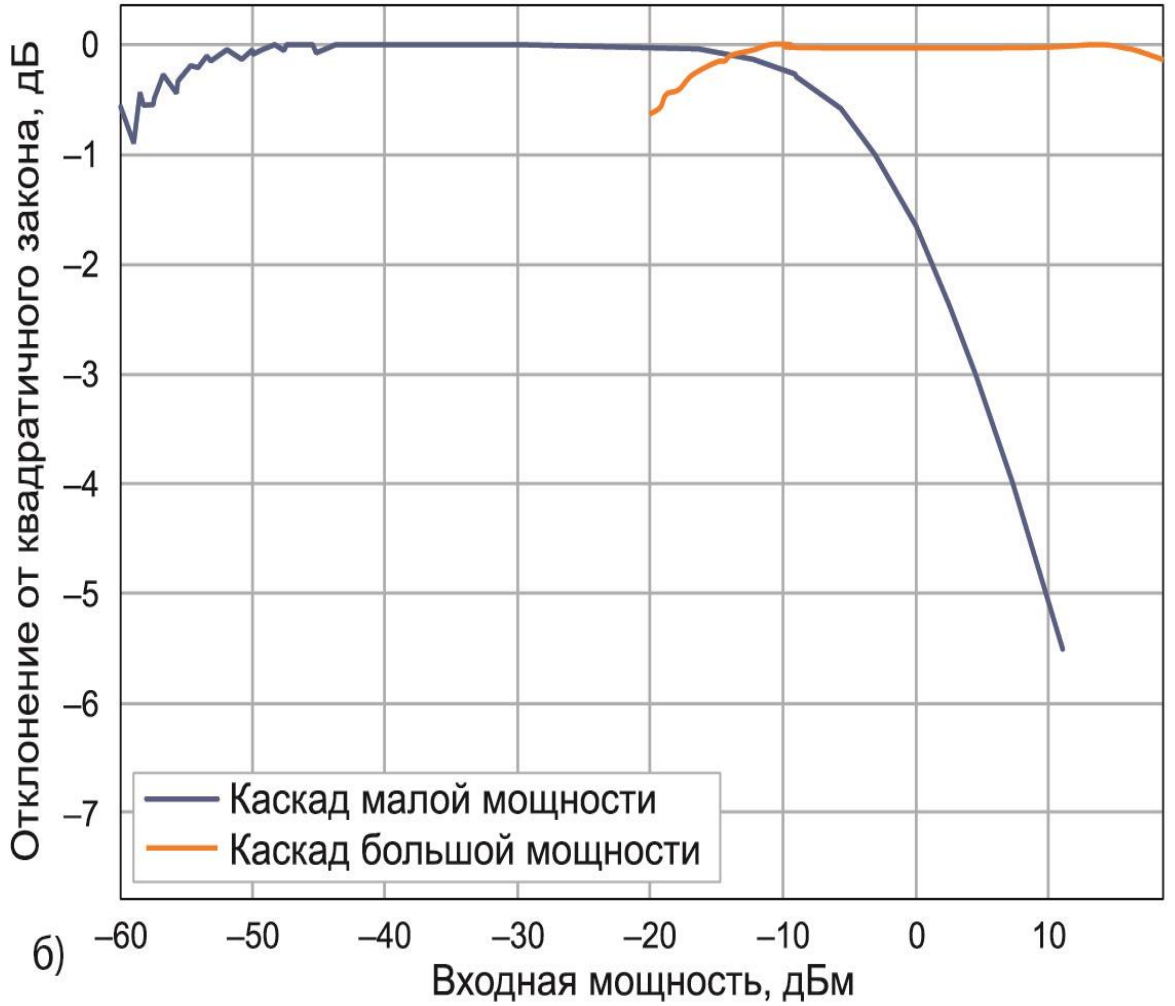
Встроенный датчик температуры

Ваттметры производства АО «НПФ «Микран»



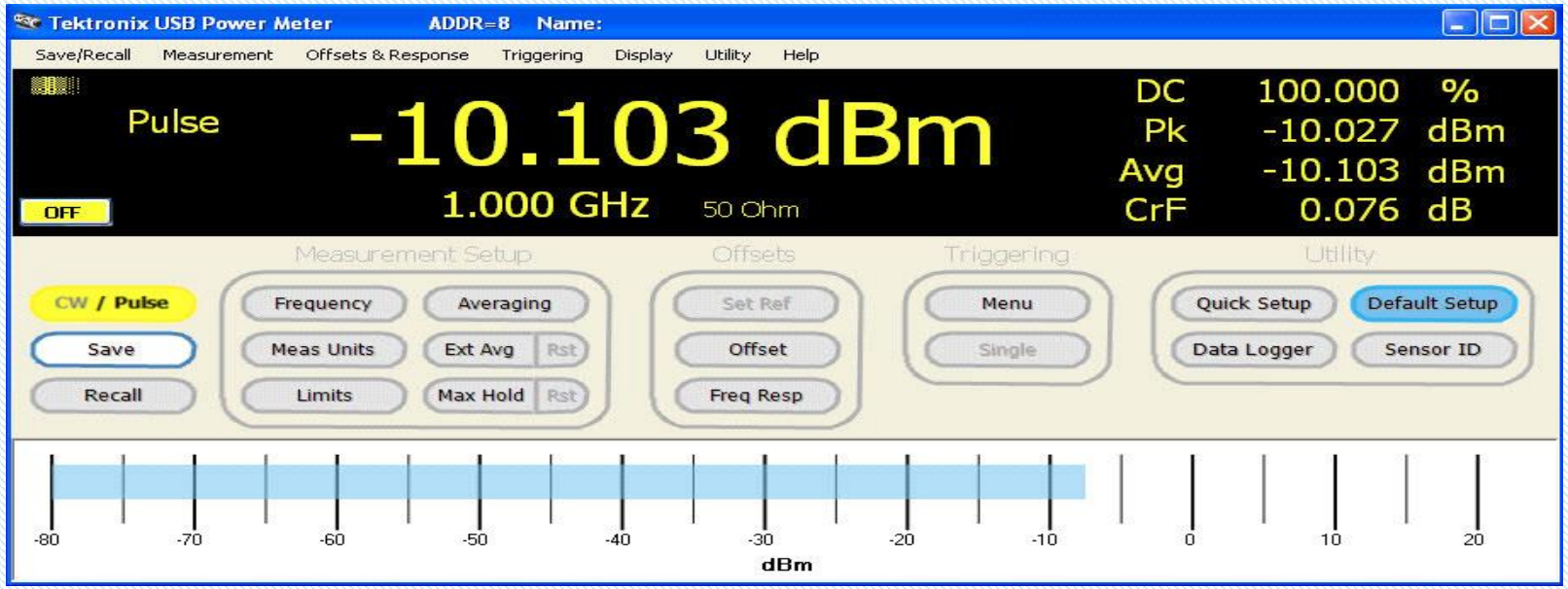
Ваттметры производства АО «НПФ «Микран»





USB-датчик мощности фирмы **Tektronix**







Диапазон частот - 50 МГц...18,6 ГГц

Диапазон измерения - -40 дБм...+20 дБм

Максимальный пик-фактор - 55дБ

Полоса видео - 10 МГц

Rohde&Schwarz NRP2 – измеритель мощности СВЧ



Датчики мощности

Динамический диапазон: до 90 дБ (зависит от датчика)

Диапазон уровней: от –67 до +45 дБмВт (зависит от датчика)

Диапазон частот: от 0 до 67 ГГц (зависит от датчика)

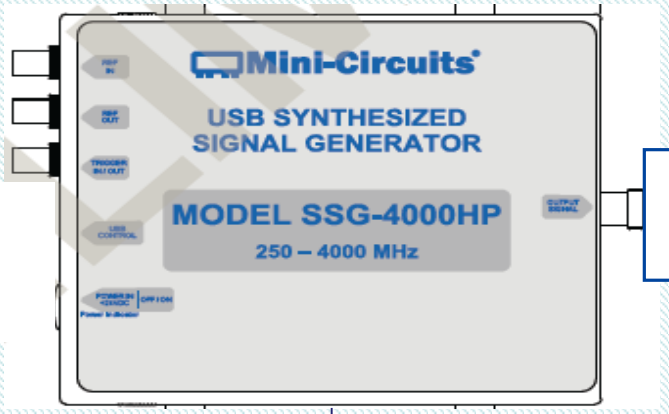
- Широкий рабочий диапазон частот 9 кГц…4000 Мгц, минимальный дискрет перестройки (разрешение по частоте) 5 кГц ;
- Динамический диапазон -30…+20 дБ, разрешение 0.01 дБ;
- Точность измерения не хуже ±0.05 дБм;
- КСВН входа – от 1.1 до 1.4;
- Время измерения: 100 мс (режим малых шумов Low Noise)
  30 мс в быстром режиме (Faster).

USB-датчик фирмы Mini-Circuits PWR-4GHS

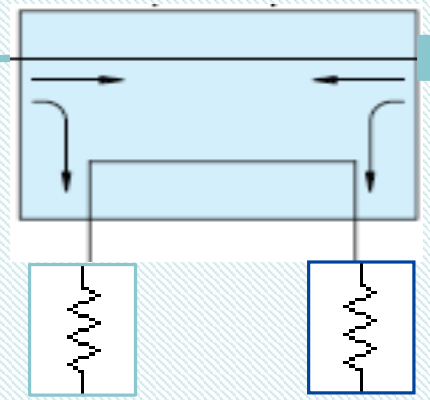


Figure1 *Mini-Circuits' USB Power Sensor PWR-SEN-8GHS+ with USB-CBL+ cable and a 50 Ohm Type N male),and a Type N (female) to SMA (male) adaptor*

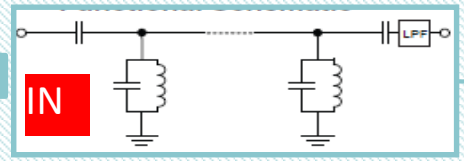
Измерение прямых потерь (|S21|) СВЧ фильтра



Ответвитель
ZX30-20-20BD+



Фильтр Mini-Circuits
VBFZ-1400+



CH Mini-Circuits
ANNE-50+

CH Mini-Circuits
ANNE-50+



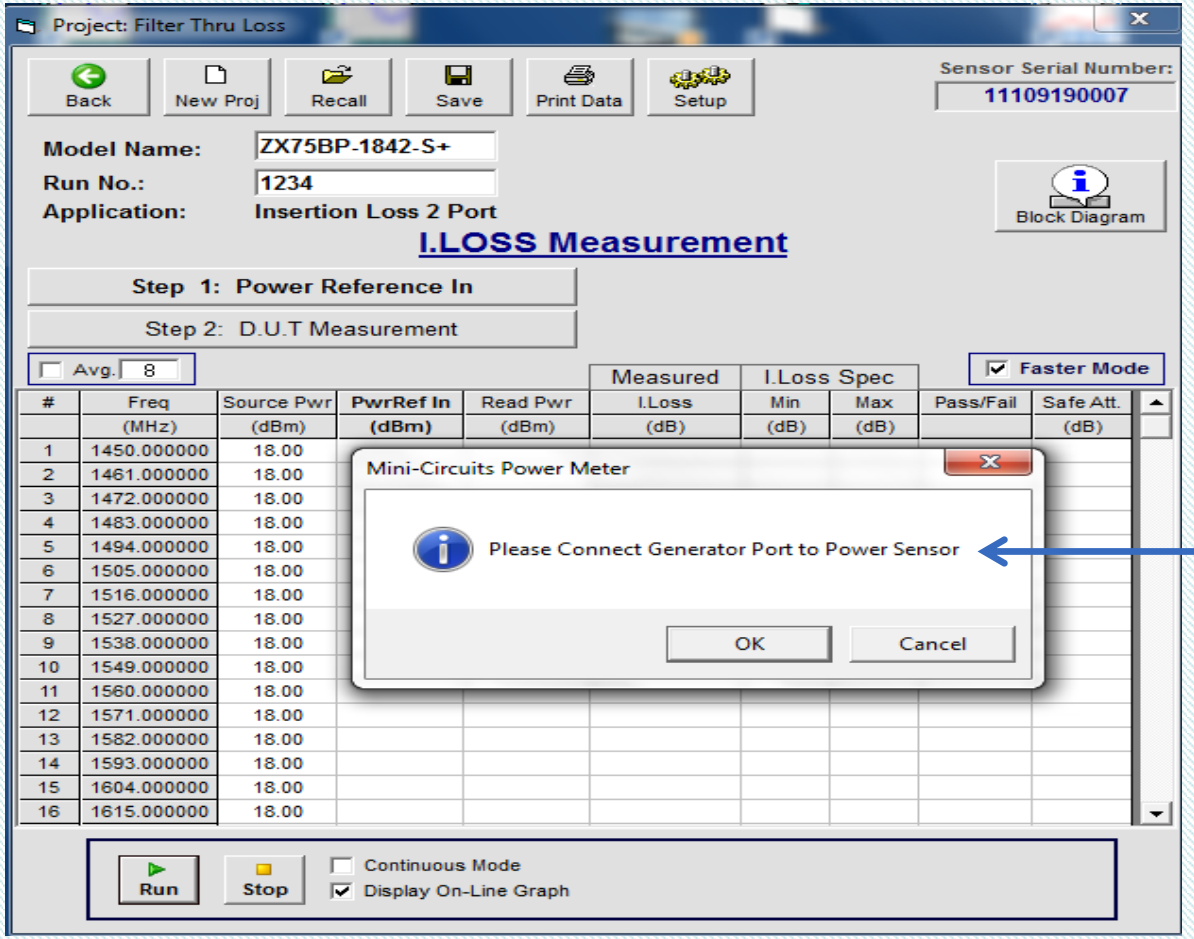
USB HUB

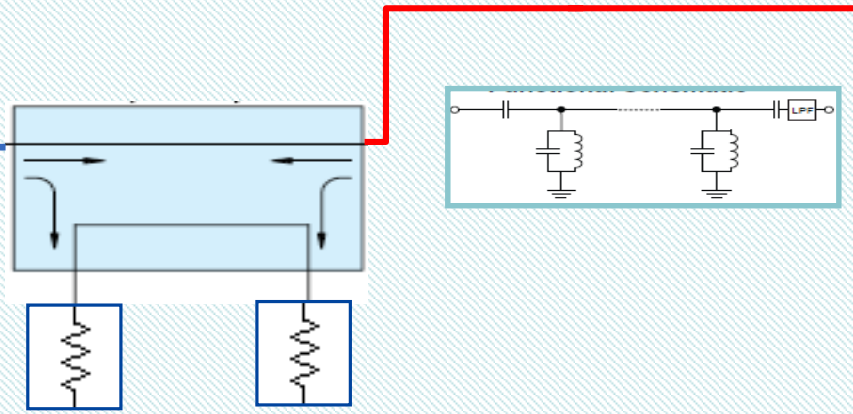


Датчик мощности
Mini-Circuits PWR-
4GHS

Прямые потери фильтра, калибровка

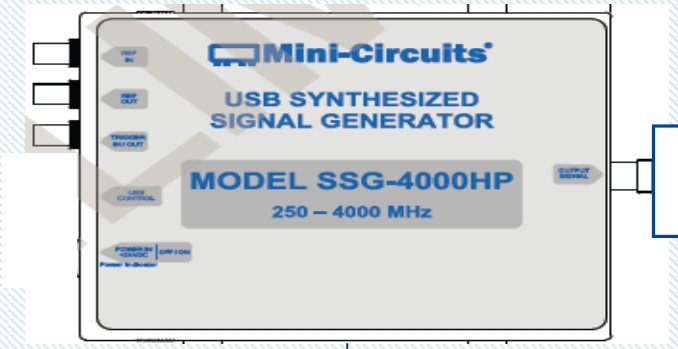
Для калибровки надо подключить выход ответвителя напрямую к измерителю мощности





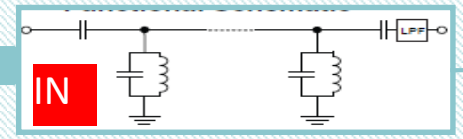


Измерение обратных потерь (|S11|)

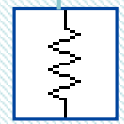


Ответвитель
ZX30-20-20BD+

Фильтр Mini-Circuits
VBFZ-1400+



CH Mini-Circuits
ANNE-50+



CH Mini-Circuits
ANNE-50+

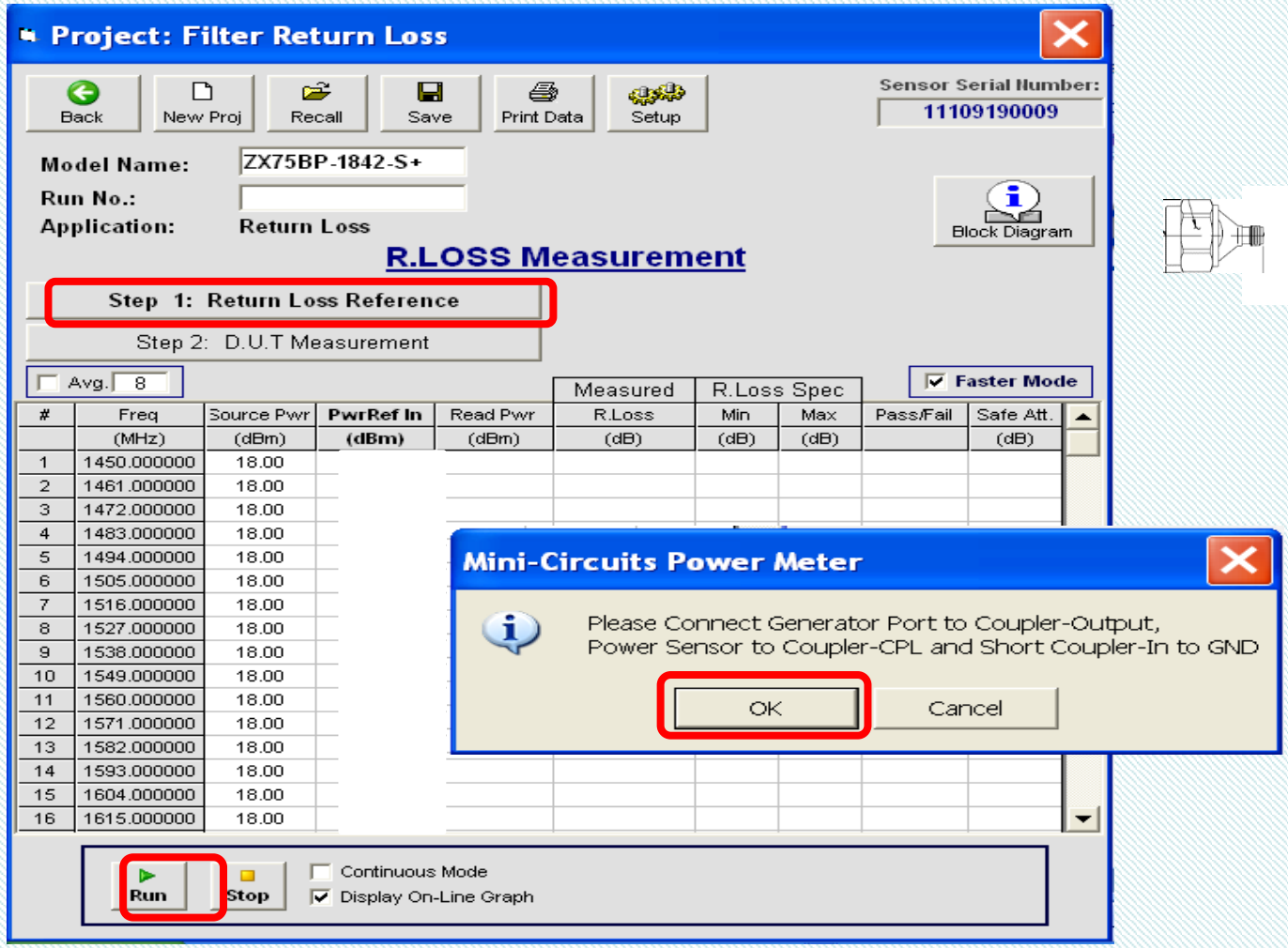


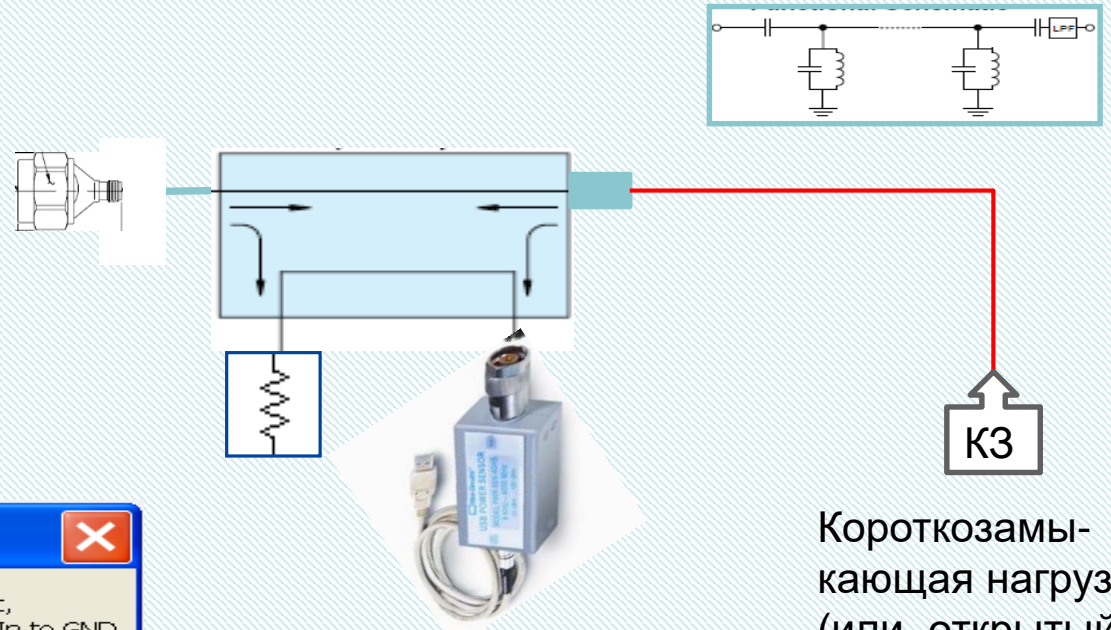
USB HUB



Датчик мощности
Mini-Circuits PWR-
4GHS

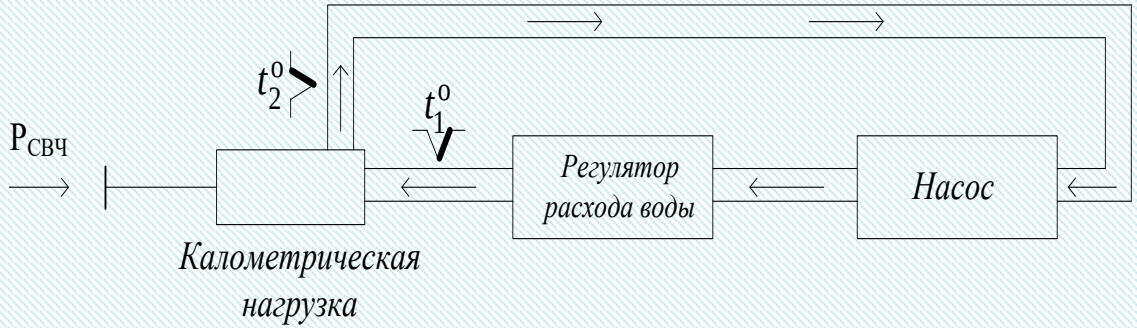
Калибровка при измерении обратных потерь

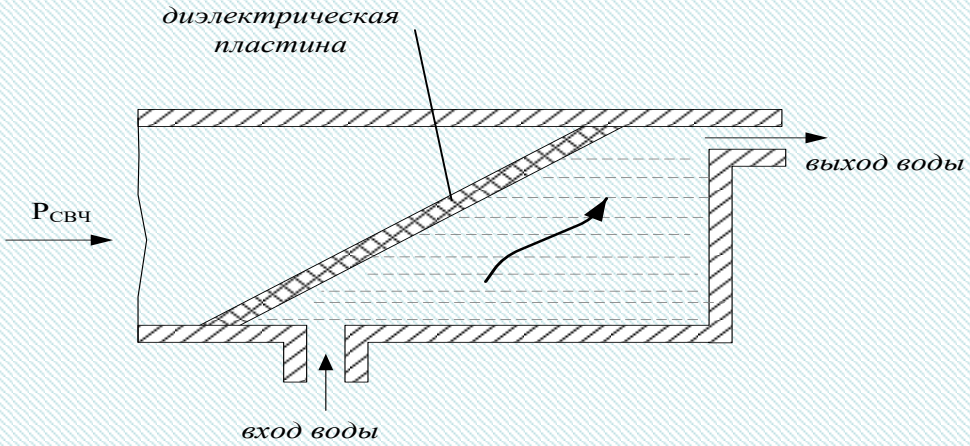




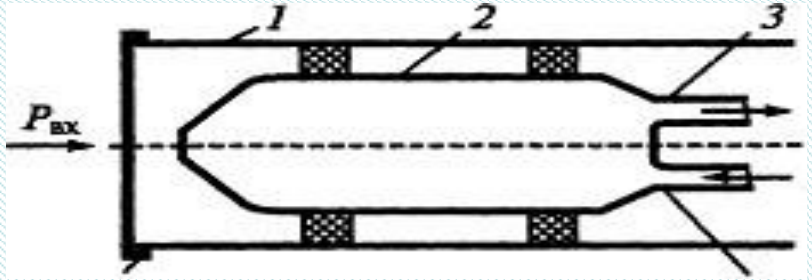
Короткозамы-кающая нагрузка (или открытый коненц разъема - холостой ход)

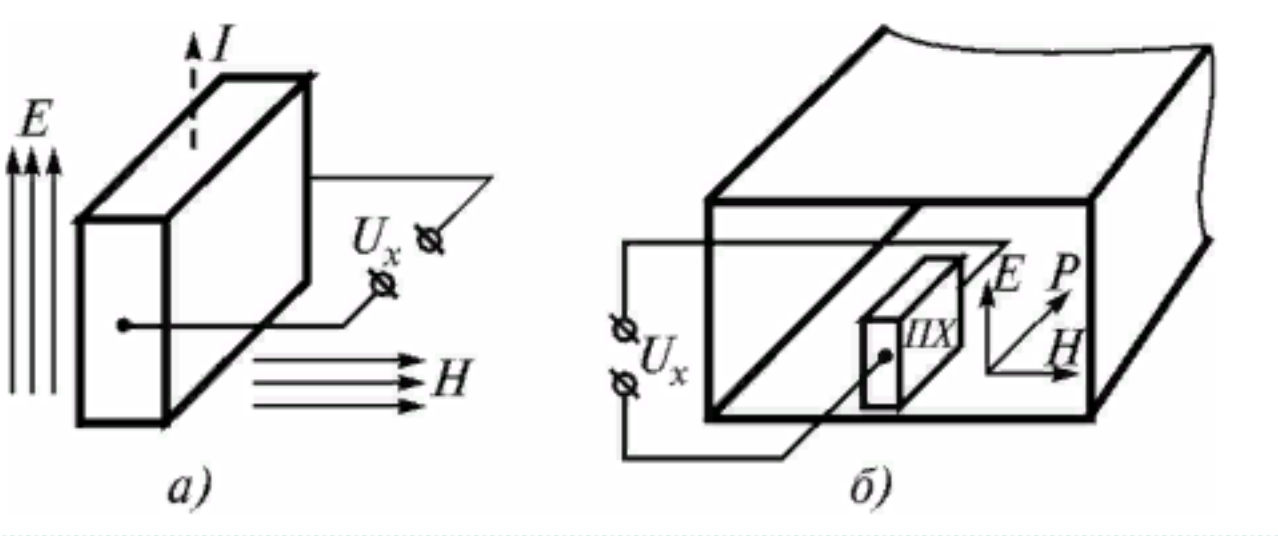
Калориметрический метод и метод Холла для измерения больших уровней мощности СВЧ





Погрешность образцовых калориметров - около 1% ,промышленные калориметры обеспечивают погрешность 2,5…5%.





Воздействие э-м поля создает разность потенциалов на преобразователе (датчике) Холла:

$$U_x = kEH,$$

где k — к-т пропорциональности.

Мостовой калориметрический ваттметр с двумя «сухими» нагрузками. На одну подают СВЧ сигнал, на другую – мощность постоянного тока.
Температура между ними измеряется терморезистором.
Меняя мощность постоянного тока, добиваются нулевой разности температур, фиксируя равенство мощностей СВЧ и постоянного тока.

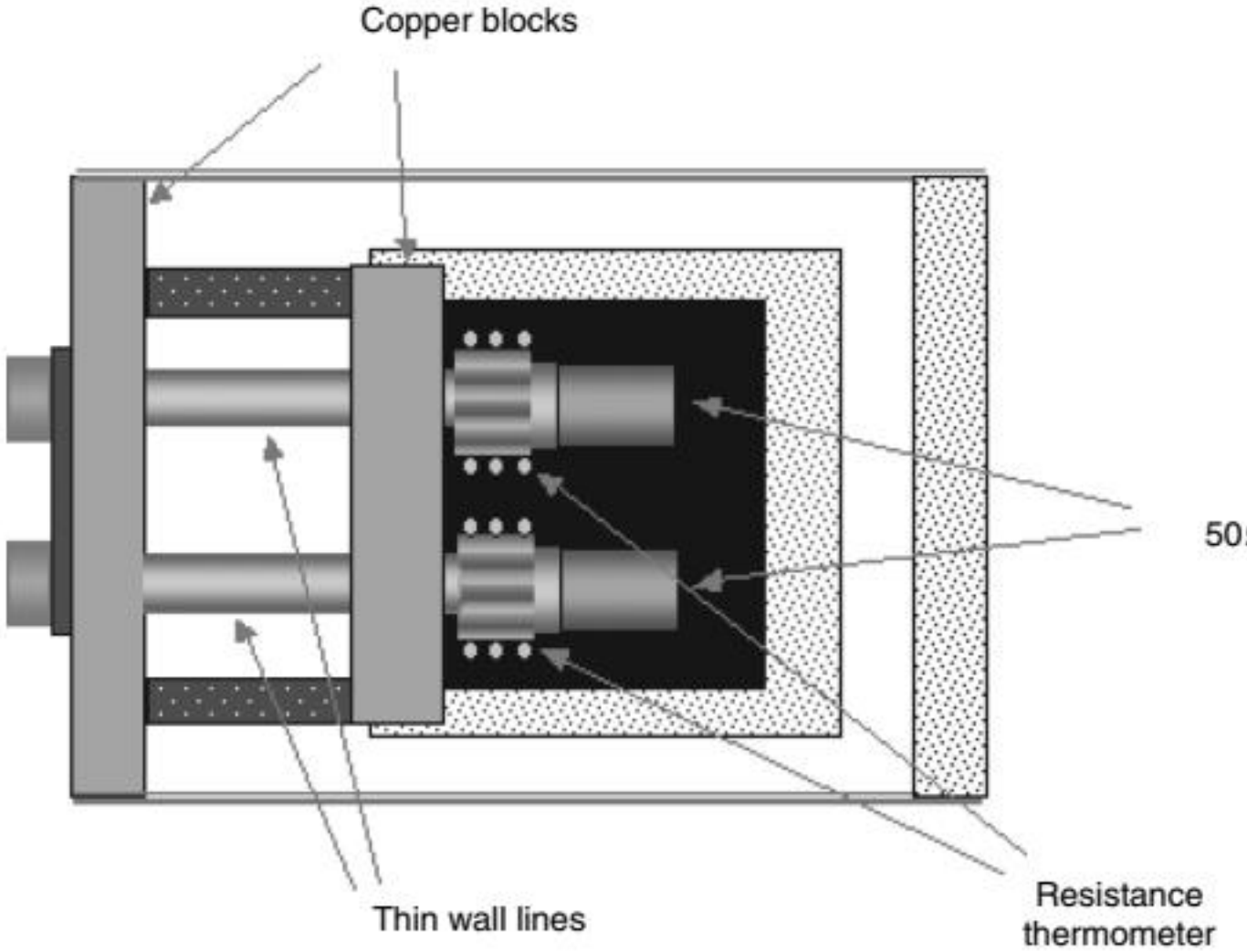


Figure 15.3 A coaxial twin dry-load calorimeter

Калориметрический ваттметр фирмы ELMIKA (Литва) М1-25М для измерения мощности КВЧ



М1-25М/025Е, диапазон частот 90 – 140 ГГц, волновод WR-08, диапазон измерения 0,020-20 мВт, погрешность 3%+2мкВт, КСВН входа 1.1

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

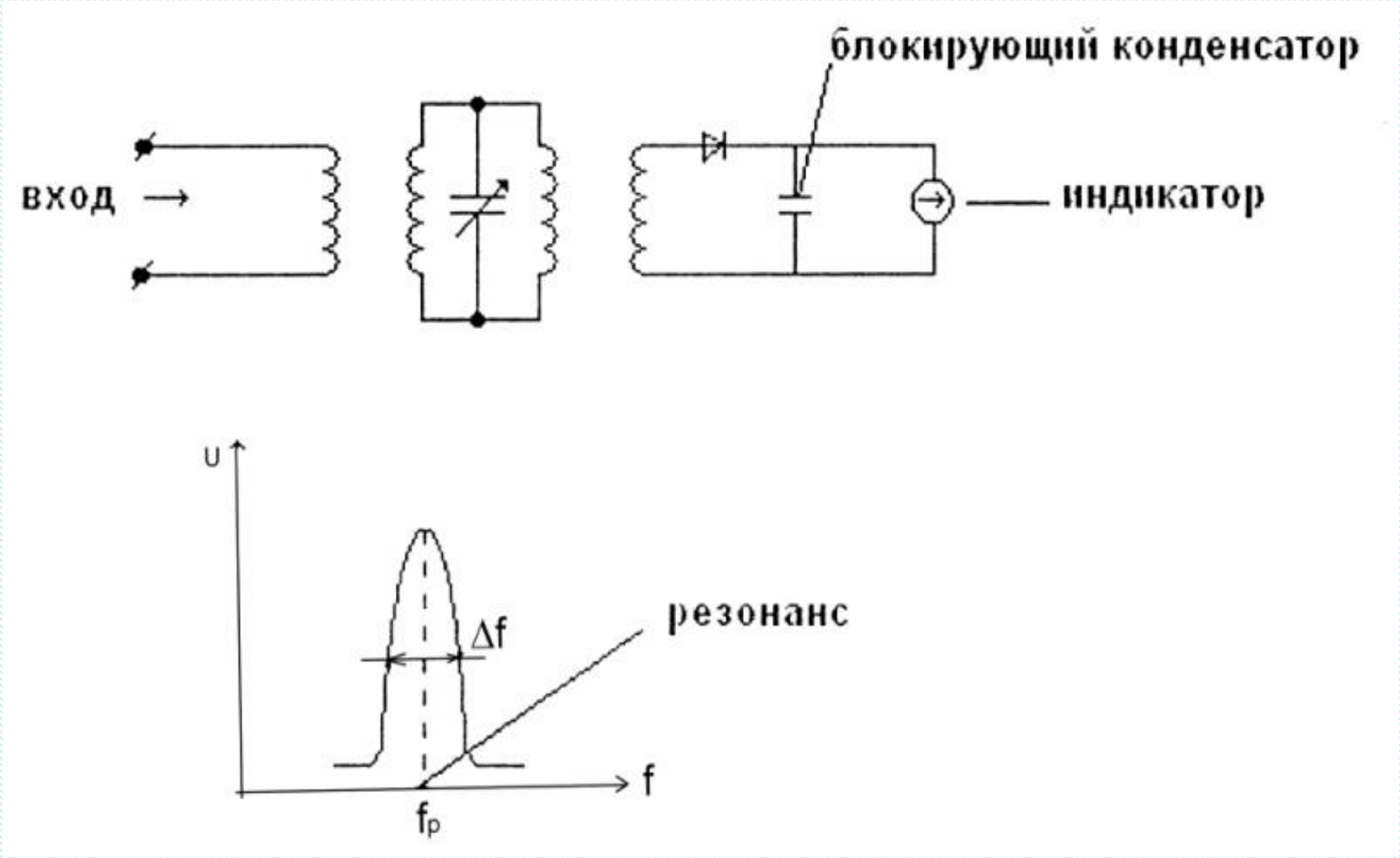
А.А. Данилин

«Измерения на СВЧ»

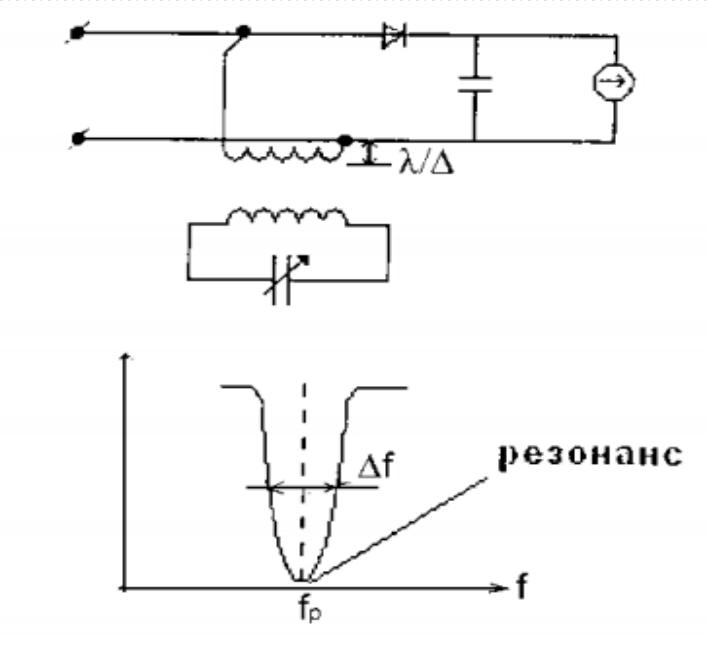
Измерение частоты на СВЧ

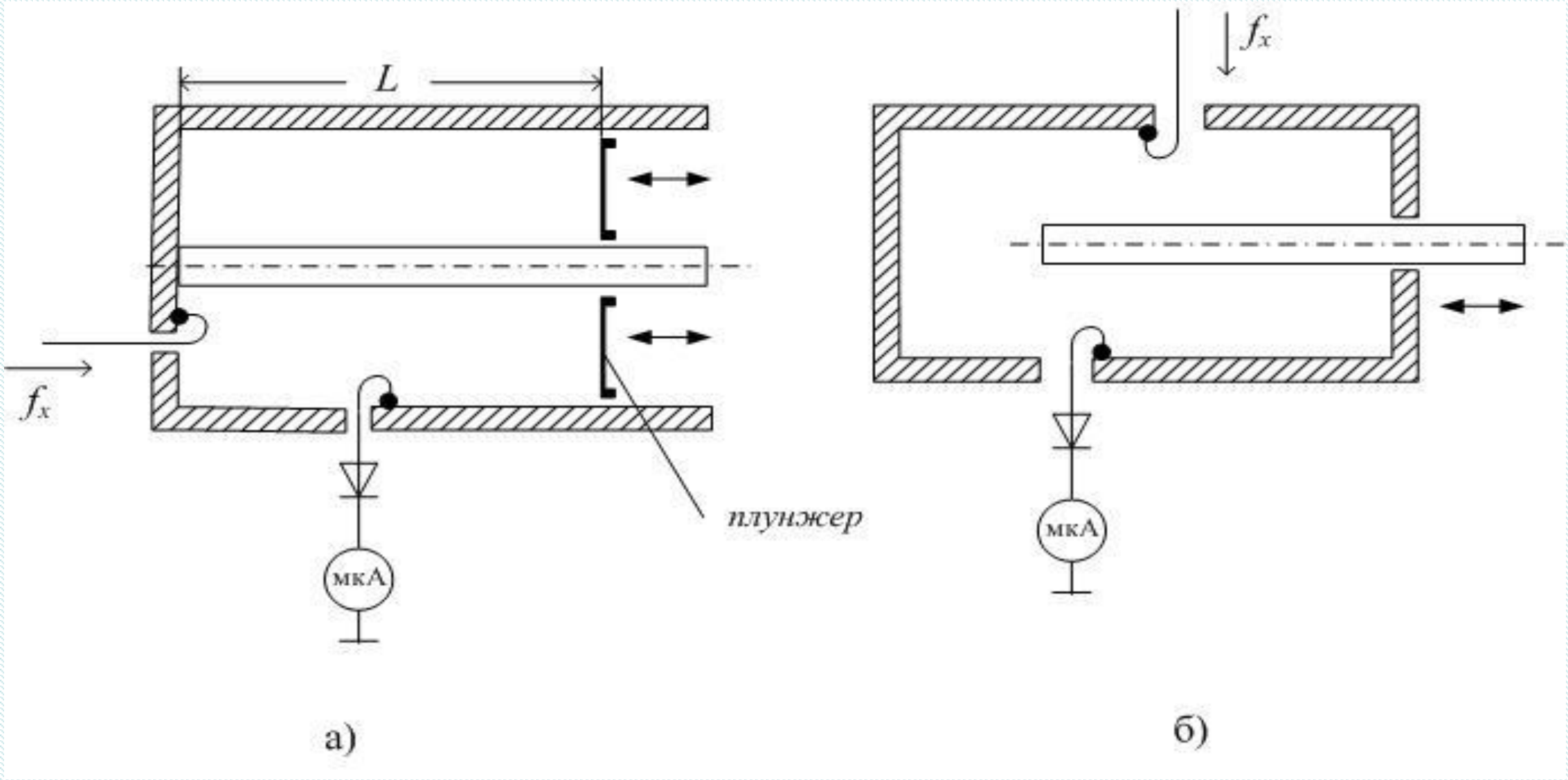
Санкт-Петербург
2025 г.

Резонансный метод измерения частоты



Резонансные частотомеры проходного и поглощающего типов

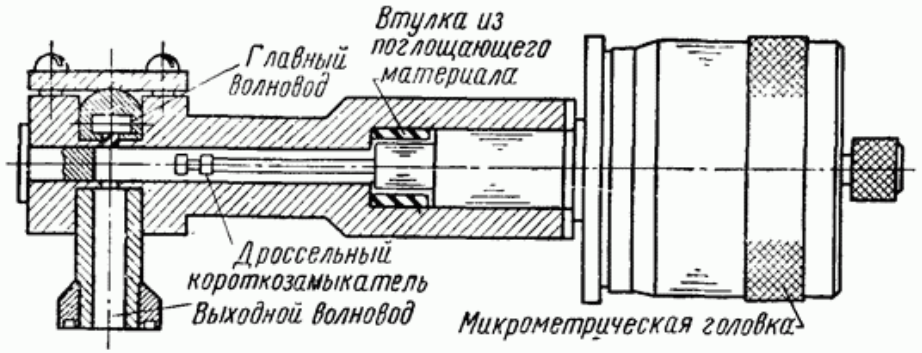




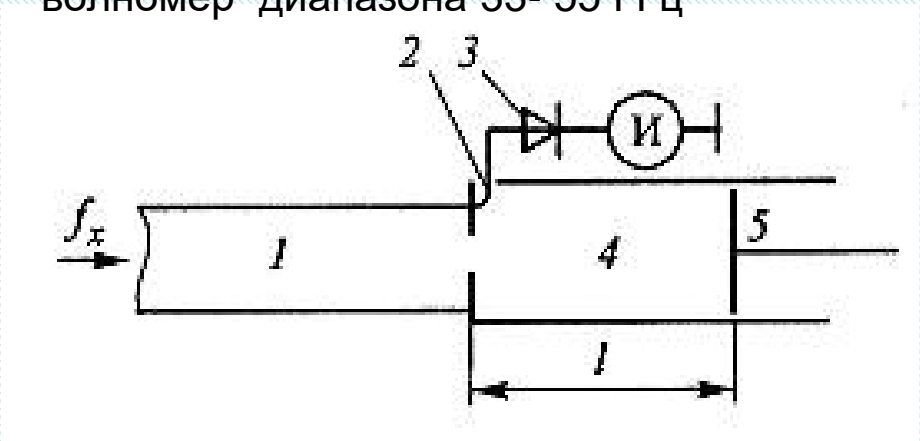
Коаксиальные резонансные частотомеры:

а- полуволновый; б – четвертьволновый;

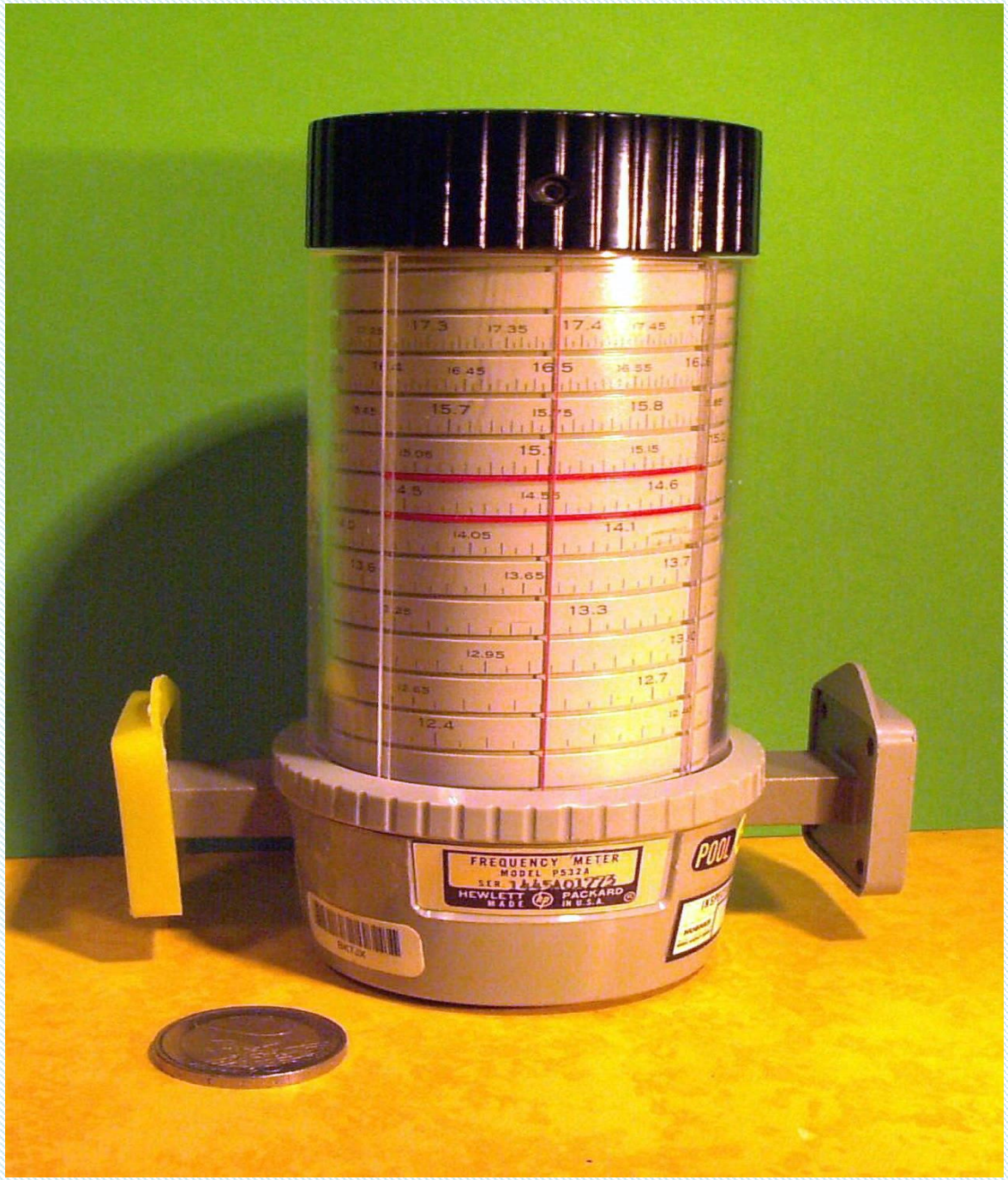
Резонансные частотомеры



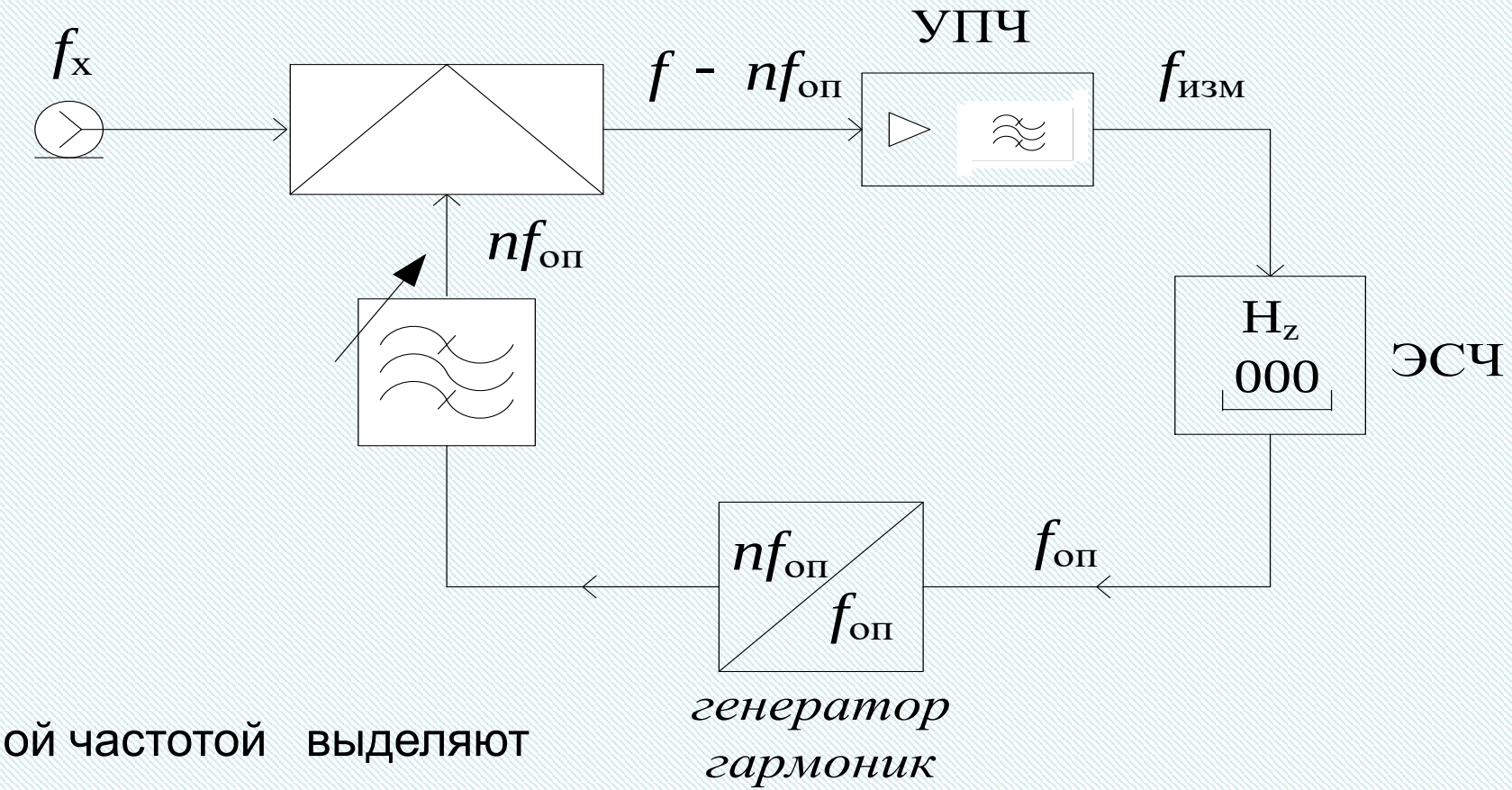
Волноводный (5.69х2.84 мм) СВЧ волномер диапазона 33- 55 ГГц



1 – волновод; 2 – петля связи; 3 – детектор; 4 – объемный резонатор; 5 – плунжер; И – индикатор резонанса



Перенос ВЧ сигнала вниз дискретным преобразователем частоты

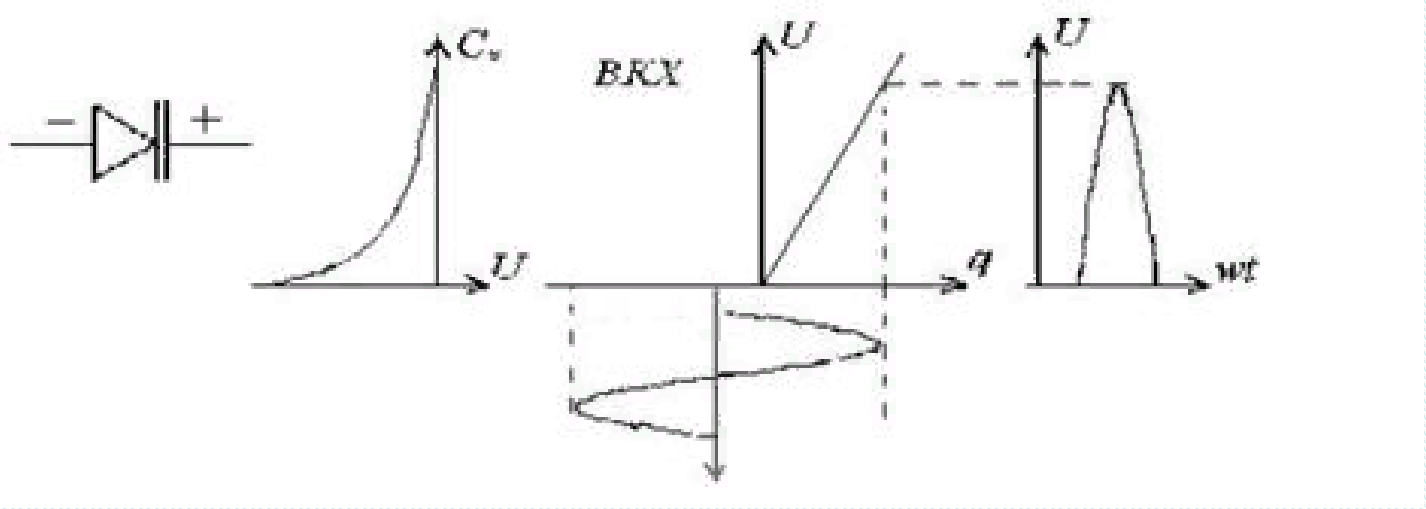


Выходной сигнал с разностной частотой выделяют усилителем промежуточной частоты и подают на частотомер. Результат измерения определяют по известному номеру гармоники и показаниям ЭСЧ

$$f_{изм} = f_x - nf_{оп}$$

Недостаток - необходимо знать использованный номер гармоники гетеродина. Ее устанавливают, вручную перестраивая фильтр гармоник по предварительно отградуированной шкале .

Генератор гармоник (умножитель частоты) на варакторном СВЧ диоде



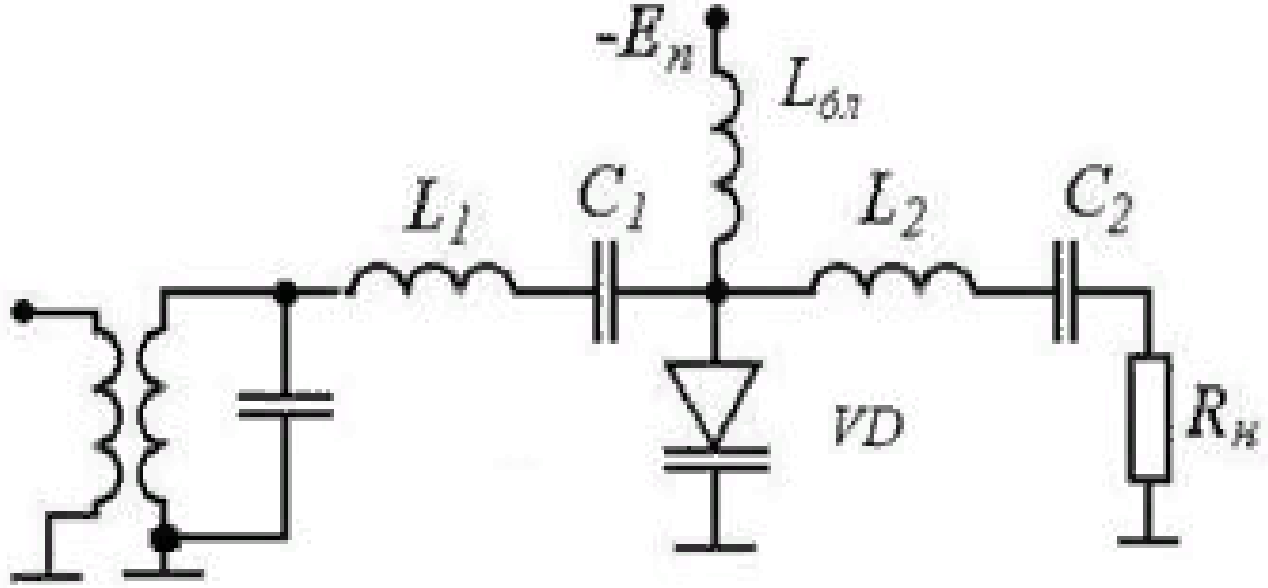
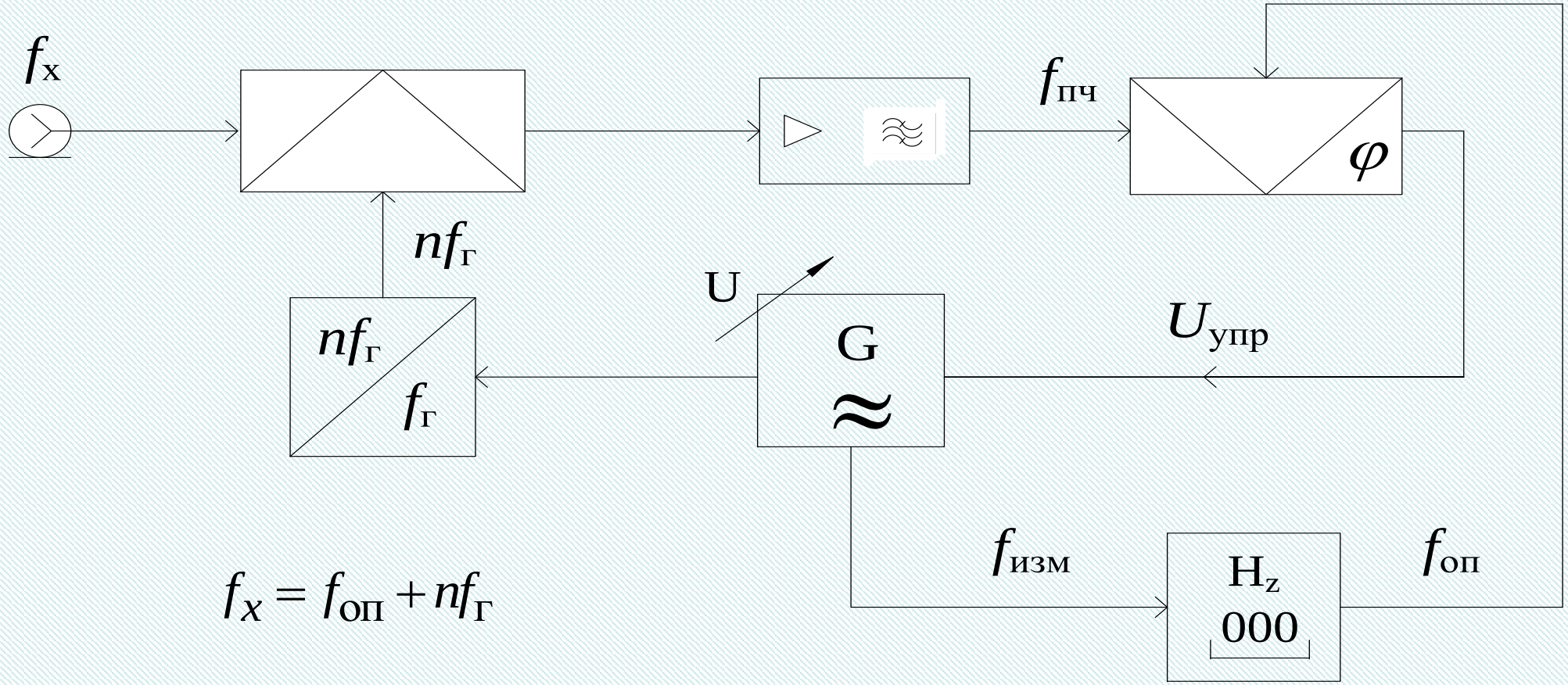


Рис. 5. Принципиальная схема варакторного умножителя частоты

Переносчик частоты с ФАПЧ (англ.-PLL)



Достоинством преобразователей частоты с ФАПЧ - возможность измерения несущей частоты импульсно-модулированных (ИМ) сигналов. Система ФАПЧ обладает инерционностью и позволяет сохранить синхронизацию гетеродина в промежутках между импульсами. При этом ЭСЧ измеряет сигнал гетеродина постоянной частоты

Определение номера гармоники

Номер используемой гармоники определяют по двум измерениям. Для этого перестройкой гетеродина добиваются захвата частоты поочередно по двум соседним гармоникам с номерами *n* и *n*+1. Получают два значения частоты гетеродина $f_{г1}$ и $f_{г2}$:

$$f_x - n f_{г1} = f_{оп} \qquad f_x - (n+1) f_{г2} = f_{оп}$$

Номер гармоники ⇨ $n = \dfrac{f_{г2}}{(f_{г1} - f_{г2})}$ Измеряемая частота равна ⇨ $f_x = \dfrac{f_{г1} f_{г2}}{(f_{г1} - f_{г2})}$

Другой способ состоит в измерении неизвестной частоты ***на прямом и зеркальном каналах*** работы преобразователя частоты с одной и той же гармоникой гетеродина

$$f_x - n f_{г1} = f_{оп} \qquad n f_{г2} - f_x = f_{оп}$$

В этом случае номер гармоники рассчитывается по формуле $n = \dfrac{2 f_{оп}}{(f_{г2} - f_{г1})}$

HP Agilent Keysight 53181A Frequency Counter .Вход 1 - 225 МГЦ, вход 2 - 12.5 ГГЦ

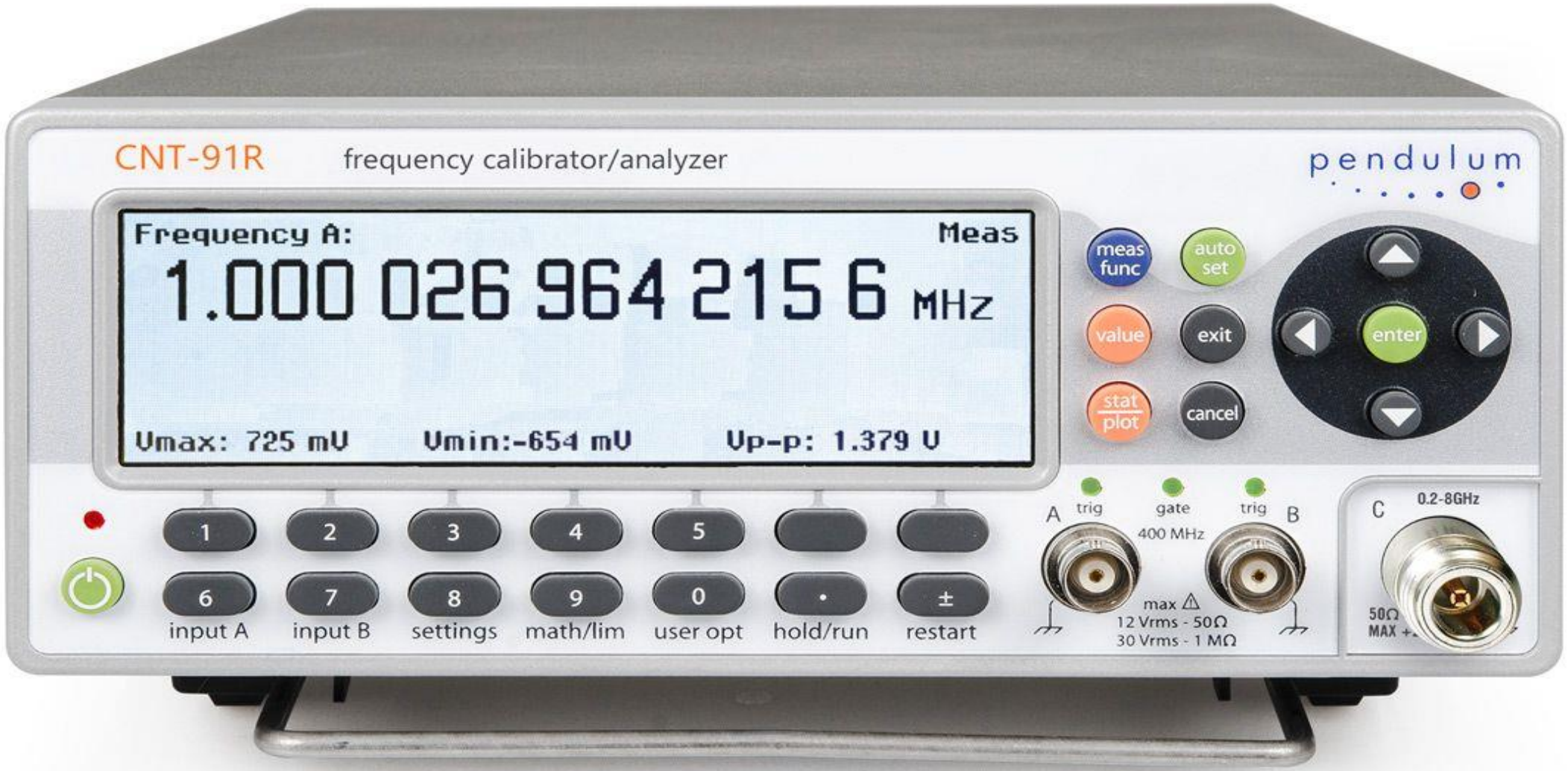


Частотомер электронно-счетный универсальный «ПрофКиП Ч3-99 … Ч3-102»

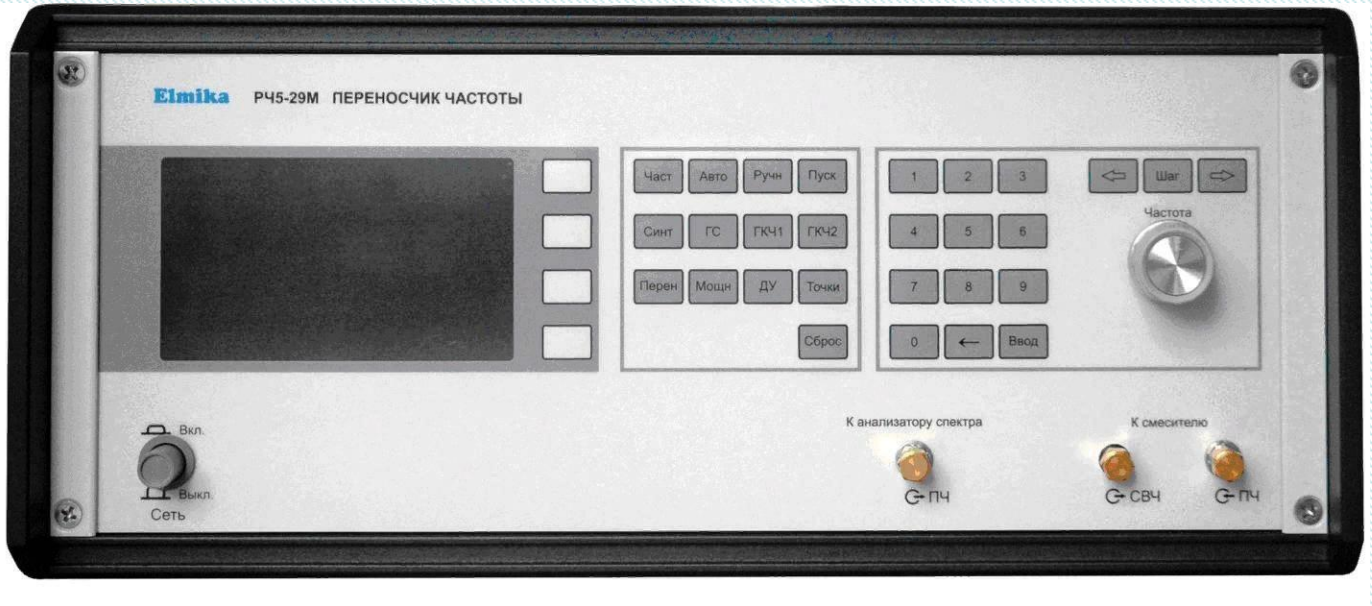
Прибор обеспечивает по входу А 0,001 Гц до 300 МГц, по входу В -0,001 Гц до 1500 МГц, по СВЧ входу С измерение частоты непрерывных колебаний в диапазоне от 1,5 ГГц до 17,85 ГГц. В варианте Ч3-99, от1,5 ГГц до 25,95 ГГц в варианте Ч3-101, от 1,5 ГГц до 37,5 ГГц. В варианте Ч3-100, от 1,5 ГГц до 40 ГГц в варианте Ч3-102.



Частотомер электронно-счетный Pendulum CNT-91R (до 8 ГГц)



Переносчик частоты- частотомер FC64R (РЧ5-29) ЗАО «Элмика» Литва



Модернизация переносчика => **Ч5-30 .** Диапазон входных частот:

- для волновода 5.2x2.6, частотный диапазон 37.5-53.57
- для волновода 2,4×1,2 мм - от 78,33 ГГц до 118,1 ГГц;
- для волновода 1,6×0,8 мм - от 118,1 ГГц до 178,4 ГГц.

Диапазон частот выходных сигналов ПЧ от 0,3 до 1,5 ГГц, уровень входной мощности от 2 мкВт до 1 мВт. Пределы допускаемых значений погрешности измерения частоты синусоидального сигнала $\pm 1 * 10^{-6}$

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Факультет радиотехники
и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

А.А. Данилин

***Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ»
(2 редакция)***

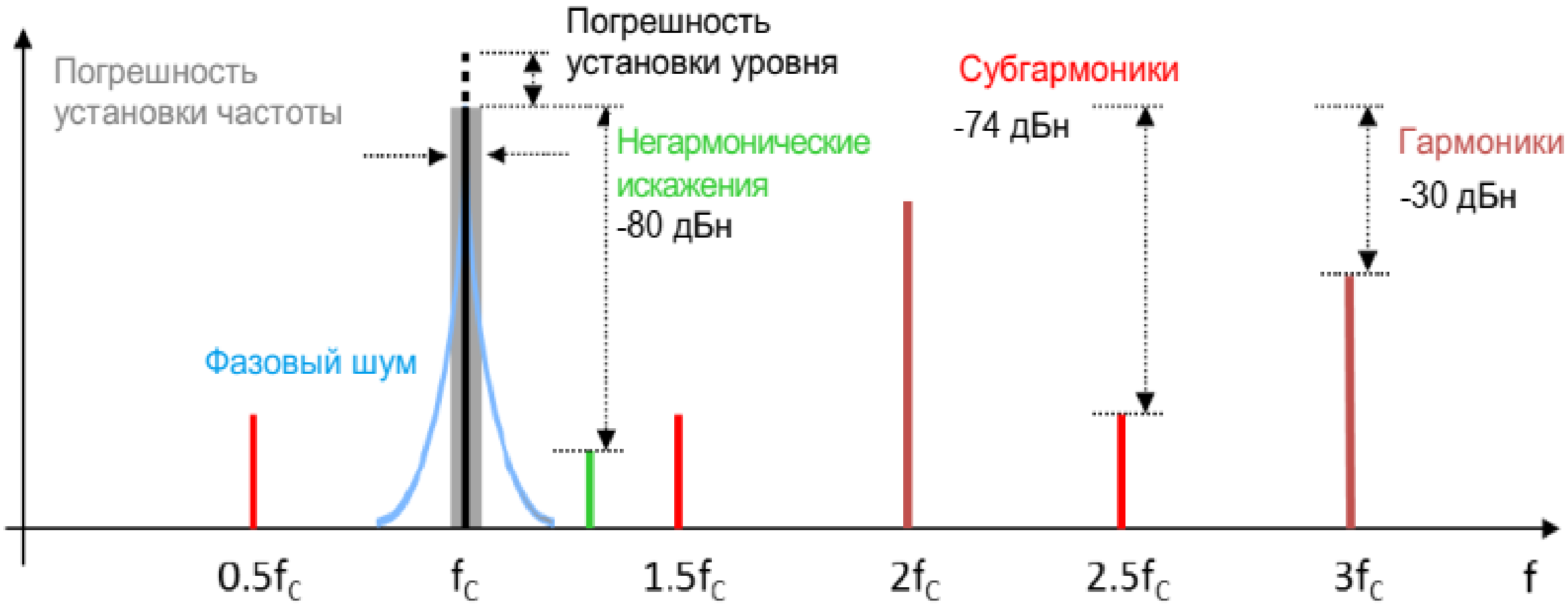
Измерительные генераторы СВЧ

**Санкт-Петербург
2025 г.**

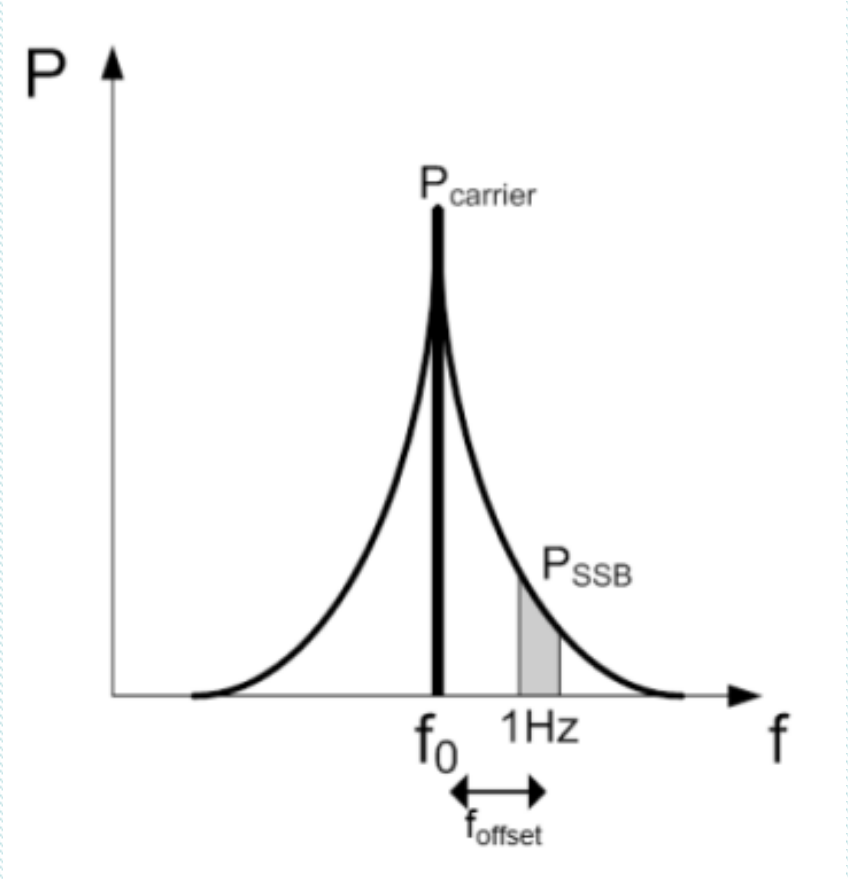
Измерительные генераторы – источники образцовых (тестовых) сигналов. Отличаются возможностью установки формы и параметров выходных сигналов с заданной точностью (с нормируемыми метрологическими параметрами). По виду СВЧ сигналов – гармонические и радиосигналы с АМ, ЧМ, ФМ. Векторные генераторы с цифровой модуляцией. Генераторы видеоимпульсов с сверхмалыми длительностями фронта и среза, генераторы перепадов пикосекундной длительности. Генераторы произвольной формы сигнала

Типы измерительных генераторов по принципу действия

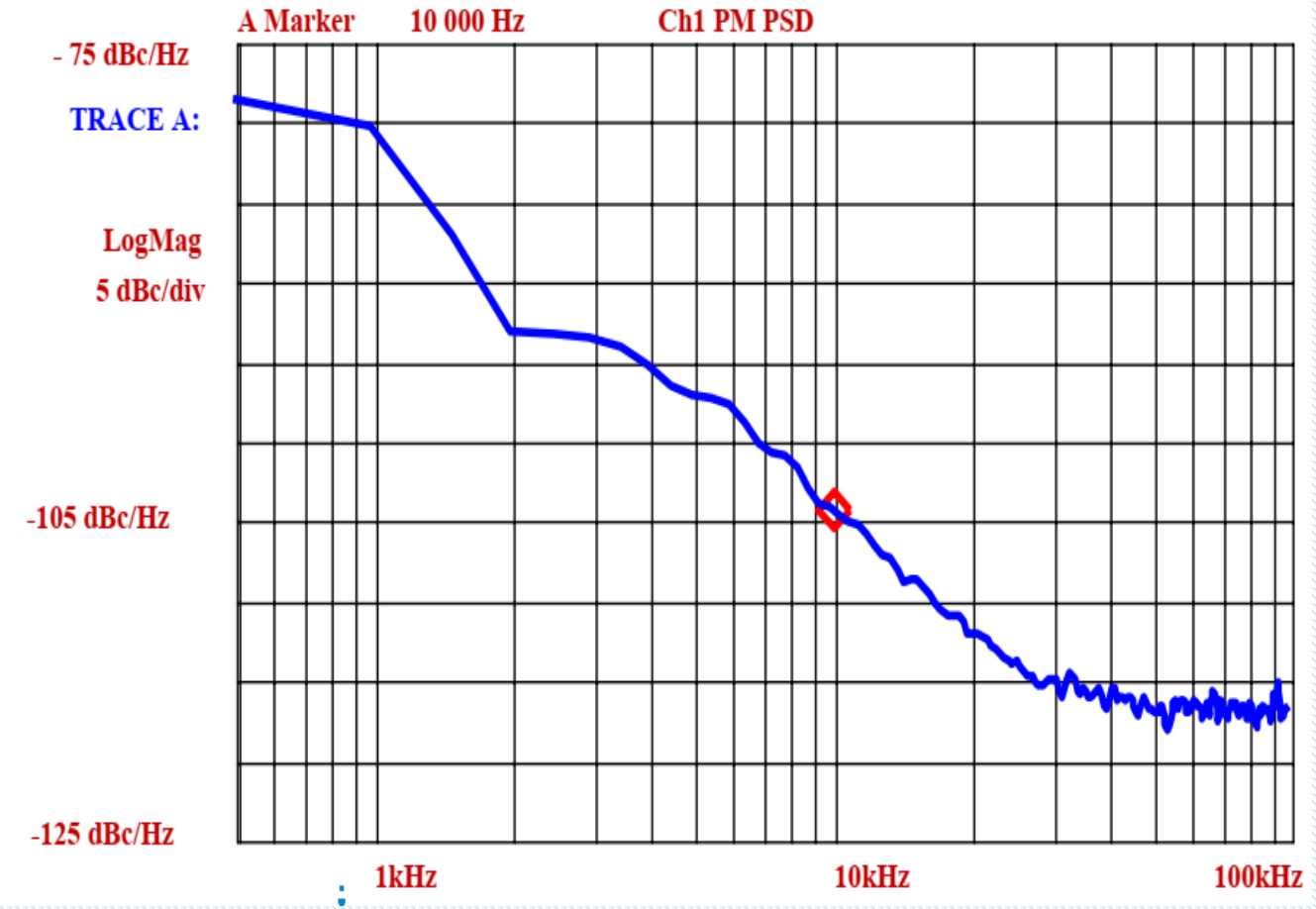
- *Аналоговые* генераторы (подгруппа приборов Г-)
- Генераторы сигналов произвольной формы с прямым цифровым синтезом сигнала (Direct Digital Synthesis – DDS)
- *Синтезаторы* частоты - генераторы гармонических сигналов, частота которых формируется путем деления и умножения, сложения и вычитания частот опорного высокостабильного генератора и его гармоник.



Спектральный состав сигнала реального измерительного генератора

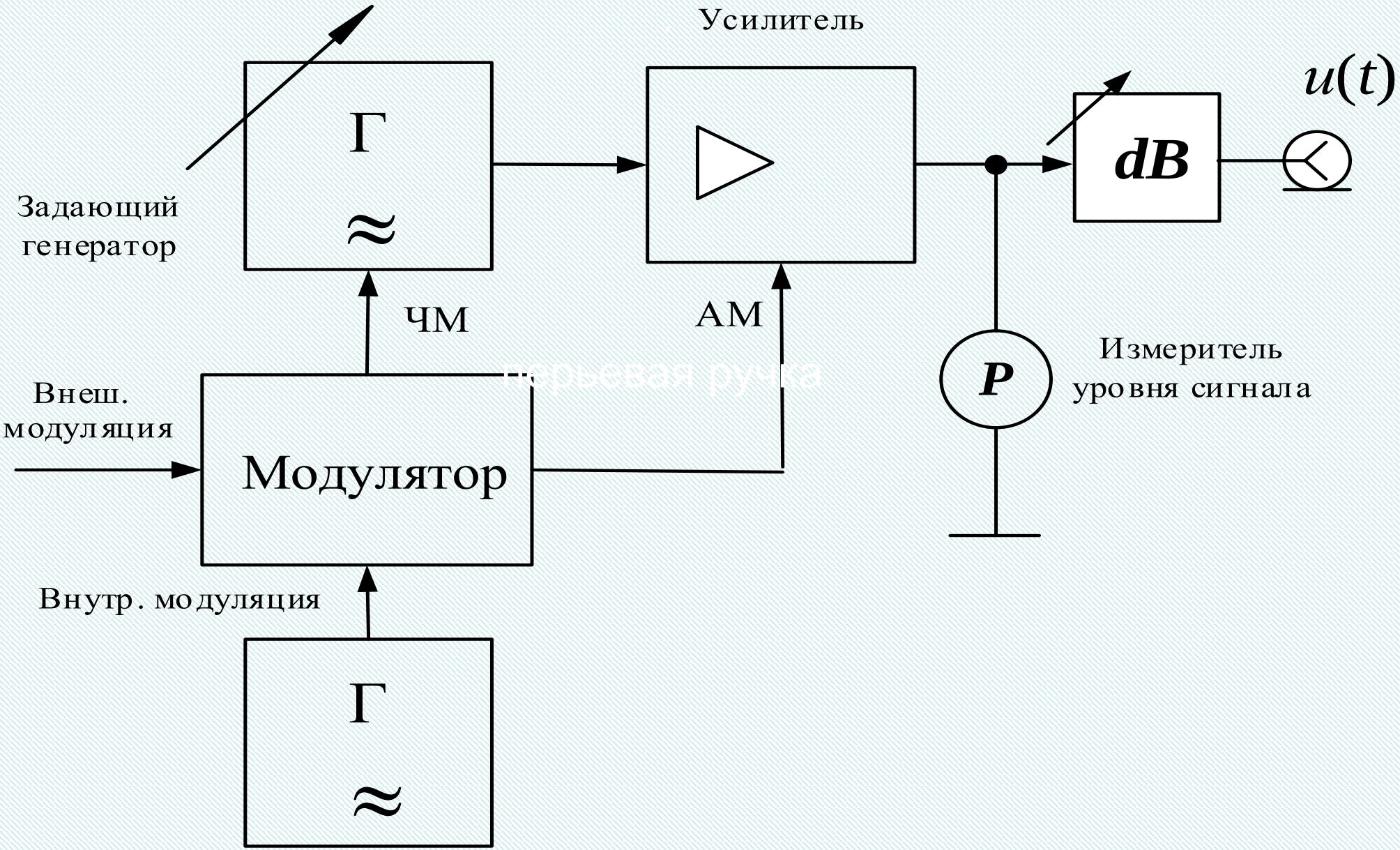


Измерение уровня СПМ фазовых шумов генератора (в дБн/Гц) при заданной отстройке от несущей частоты



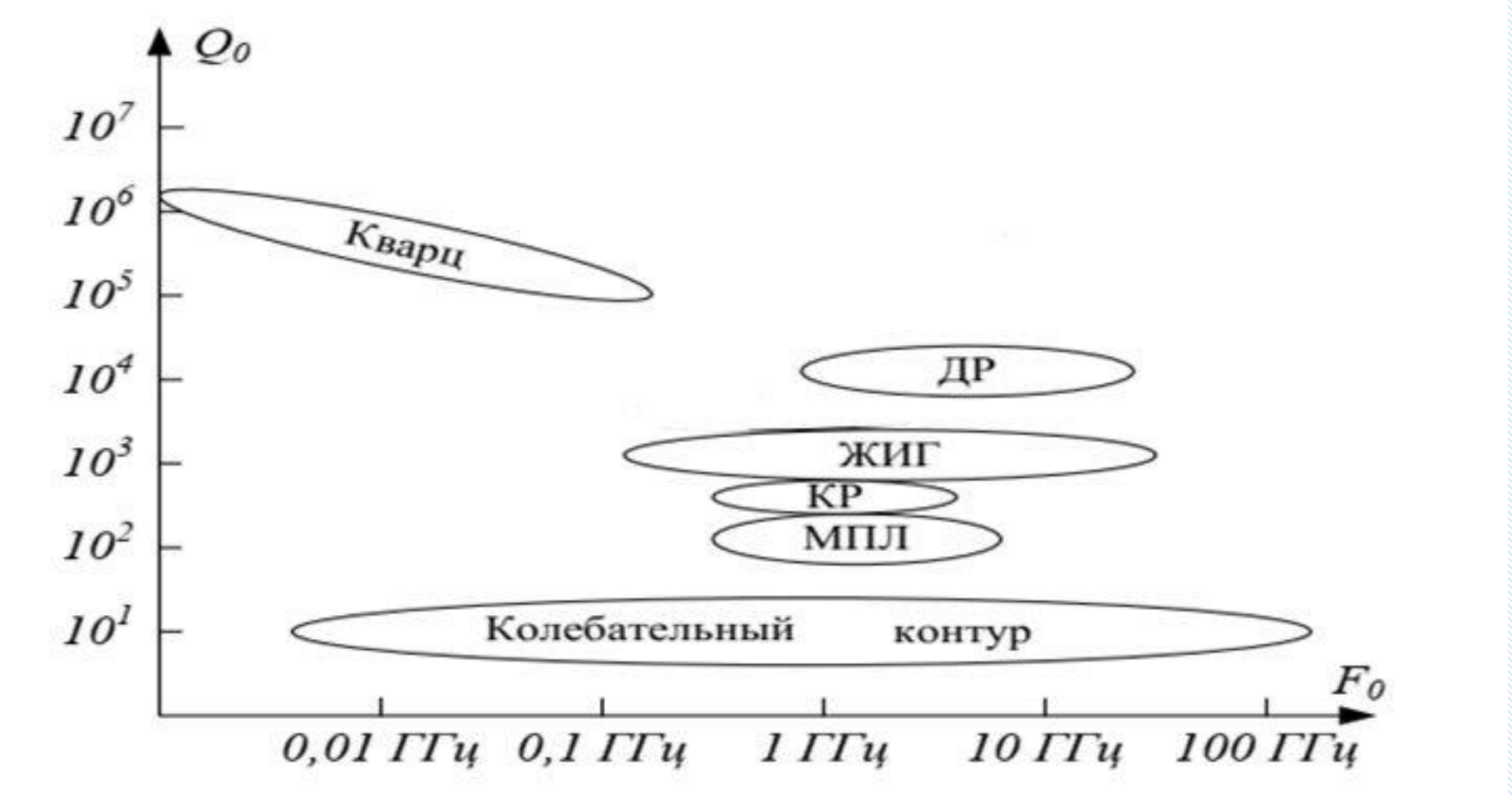
Спектральная плотность мощности фазового шума генератора и уровень СПМ при отстройке 10 кГц

Схема аналогового СВЧ генератора гармонических сигналов



Задающие генераторы СВЧ диапазона (частотный диапазон более 300 МГц) имеют **ряд отличий** от ВЧ генератора на LC-элементах:

- . Частотозадающие элементы автогенератора - резонаторы *на отрезках линий передач* и *объемные резонат*оры (см. следующий слайд).
- В качестве активного элемента автогенератора используют электронные СВЧ компоненты - СВЧ транзисторы, диоды Ганна, клистроны, лампы обратной волны.
- На СВЧ трудно обеспечить усиление сигнала, поэтому в таких генераторах иногда усилитель отсутствует. Сигнал с автогенератора через аттенюатор подают прямо на выход генератора.
- Точность установки частоты СВЧ генератора в ряде случаев контролируют встроенным резонансным или электронно-счетным частотомером:
- Установку опорного уровня сигнала производят измерителем мощности СВЧ. Регулировку выходной мощности производят калиброванным аттенюатором.



Классификация резонаторов автогенераторов СВЧ : LC-контур. колебательный контур на отрезке двухпроводной линии передачи, МПЛ – микрополосковый р-р, КР – коаксиальный р-р, ЖИГ – ферромагнитный р-р, ДР – диэлектрический р-р. Кварц – кварцевый генератор стабильной частоты

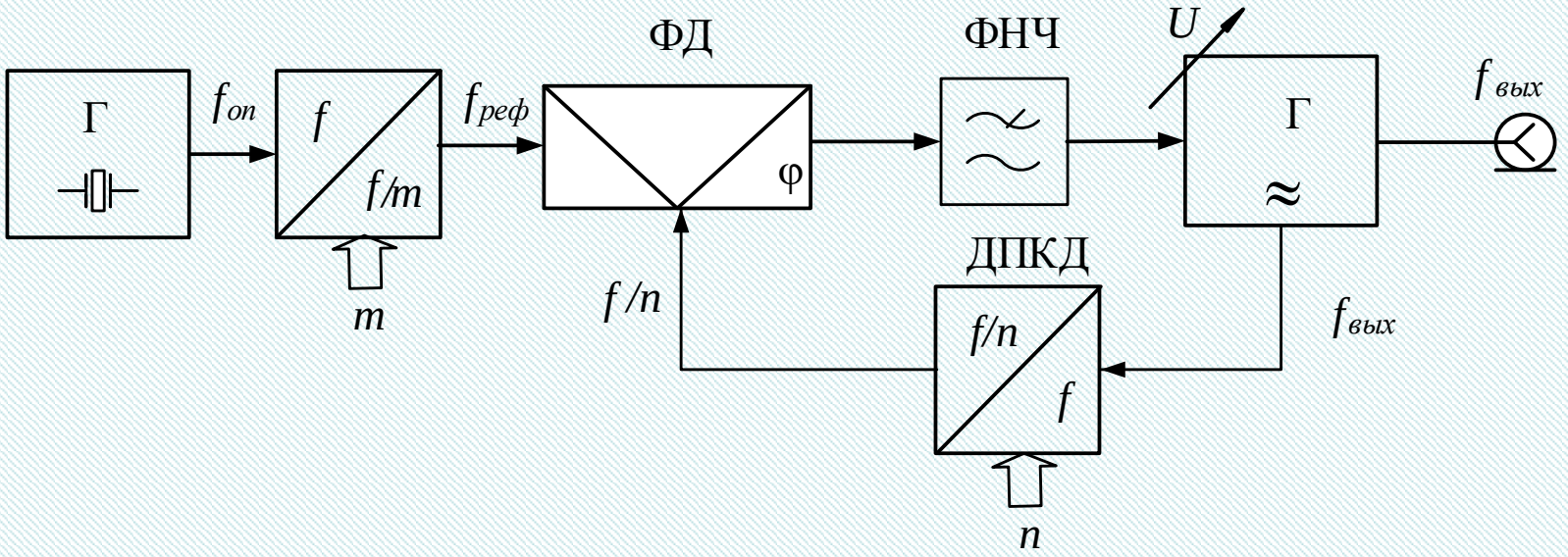
Синтезаторами частоты называют генераторы гармонических напряжений с дискретной перестройкой частоты и стабильностью, равной стабильности частоты опорного кварцевого генератора.

Различают несколько способов построения синтезаторов частоты:

- Синтезаторы с прямым аналоговым синтезом частоты (DAS -Direct Analog Synthesizers): Основаны на сложении, вычитании, умножении и делении частоты опорнорго гармонического сигнала. *Применяют на относительно низких частотах*.
- Синтезаторы с прямым цифровым синтезом (DDS- Direct Digital Synthesizers). Применяют вплоть до единиц ГГц. Просты, высокая скорость переключения,
- Синтезаторы с косвенным синтезом частоты (Indirect Synthesizers). Основаны на применении фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ или PLL - Phase Locked Loops), содержат СВЧ генератор, управляемый напряжением (ГУН или VCO - Voltage Controlled Oscillator). Основной тип синтезатора СВЧ диапазона.

Синтезаторы СВЧ с косвенным синтезом частоты

Схема синтезатора включает в себя схему ФАПЧ и *делитель частоты с переменным коэффициентом деления* (ДПКД), осуществляющий цифровое управление по частоте.



$$f_{оп}/m = f_{реф}$$

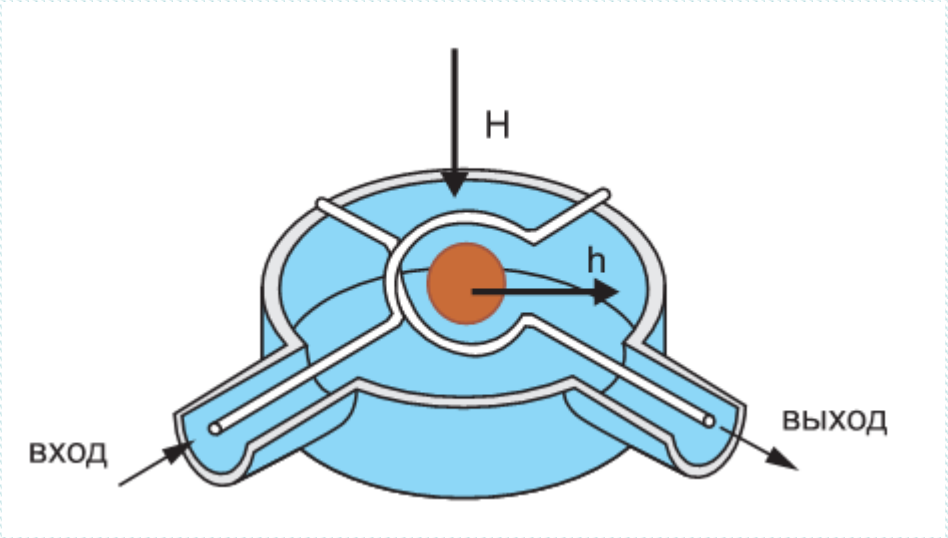
$$f_{вых}/n = f_{реф}$$

$$f_{вых} = f_{оп} \cdot n/m$$

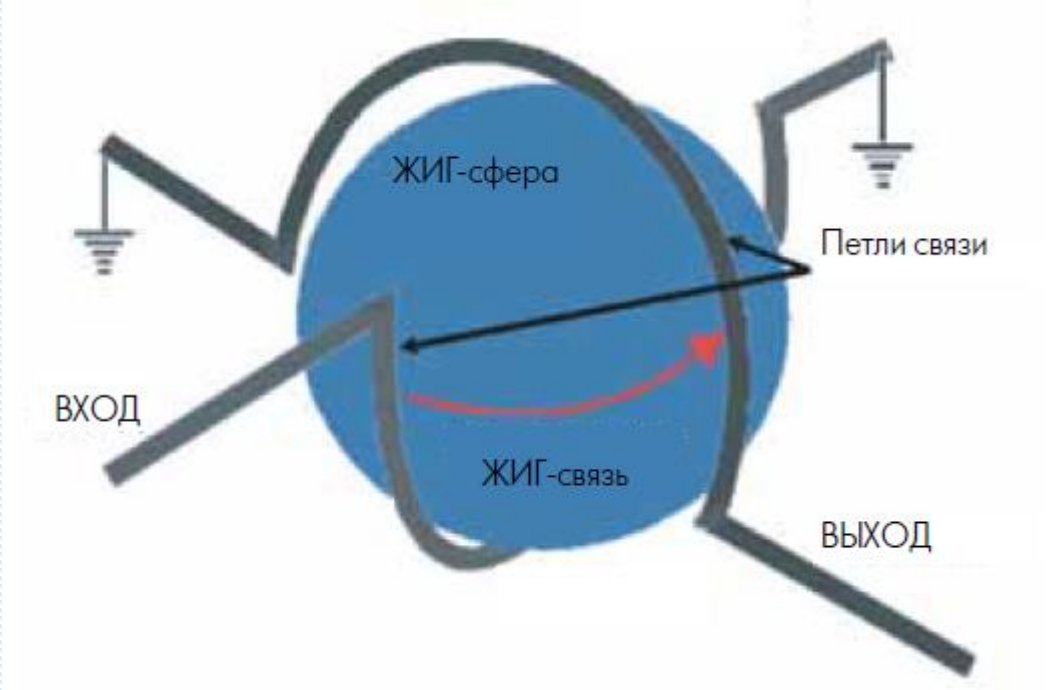
На фазовый детектор подают два колебания: первое с $f_{реф}$, второе -с выходной частотой ГУН, деленной на **n** в ДПКД. Напряжение с выхода фазового детектора подстраивает ГУН до обеспечения равенства частот на входах ФД . Изменяя коэффициент деления n, получают требуемую сетку частот с шагом, равным $f_{реф}$

ГУН представляет собой автогенератор, содержащий параметрическую частотозадающую цепь (контур или резонатор), рабочая частота которого меняется внешним управляющим напряжением (tuning voltage). При относительно небольшой девиации частоты перестройку резонатора генератора осуществляют *варикапом* – полупроводниковым *варакторным диодом*, барьерная емкость которого зависит от запирающего напряжения смещения.

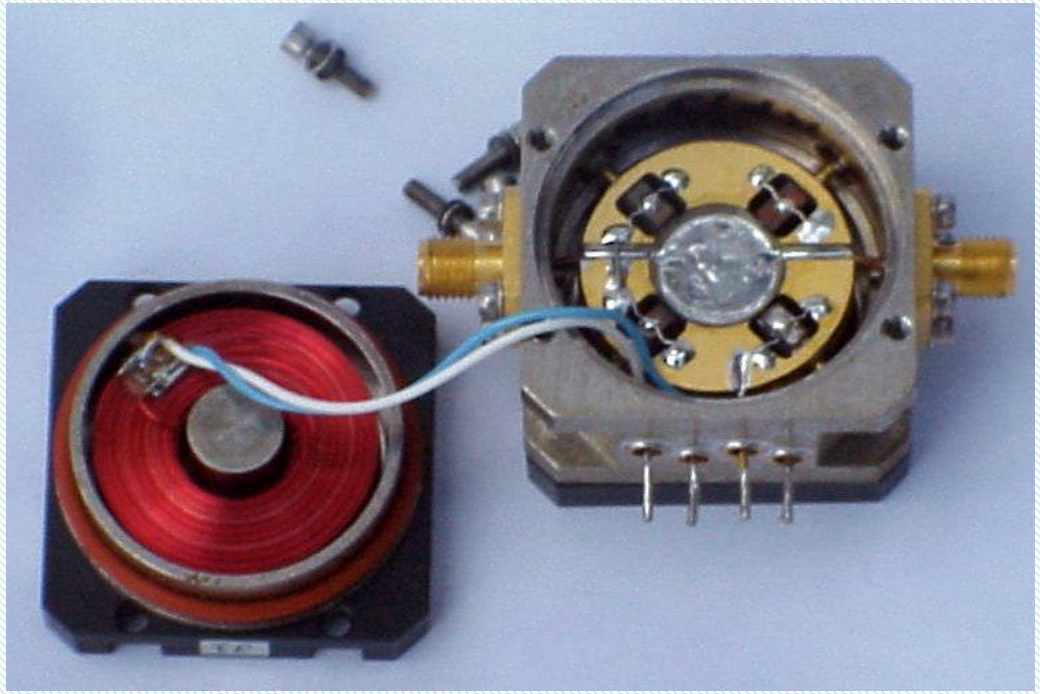
При большом диапазоне перестройки перестройку ГУН реализуют с помощью ферродиэлектрических резонаторов на железно-иттриевом гранате (ЖИГ или YIG resonators). ***ЖИГ-резонатор*** – ферритовая сфера, помещенная в поле электромагнита. Её резонансная частота линейно зависит от напряжённости внешнего подмагничивающего поля (от тока в катушках электромагнита). Частота резонанса может меняться в широких пределах (до 10 раз). Добротность ЖИГ- резонаторов может быть довольно высока (до нескольких тысяч), что определяет низкий уровень фазовых шумов генератора. ГУН с ЖИГ характерны низкой скоростью перестройки частоты (время перестройки порядка миллисекунд) , что объясняется высокой инерционностью схемы подмагничивания.

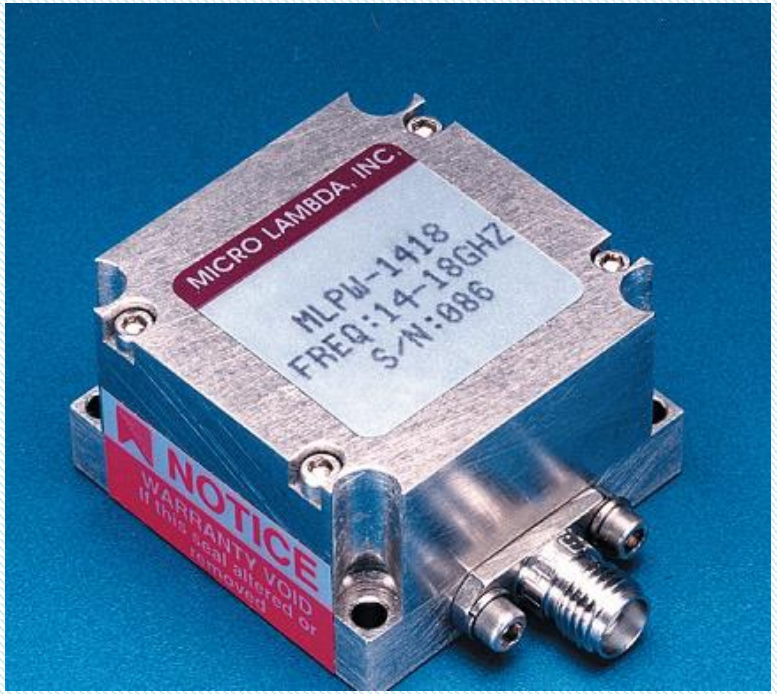


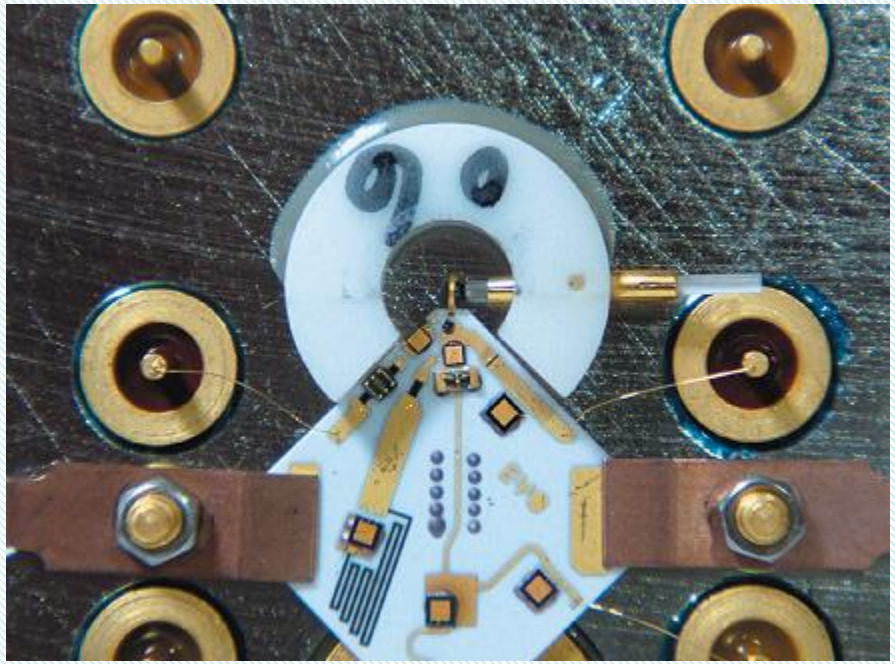
ЖИГ-резонаторы имеют высокую добротность (2…3·10^3), способны перестраиваться по частоте в широком диапазоне (в большинстве конструкций — порядка октавы, в некоторых конструкциях - больше декады).

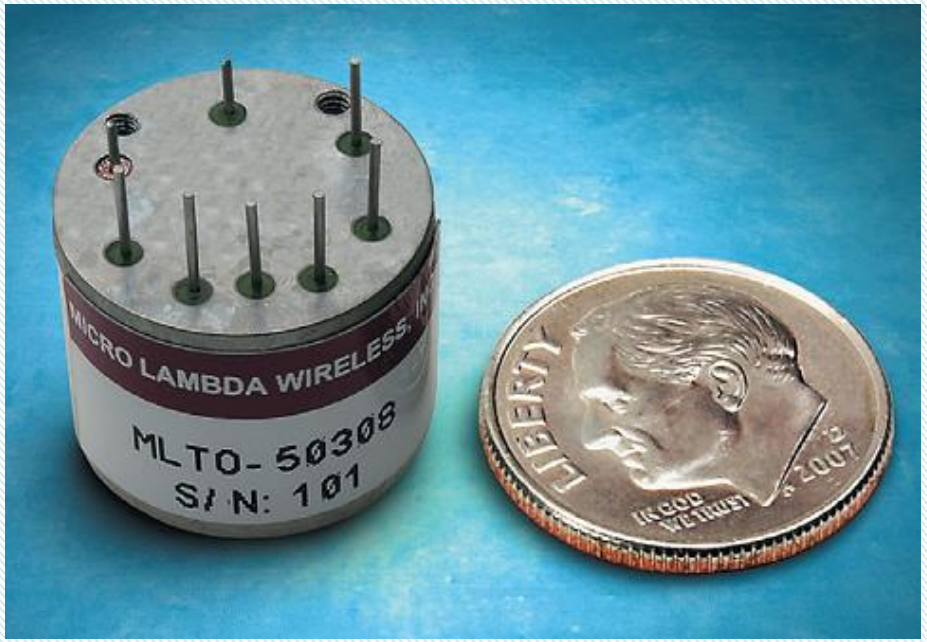


Перестраиваемые ЖИГ-резонаторы применяют в панорамных приборах с монотонным законом изменения частоты во времени. Это связано с явлениями магнитного гистерезиса в ферритах СВЧ и инерционными свойствами катушки подмагничивания.

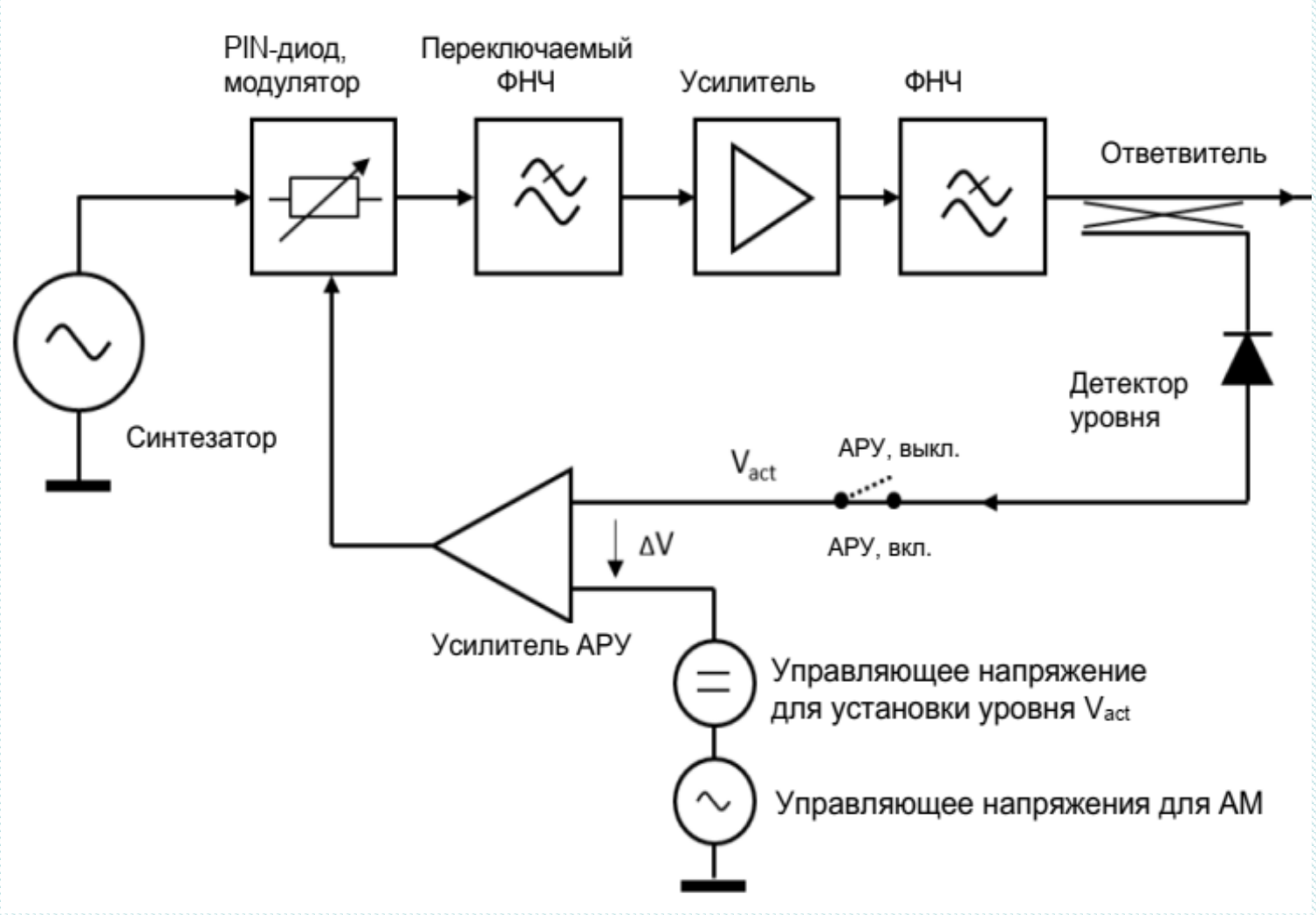



MICRO LAMBDA, INC.
MLPW-1418
FREQ:14-18GHZ
S/N:086
NOTICE
WARRANTY VOID




MICRO LAMBDA WIRELESS, IN
MLTO-50308
S/N: 101
LIBERTY
IN GOD WE TRUST
2007

Стабилизация амплитуды (мощности) СВЧ генераторов



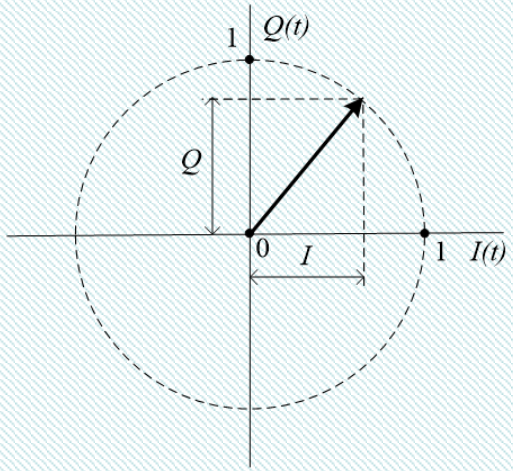
Стабилизация системой АРМ выполняет три задачи:

- Установку выходного уровня с малым шагом (до 0,01 дБ)
- Поддержание постоянного значения уровня в диапазоне температур и во времени
- Амплитудную модуляцию (АМ)

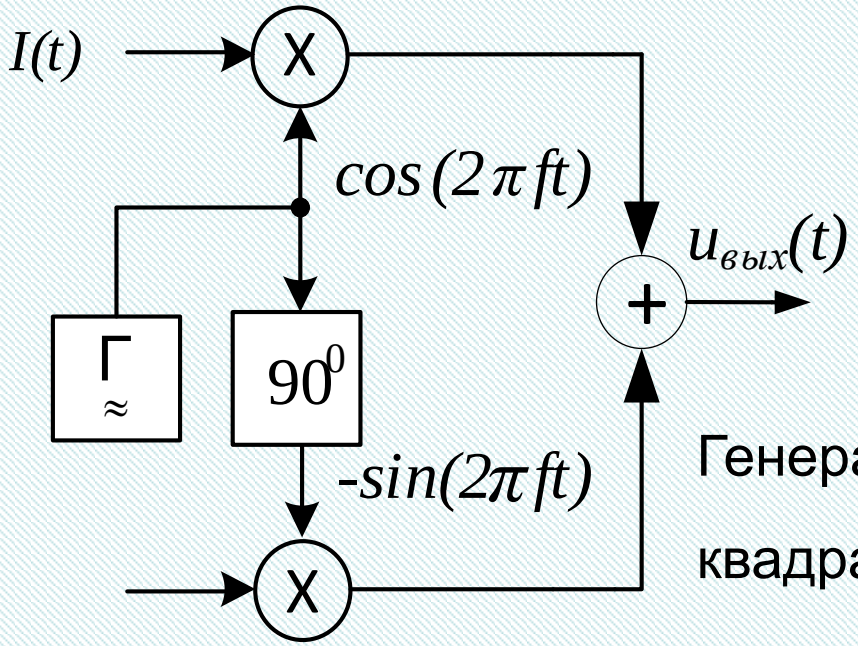
Система АРМ обеспечивает также электронную регулировку уровня сигнала в пределах до 40 дБ (например от –15 до +25 дБм) .

ФНЧ предназначен для подавления паразитных гармоник сигнала

Векторные генераторы СВЧ



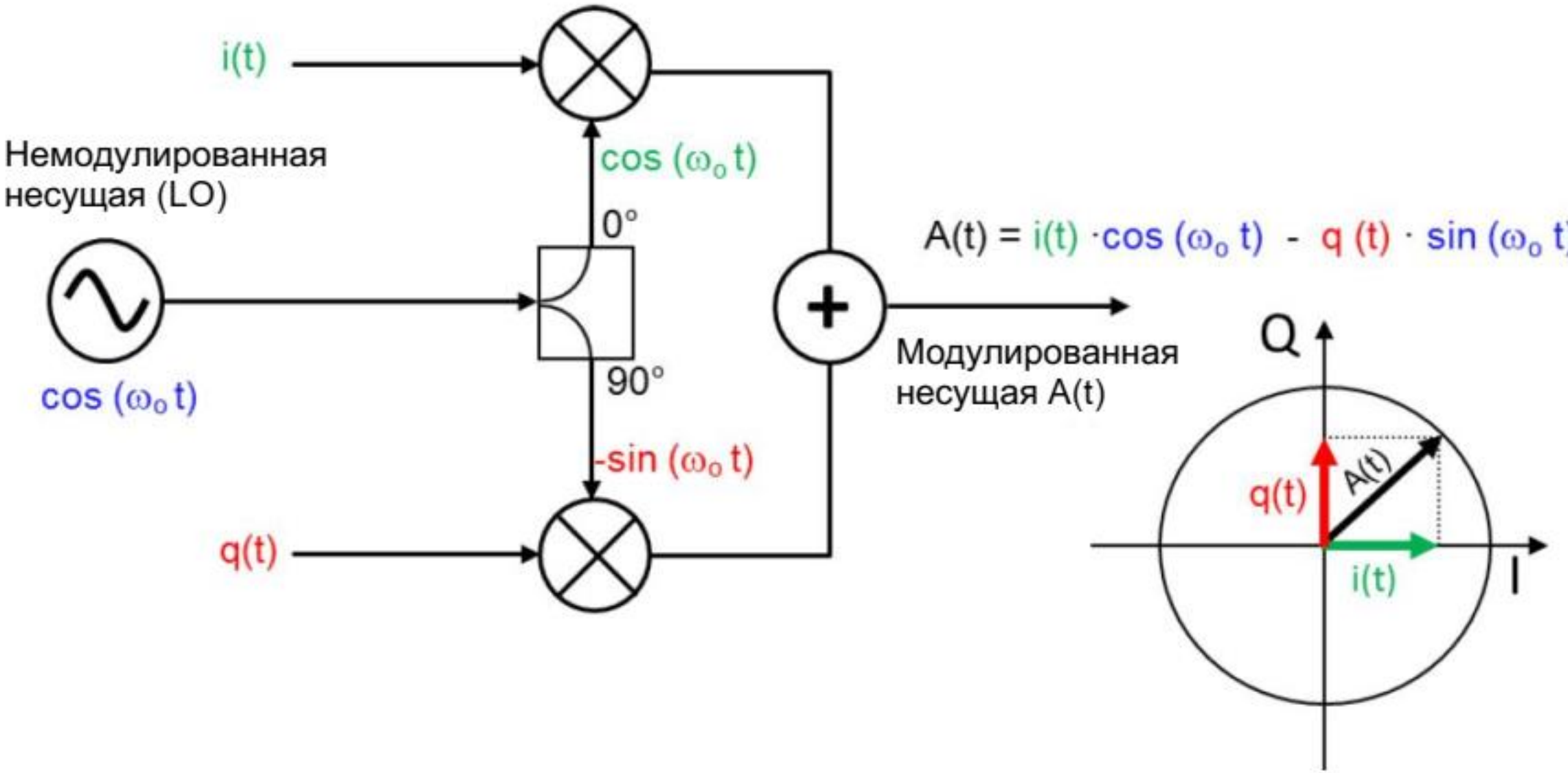
Векторные генераторы позволяют реализовать сложные виды аналоговой и цифровой модуляции, используя векторное представление сигнала, т.е. отображение вектора его комплексной огибающей в полярной системе координат. Вещественная координата определяется напряжением I(t), синфазным с несущим колебанием, а мнимая – квадратурным (сдвинутым на 90°) Q(t)



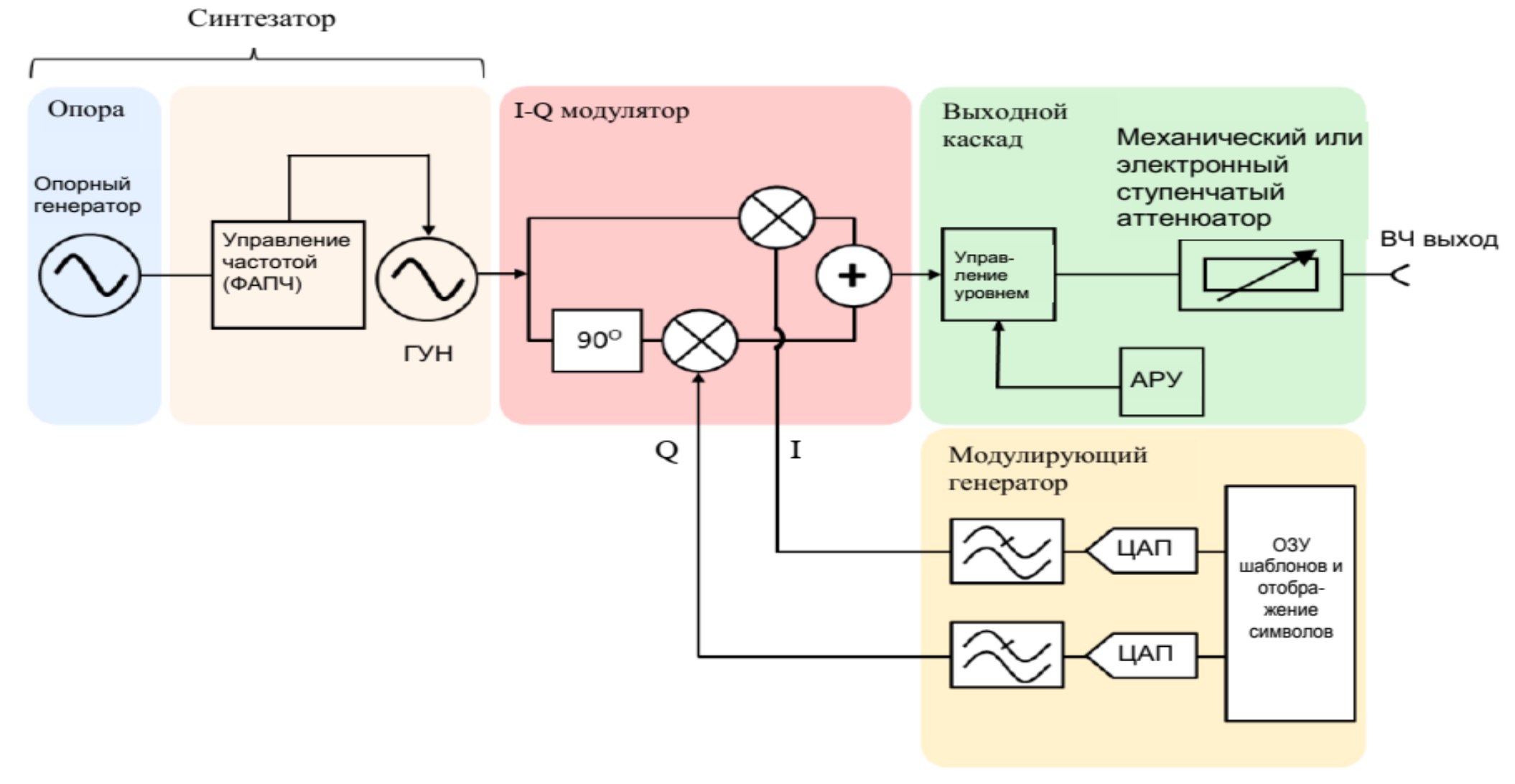
$$u(t) = U(t)\cos(2\pi f + \varphi(t)) = \ldots$$
$$\ldots = U(t)\cos(\varphi(t))\cos(2\pi f\, t) - U(t)\sin(\varphi(t))\sin(2\pi f\, t)\ldots$$
$$\ldots = I(t)\cos(2\pi f\, t) - Q(t)\sin(2\pi f\, t)$$

$$I(t) = U(t)\cos(\varphi(t)),\ Q(t) = U(t)\sin(\varphi(t))$$

Генератор имеет I-Q входы модулирующих сигналов и квадратурный модулятор. Сигнал несущей частоты f сдвигают на 90 градусов и подают на два перемножителя


i(t)
Немодулированная несущая (LO)
cos (ωo t)
0°
90°
-sin (ωo t)
cos (ωo t)
q(t)
A(t) = i(t) ·cos (ωo t) - q (t) · sin (ωo t)
Модулированная несущая A(t)
Q
I
q(t)
A(t)
i(t)

Структурная схема векторного генератора R&S



Встроенный в генератор банк шаблонов позволяет генерировать сигналы с различными стандартами цифровой модуляции. Предусмотрены разъемы I-Q для внешней модуляции


ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ Г4-111
СЕТЬ ВКЛ
ЧАСТОТА GHz
УРОВ. МОЩНОСТИ
ЧУВСТ.
УРОВ. МОЩНОСТИ
АМПЛ.
ВНЕШН. МОДУЛ.
П ЧМ П НГ М
СДЕЛАНО В СССР
ВЫХОД


ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ Г4-83 (7,5-10,5GHz)
СЕТЬ ВКЛ
MHz
(-dB)
ВЫХОД
ВНЕШ. МОД.
П П НГ ЧМ
СДЕЛАНО В СССР
КАЛИБР
КОНТРОЛЬ МОЩНОСТИ


AdvanteX
SG8
10 MHz – 8 GHz
Signal Generator
RF OUT
ON/OFF
CW
8.000 000 000 00GHz
+26.00dBm
+98.00°
RET


RFSG12
100 kHz – 12 GHz
AnaPico
RF 50 Ω
RF on/off
REMOTE
POWER
MENU

Генераторы ВЧ и СВЧ Keysight



Генераторы сигналов PSG



Генераторы сигналов UXG



Генераторы сигналов EXG



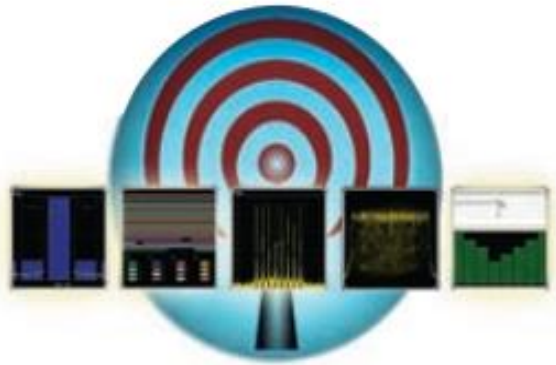
Генераторы сигналов MXG



Генератор сигналов N9310A



N5106A PXB



Программное обеспечение (ПО)
Signal Studio

Генераторы СВЧ Keysight серии MSG и ESG



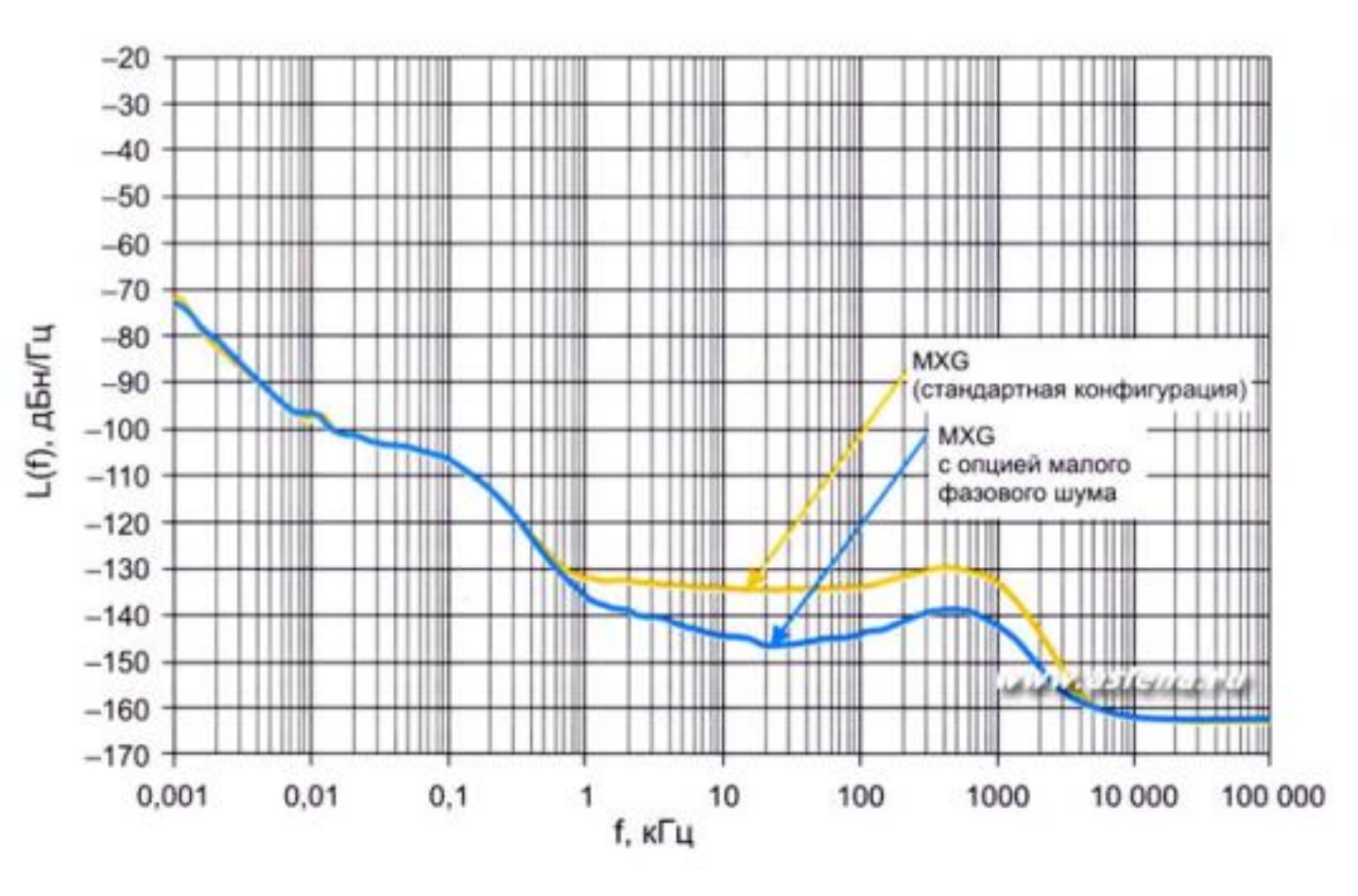


График (синего цвета) фазового шума MXG с установленной опцией малого фазового шума

Генераторы СВЧ Rohde & Shwartz



СВЧ генератор фирмы Anritsu



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

А.А. Данилин

***Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ»
(2 редакция)***

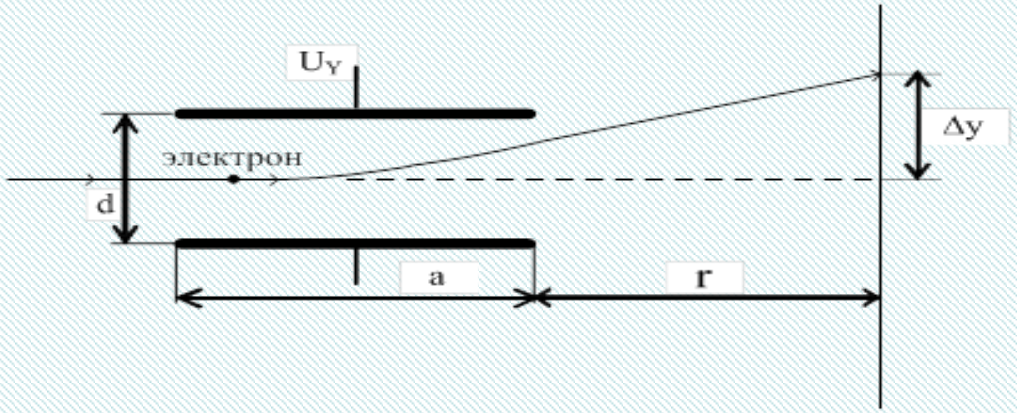
Скоростные, стробоскопические и цифровые осциллографы СВЧ

**Санкт-Петербург
2025 г.**

Скоростные осциллографы

ЭЛО имеют **ограниченный рабочий диапазон** частот из-за:

- конечной полосы пропускания усилителей канала *Y* ;
- недостаточного быстродействия ЭЛТ (влияние пролетных явлений в отклоняющих пластин *Y*).
- Влияние емкости и индуктивности вводов отклоняющих пластин ЭЛТ
- Уменьшение яркости осциллограммы при высоких скоростях перемещения луча по экрану ЭЛТ.



Чувствительность трубки h_Y

$$h_y = \frac{\Delta y}{U_Y} = \frac{a \cdot r}{2 d U_a}$$

Время пролета электрона через пластины зависит от их длины «а» и скорости электрона ~ 10^5...10^6 м/с

$$\tau_{пр} = a / v_{эл}$$

$$v_{эл} = \sqrt{\frac{2e}{m} U_a}$$

для Ua=2 кВ и длине пластин 2 см время пролёта примерно 0.5 нс.

При гармоническом сигнале чувствительность будет зависеть от соотношения времени пролета τ и периода отклоняющего напряжения T по закону sin(x)/x.

$$h_Y = h_0 \cdot \frac{\sin(\pi \cdot \tau_{пр}/T)}{\pi \cdot \tau_{пр}/T} = h_0 \cdot \frac{\sin(\pi \cdot \tau_{пр} f)}{\pi \cdot \tau_{пр} f}$$

h0 –чувствительность ЭЛТ на низких частотах.

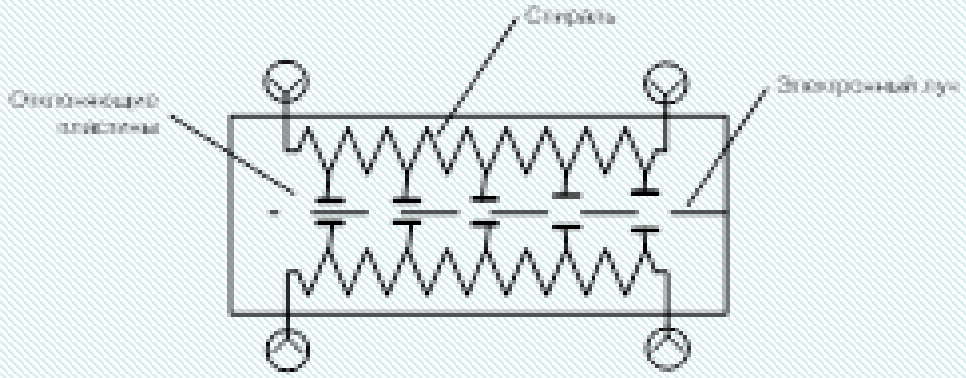
Чувствительность ЭЛТ равна нулю на ***критической*** частоте $f_{кр} = 1/\tau_{пр}$

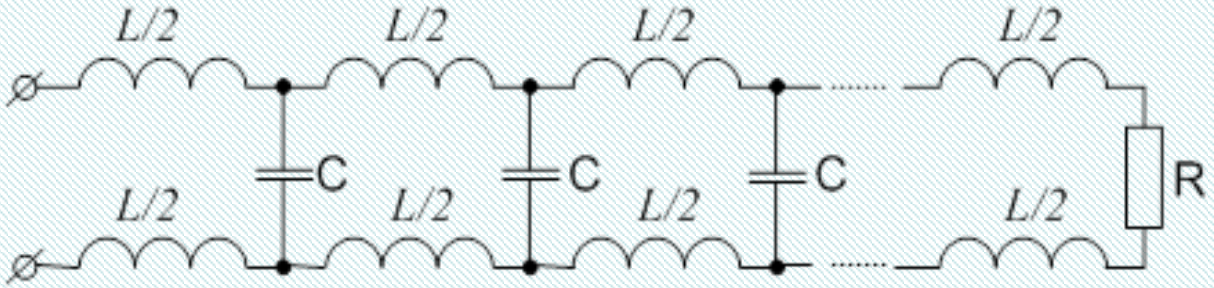
Полоса пропускания ЭЛТ $f_в < f_{кр}$ определяется спадом чувствительности до 0,707 от h0

Расширения рабочей полосы $f_в$ и $f_{кр}$ добиваются, снижая время пролета (увеличивая ускоряющее напряжение *U*a или укорачивая пластины), что приводит к снижению статической чувствительности h0.

$$\frac{h_Y(f_в)}{h_0} = \frac{\sin(\pi\tau_{пр} f_в)}{\pi\tau_{пр} f_в} = 0.707 \Rightarrow \pi\tau_{пр} f_в = 1.41 \Rightarrow f_в = \frac{0.45}{\tau_{пр}}$$

Трубка бегущей волны ТБВ





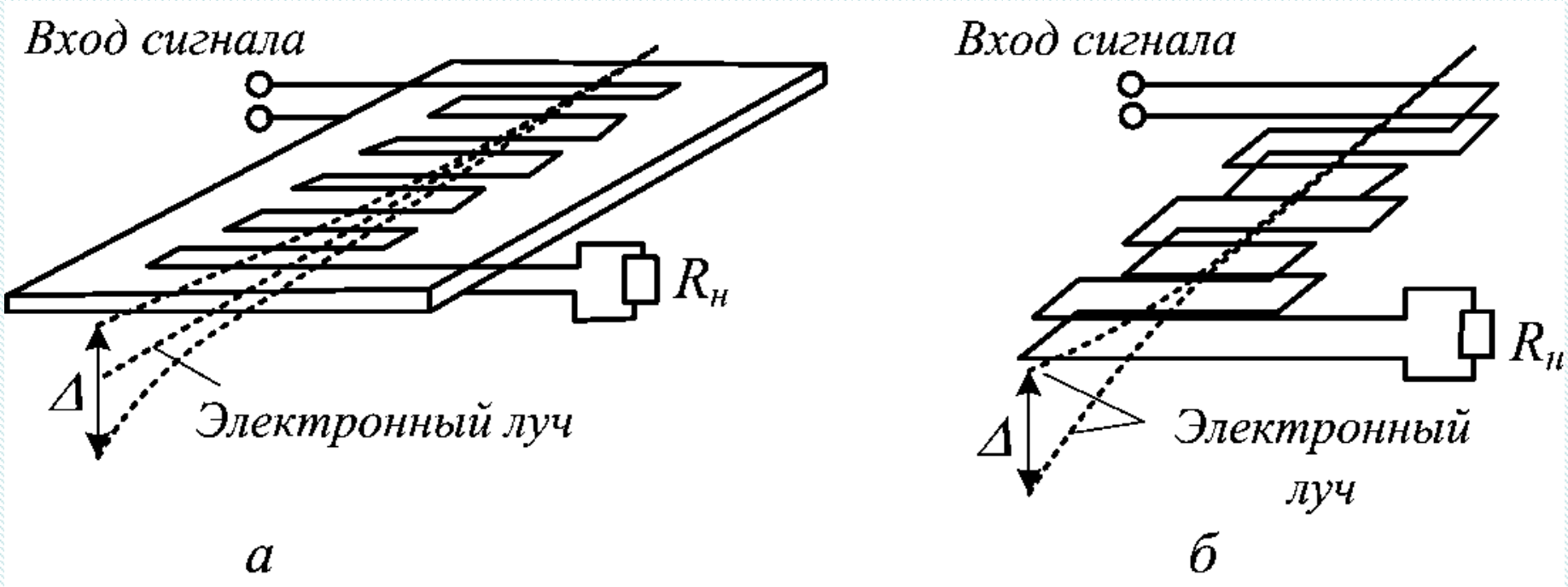
На выходе линии включают согласованную нагрузку $R_н = \sqrt{\frac{L}{C}}$ (C — емкость между парой пластин).

Время задержки сигнала на каждой секции $\tau_з = \sqrt{LC}$

Если выбрать скорость электронов равной скорости распространения сигнала, то электроны будут последовательно отклоняться секциями пластин одним и тем же мгновенным значением сигнала. Чувствительность ТБВ **повышается**.

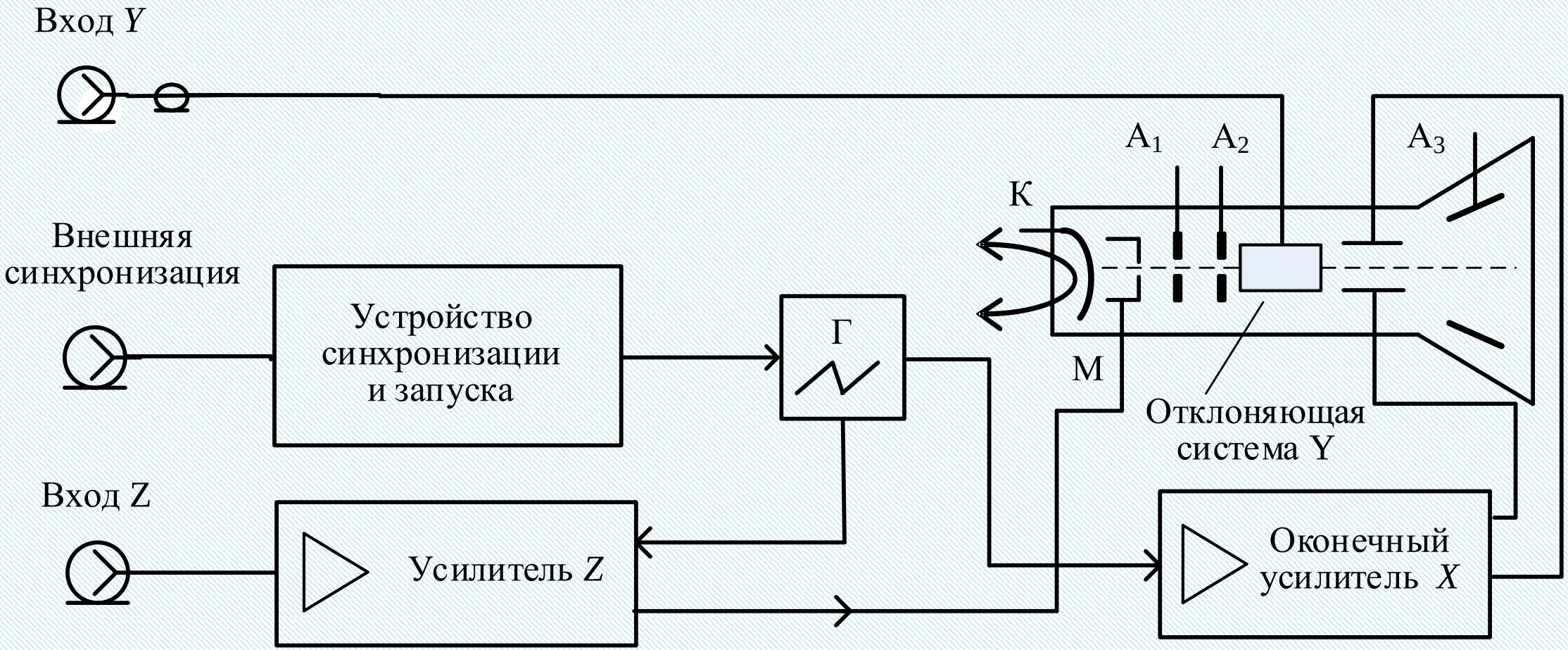
Скоростной осциллограф – это ЭЛО с трубкой бегущей волны, имеющей расширенную полосу частот

Меандровая замедляющая система ТБВ



Один из вариантов отклоняющей системы ТБВ - распределенная плоская двухпроводниковая («меандровая») замедляющая система несимметричного (а) и симметричного (б) вида

Структурная схема скоростного осциллографа



Особенности скоростных осциллографов

- Часто отсутствует **усилитель** канала Y (из-за сложности его констурирования) Сигнал подают прямо на ЭЛТ => низкая чувствительность и малое входное сопротивление;
- Пониженное ускоряющее напряжение для повышения чувствительности => **малая яркость** экрана => применяют стекловолоконные экраны;
- Малые углы отклонения луча => **небольшие размеры** экрана => фотографирование с экрана;
- Сверхскоростной блок развертки с предельно **малым** временем прямого хода (доли нс);
- Синхронизация и запуск развертки только **внешним** сигналом => используют широкополосные делители входного сигнала (тройники, НО);
- **Электронная шкала** по вертикали – фотографирование калибрационного ступенчатого сигнала и затем наложение на него осциллограммы исследуемого;

Скоростной осциллограф С7-15 (1976 г., ВНИИРИП г. Вильнюс)



Основные характеристики осциллографа С7-15:

- Полоса пропускания ТБВ: 0-5 ГГц.
- Время нарастания ПХ: 70 пс.
- Коэффициент отклонения: 1 В/мм, скорость записи до 50000 км/с
- Стекловолоконный экран 15х40 мм, ширина луча 85 мкм. Фиксация на фотопленку
- Входное сопротивление: 50 Ом.,

Скоростной осциллограф С7-19 (1982г., НИИ «Платан» г. Фрязино)



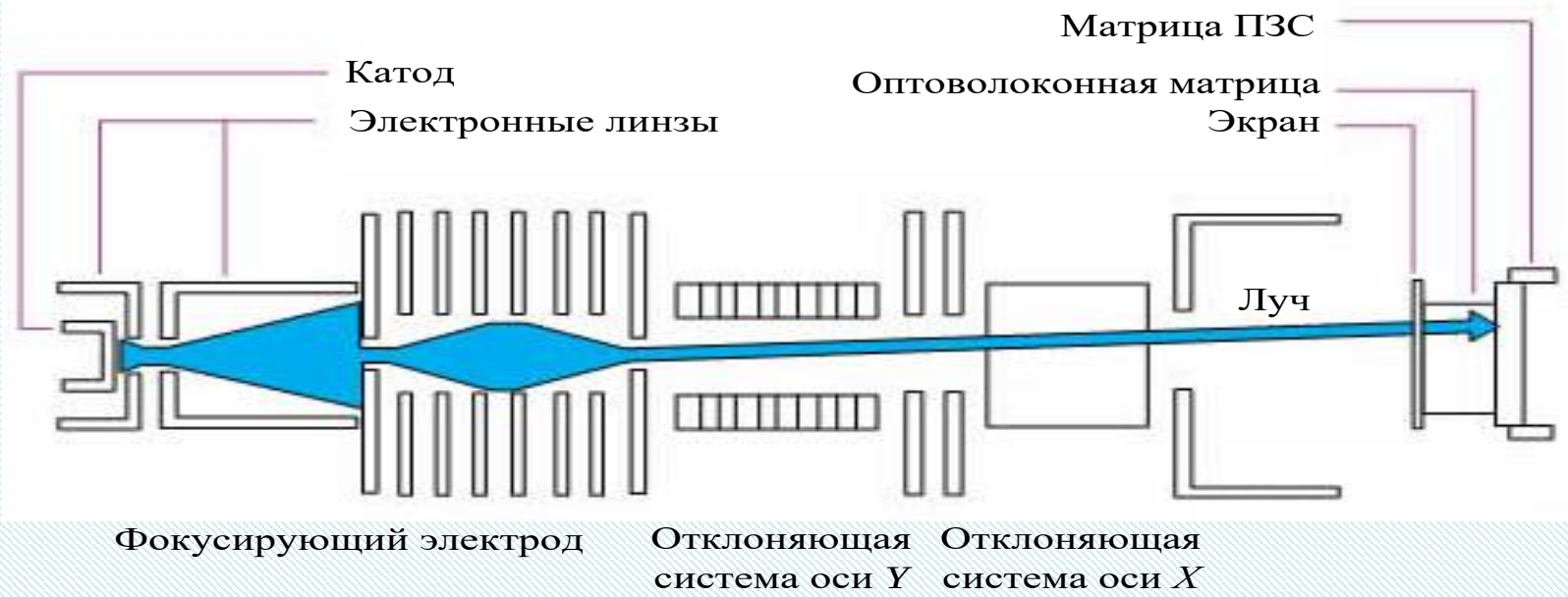
- Полоса пропускания: 0-5 ГГц , время нарастания ПХ: 70 пс.
- Коэффициент отклонения: 170 мВ/мм, коэффициент развертки от 200 пс/дел до 100 нс/дел
- Пределы основной погрешности измерения амплитудных и временных параметров: ±10 %.
- Входное сопротивление: 50 Ом., стекловолоконный экран 40х60 мм

Аналоговые осциллографы IWATSU (АКТАКОМ АСК-8104) со встроенной ПЗС- видеоматрицей



Осциллограмма создается на внутренней поверхности ЭЛТ и через оптоволоконную матрицу (обеспечивающую электрическую изоляцию от заряженной поверхности ЭЛТ) передается в ПЗС матрицу. . Изображение с ПЗС матрицы отображается в цифровом виде на цветном жидкокристаллическом экране (800×480)

Приборы имеют плюсы аналогового осциллографа (высокая скорость обновления экрана - до 1 миллиона осциллограмм в секунду), а также ряд достоинств ЦО: возможность сверхбыстрой (до 10 дел за нс) записи и запоминания осциллограммы и персистенция (запоминание нескольких кадров изображения на экране)



Запоминающая сканирующая 2-дюймовая ТБВ со встроенным ПЗС - конвертором на 380000 пикселей (5.8 дюймов, 800x480 точек)

Осциллограф обеспечивает коэффициент развертки от 200 пс/дел до 200 мс/дел при минимальном коэффициенте отклонения 5 мВ/дел в полосе 1 ГГц (время нарастания порядка 350 пс). Это один из самых широкополосных в мире аналоговых запоминающих осциллографов

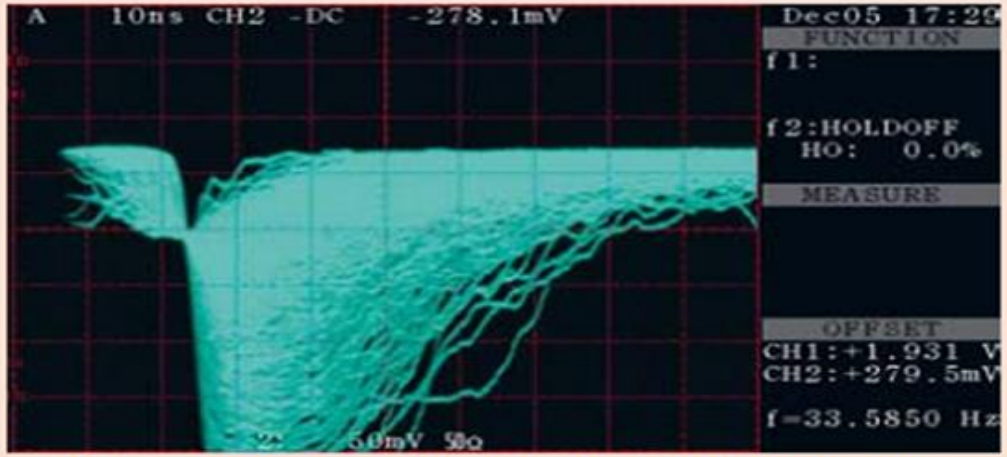


Рис. 6. Использование персистенции позволяет зарегистрировать изменение во времени формы сложного аналогового сигнала

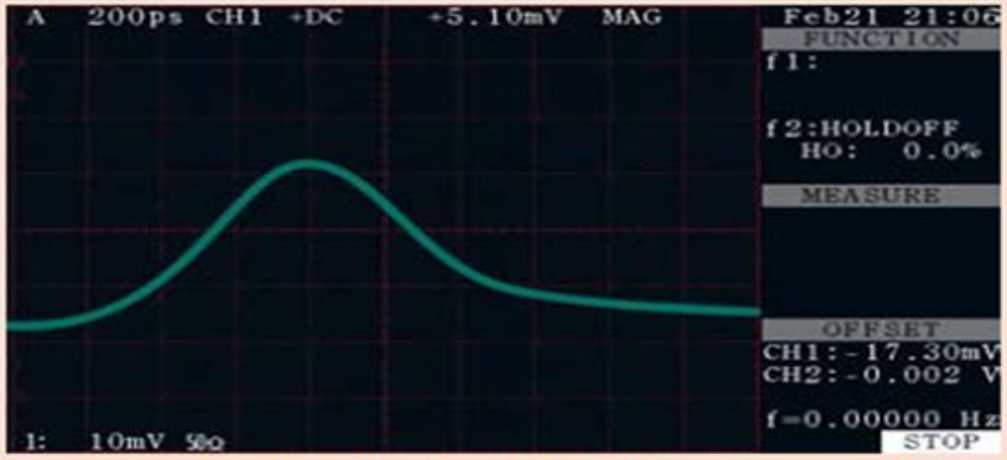


Рис. 7. Использование ЭЛТ трубки с функцией запоминания позволяет запомнить кратковременный одиночный сигнал



Рис. 16. Отображение сигнала с амплитудной модуляцией на обычном цифровом осциллографе

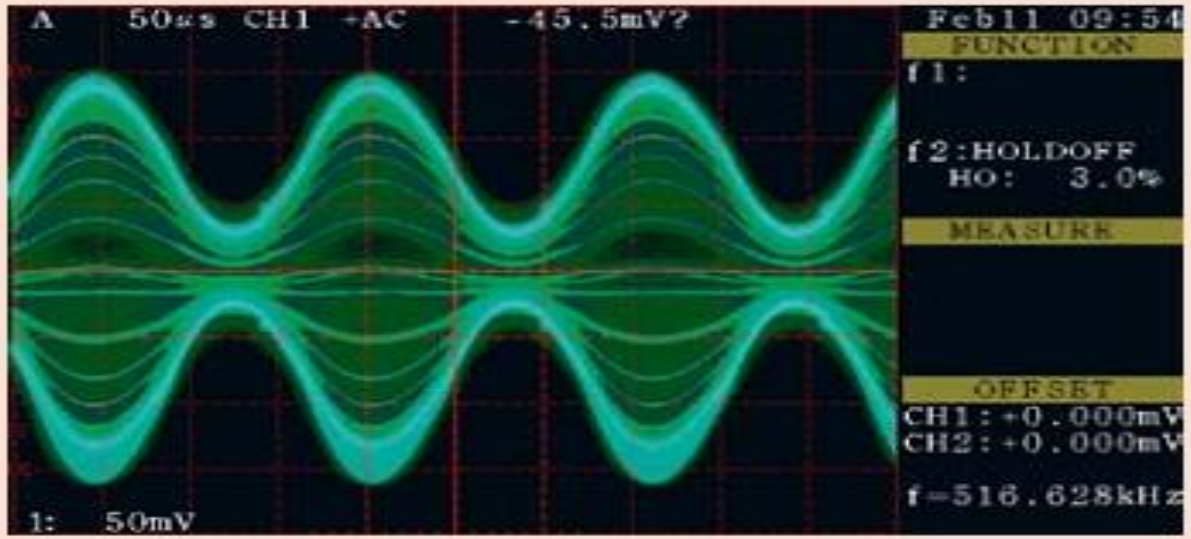


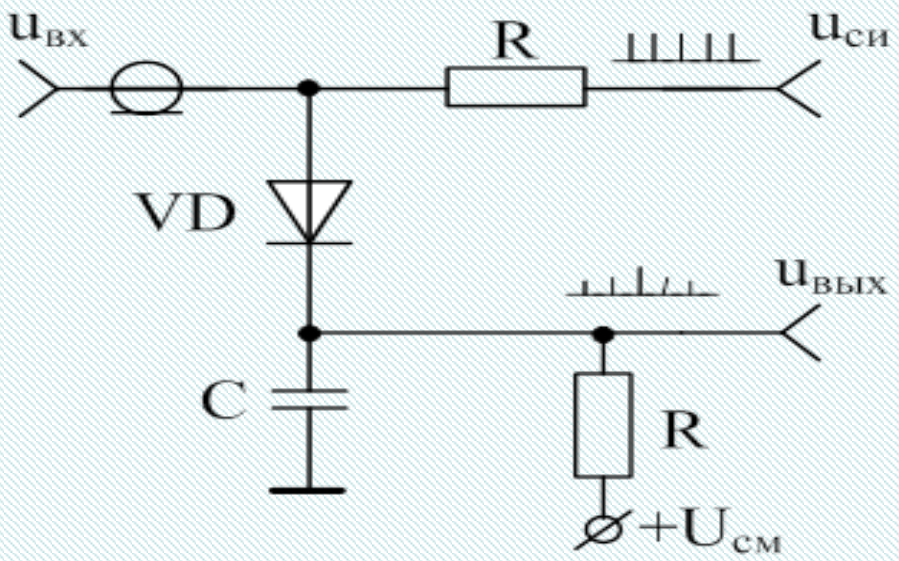
Рис. 15. Отображение сигнала с амплитудной модуляцией на АСК-8064

Стробоскопические осциллографы

Стробоскопическим (sampling oscilloscope) называется осциллограф, использующий ***масштабное*** преобразование (расширение) последовательности копий сигнала во времени с сохранением его формы. Стробоскопические осциллографы пригодны для исследования ***только повторяющихся*** сигналов.

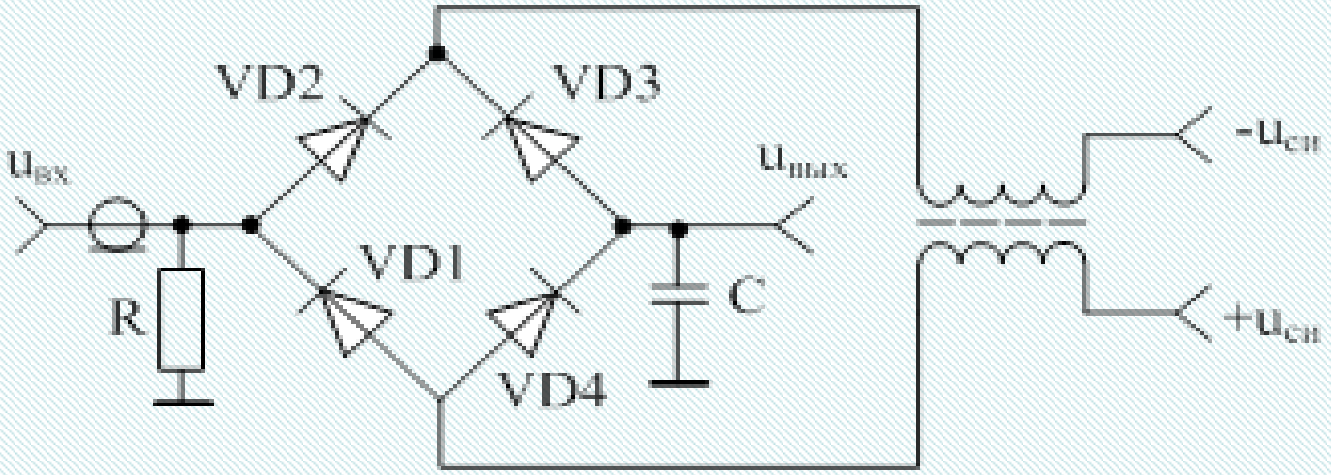
Входной сигнал дискретизируют во времени. От **каждой** копии сигнала берется только **один** отсчет (в отличие от цифрового осциллографа). Точки дискретизации сигнала равномерно смещены во времени по копиям сигнала.

Дискретизация входного сигнала

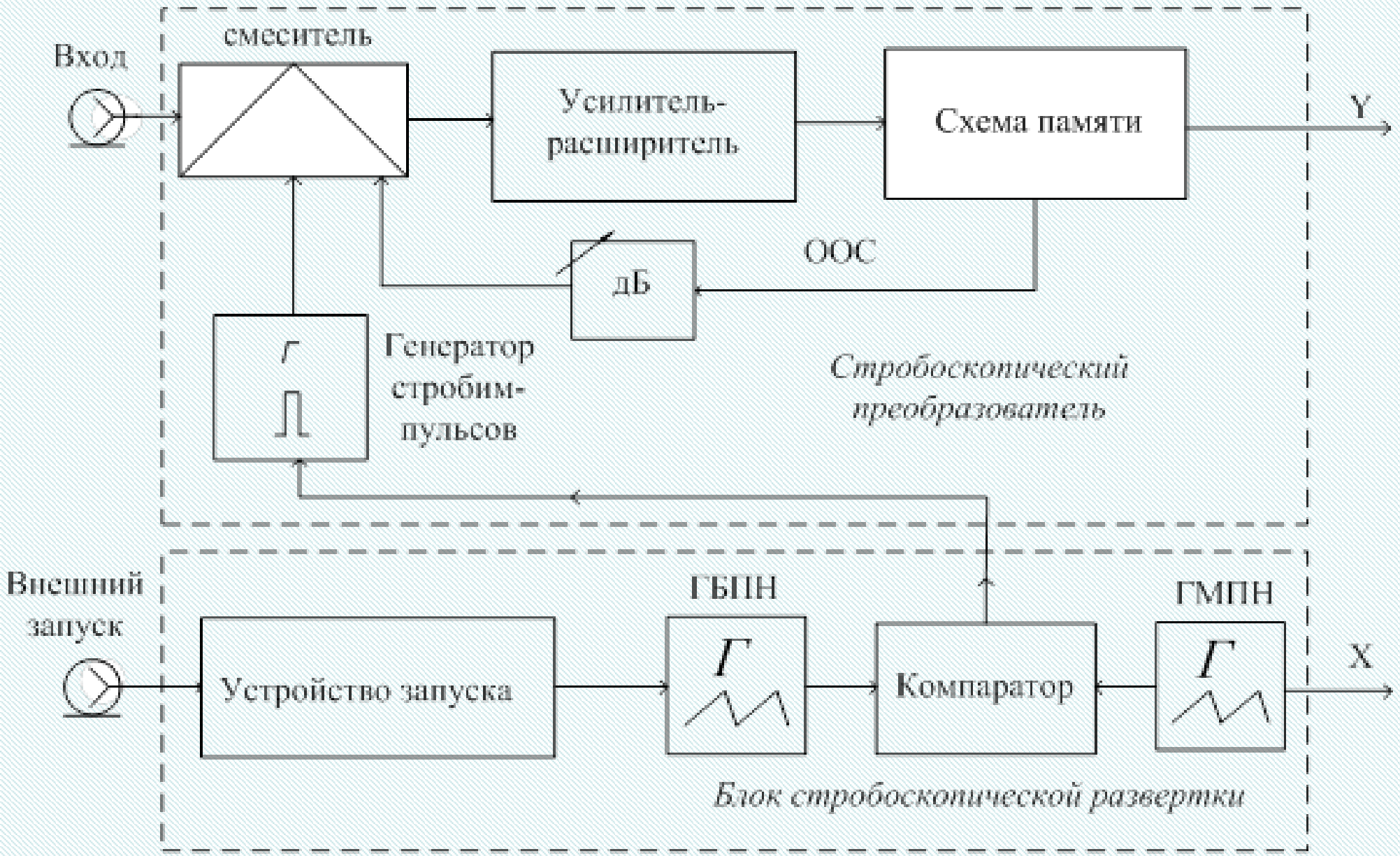


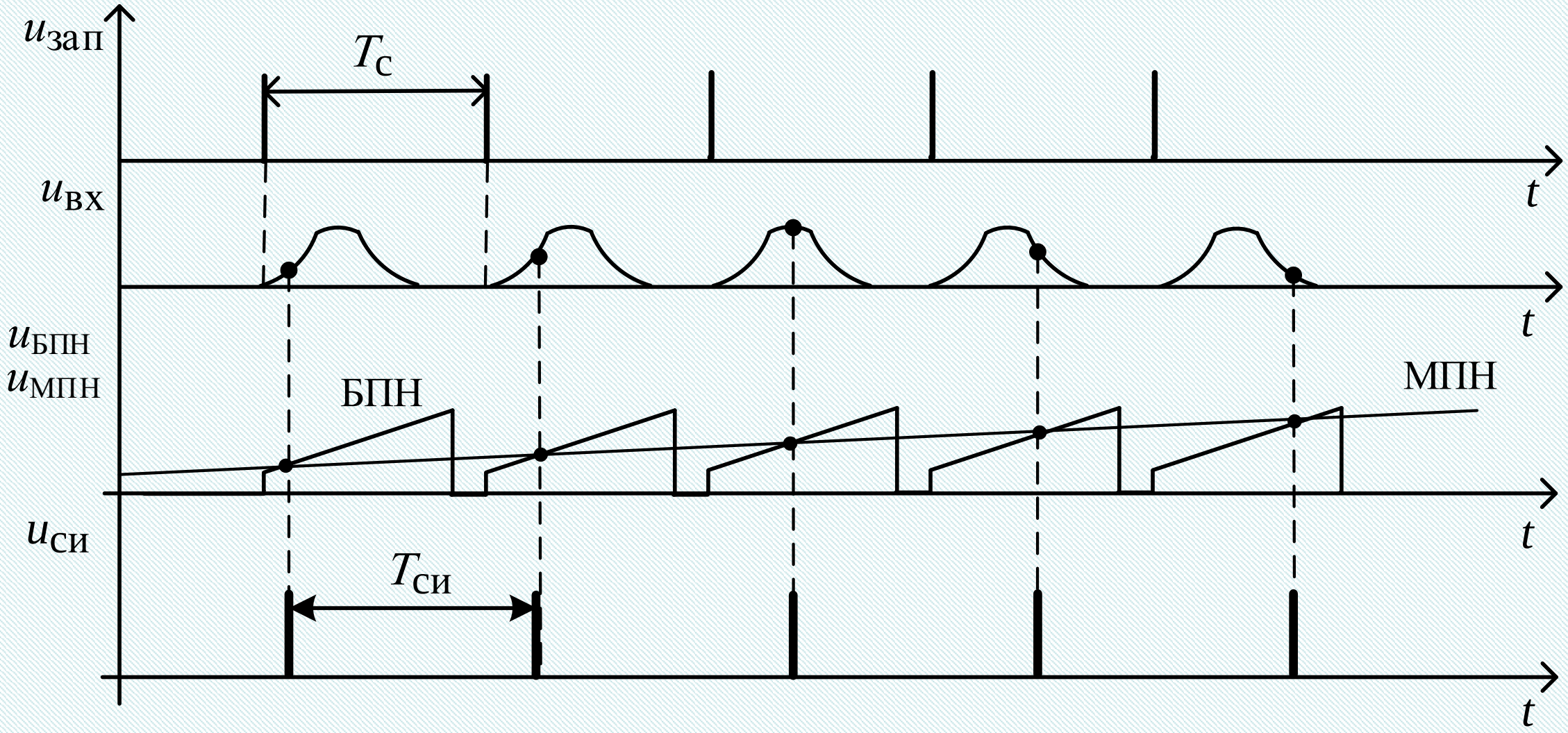
Однодиодный стробоскопический смеситель

Балансный кольцевой стробоскопический смеситель



Структурная схема стробоскопического осциллографа





Напряжения сигналов в схеме стробоскопической развертки

Период стробимпульсов $$T_{си} = T_с + \Delta t$$

Количество отсчетов на период сигнала $$n = T_с / \Delta t$$

Коэффициент преобразования временного масштаба $$K_{пр} = \frac{T_{пр}}{T_с} = \frac{n \cdot T_{си}}{T_с} = \frac{T_{си}}{\Delta t} \approx n$$

Амплитудно- частотная характеристика стробоскопического преобразователя

$$АЧХ(f) = \frac{u_{вых_max}(f)}{U_{вх}} = \frac{\tau_{си}}{RC} \cdot \frac{\sin(\pi f \tau_{си})}{(\pi f \tau_{си})}$$

Полоса пропускания стробоскопического осциллографа

$$\frac{\sin(\pi \cdot f_в \tau_{си})}{(\pi \cdot f_в \tau_{си})} = 0.707 \quad \rightarrow \quad f_в = \frac{1.41}{\pi \cdot \tau_{си}} = \frac{0.45}{\tau_{си}}$$

Особенности стробоскопических осциллографов:

.

- Увеличенный динамический диапазон. Соотношение между максимальным и минимальным значениями сигнала может достигать 60 дБ и выше;
- Чувствительность стробоскопического осциллографа может составлять 1 – 10 мВ/дел; она ограничена внутренними шумами смесителя;
- Стробоскопические осциллографы делают двухканальными – это позволяет сравнивать два сигнала;
- Синхронизация и запуск - только внешние;
- Для получения больших Кпр применяют **длинную** «медленную» развертку – необходимо использовать запоминающие ЭЛТ или цифровые осциллографические блоки (digital sampling oscilliscope).

Области использования стробоскопических осциллографов:

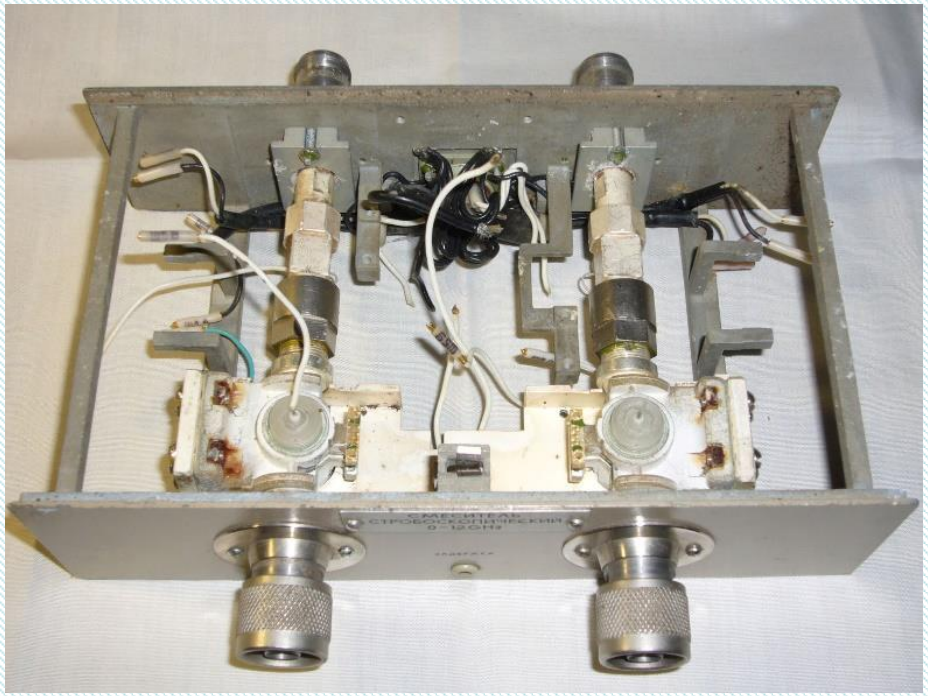
- анализ и наблюдение переходных процессов малой длительности;
- анализ быстродействующих цифровых устройств и линий передач;
- исследование радиоимпульсов ВЧ и СВЧ сложной формы;
- исследование распределенных систем рефлектометрическим методом;

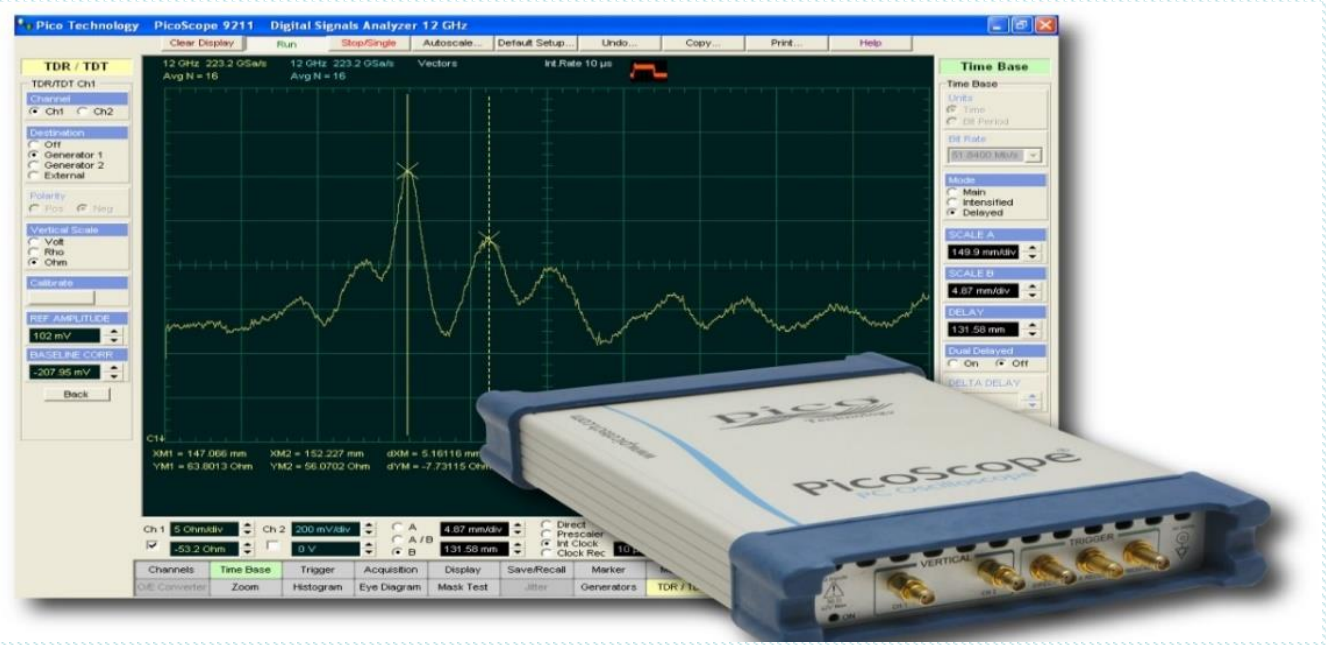
Первый отечественный стробоскопический осциллограф С7-11 с полосой 5 ГГц (1971г., ВНИИРИП г.Вильнюс)

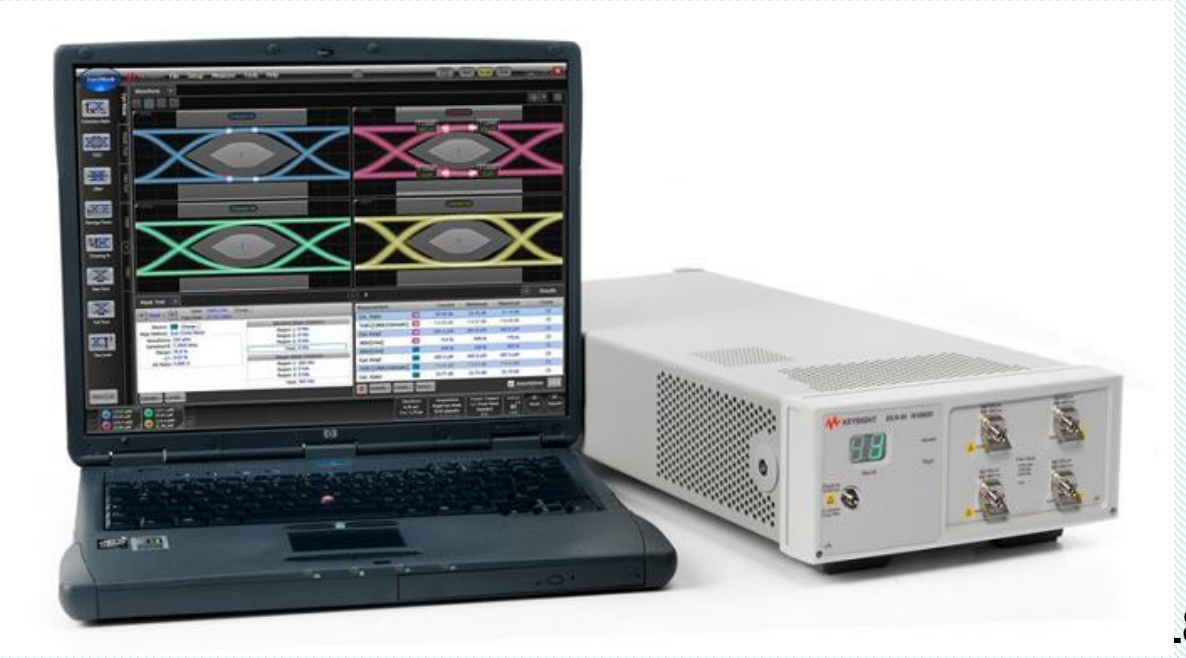


Стробоскопические осциллографы

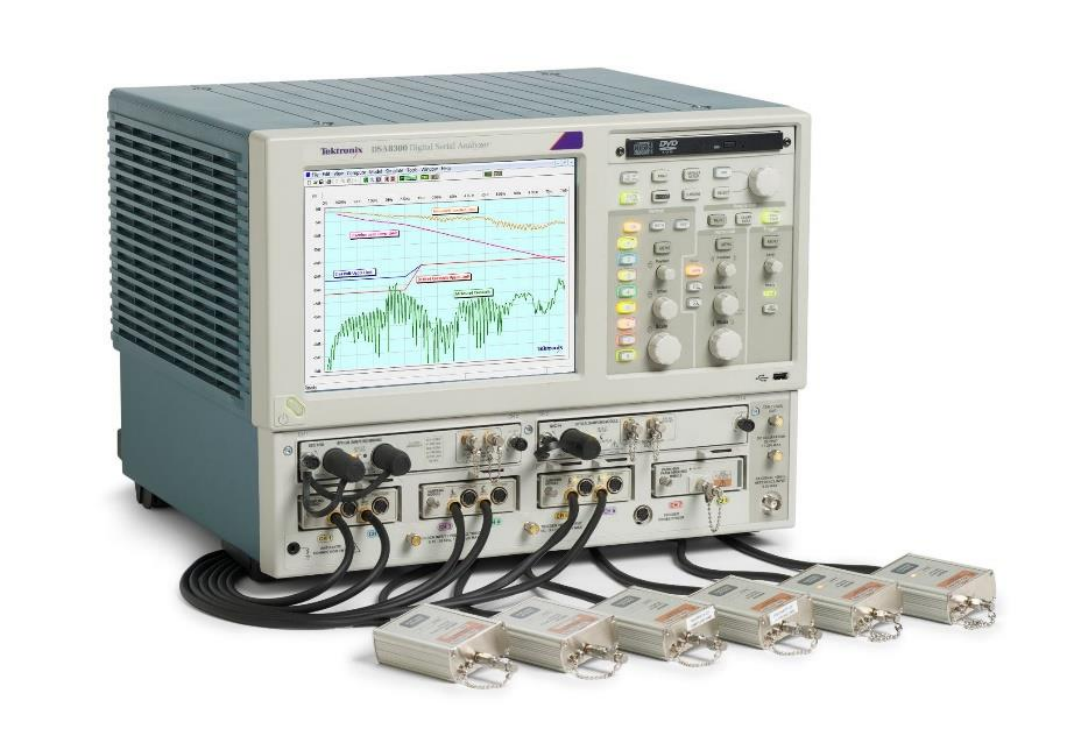


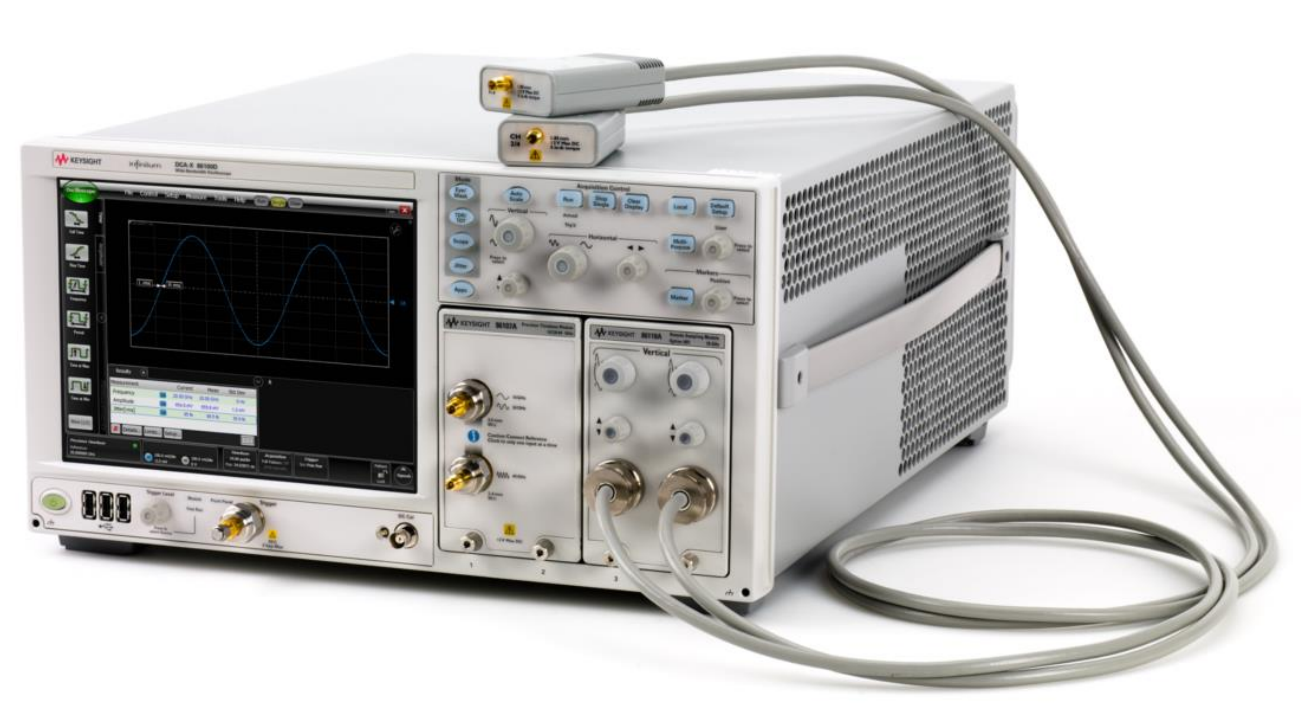






Цифровые стробоскопические осциллографы Tektronix DSA 8300 и Keysight (Agilent) 86118A





Оптический стробоскопический осциллограф Tektronix TSO820

Полоса > 30 Ггц, длина волны входного сигнала в пределах 750 to 1650 нм. Коэффициенты развертки 1 пс…1 мс/дел. Вертикальное разрешение 15 бит. Глубина памяти 80 Мслов.



ЦИФРОВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ СВЧ

Принцип ЦО - преобразование аналогового сигнала в поток цифровых данных, запоминаемый в ОЗУ и отображаемый на экране в виде массива светящихся точек (*цифровая осциллография)*

Аналого-цифровое преобразованиеи запоминание мгновенных значений сигнала позволяет решить ряд задач:

- Возможность работы ЦО с одиночными и случайными сигналами. ЦО называют Digital Storage Oscilloscope (DSO -цифровой запоминающий осциллограф).
- Высокая точность измерения напряжения и временных интервалов, характерная для цифровых приборов.
- Расширенные возможности синхронизации и запуска.
- Возможность проведения косвенных измерений с индикацией результатов на экране.
- Простое подключение к измерительным системам.
- Применение сверхбыстродействующих АЦП с частотами дискретизации 20 и более ГГц => выход в СВЧ диапазон

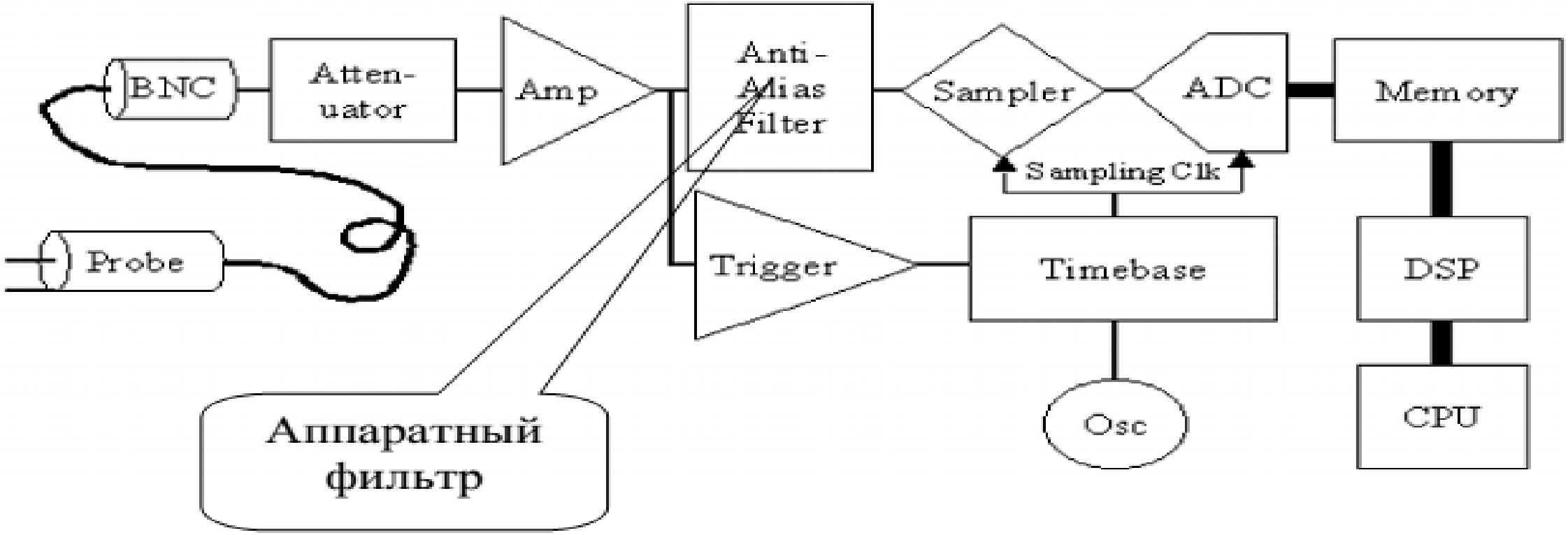
Пример СВЧ ЦО - цифровые осциллографы фирмы Keysight

Цифровые запоминающие осциллографы (DSO) и осциллографы смешанных сигналов (MSO) серии 6000 X

Обзор характеристик серии 6000 X					
Полоса пропускания при половине каналов* (-3 дБ)		1 ГГц	2,5 ГГц	4 ГГц	6 ГГц
Полоса пропускания при всех каналах* (-3 дБ)		1 ГГц	2,5 ГГц	4 ГГц	4 ГГц
Расчетное время нарастания (от 10 до 90%)		≤ 350 пс	≤ 140 пс	≤ 112,5 пс	≤ 75 пс
Входные каналы	DSOX6002A	2			
	DSOX6004A	4			
	MSOX6002A	2 + 16			
	MSOX6004A	4 + 16			
Максимальная частота дискретизации		20 Гвыб./с при половине каналов, 10 Гвыб./с при всех каналах			
Максимальная глубина памяти		4 Мвыб. в стандартной комплектации, наличие сегментированной памяти в стандартной комплектации			
Размер и тип дисплея		Емкостной сенсорный экран 12,1" (30,7 см) с функцией мультитач и поддержкой жестов			
Скорость обновления сигналов на экране		> 450 000 осциллограмм в секунду			
Уровень собственных шумов при 1 мВ/дел., 50 Ом		115 мкВ (СКЗ)	150 мкВ (СКЗ)	150 мкВ (СКЗ)	210 мкВ (СКЗ)

Структурная схема СВЧ ЦО Keysight

Блок диаграмма осциллографа



Agilent Technologies

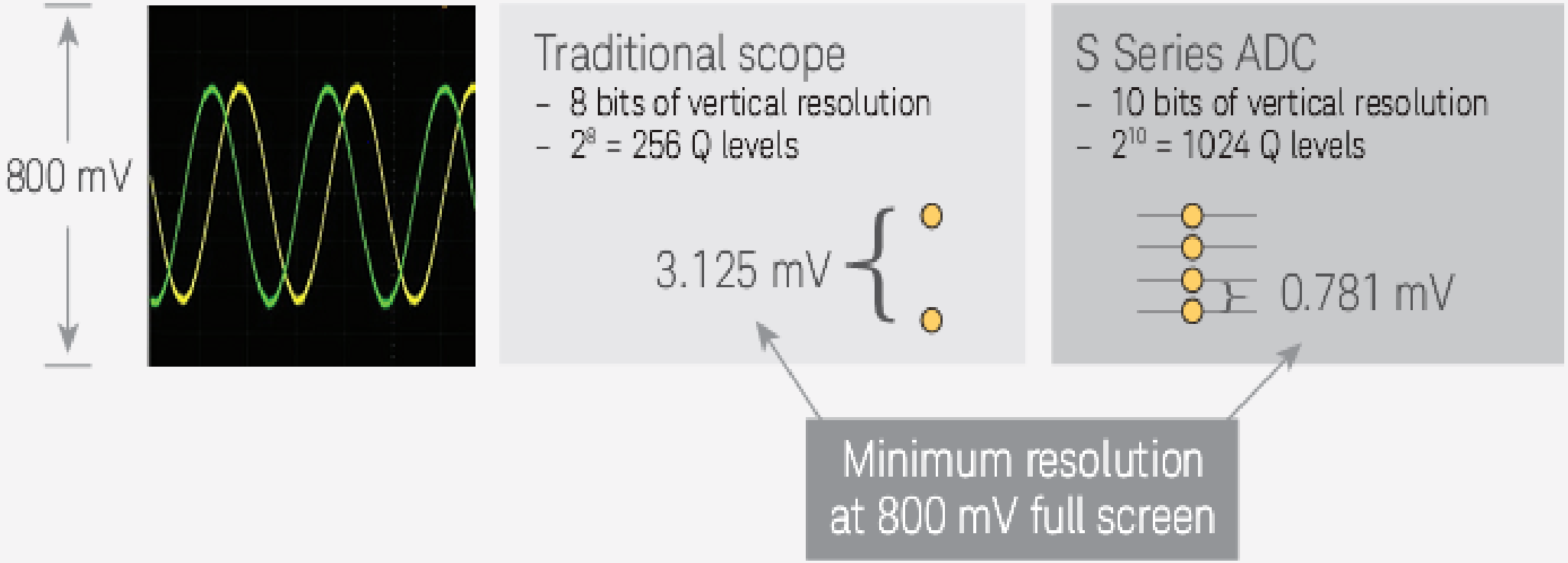
Принципы построения СВЧ ЦО

1. Для оцифровки сигнала в ЦО используют быстродействующие АЦП. Частоту дискретизации выбирают от единиц до десятков ГГц.
2. Моменты выборок значений сигнала определяются тактовой частотой АЦП (*дискретизация по времени*). Обычно используют *равномерную* дискретизацию – мгновенные отсчеты сигнала берутся через равные отрезки времени (интервалы дискретизации) и им присваивается цифровой код, соответствующий ближайшему уровню квантования.
3. Интервал дискретизации определяет *разрешающую способность* ЦО по длительности и быстродействие осциллографа (время нарастания ПХ и рабочую полосу частот)

4. Дискрет *квантования сигнала по уровню* задают выбором разрядности АЦП. Разность между соседними уровнями (интервал квантования) определяет *разрешающую способность* ЦО по напряжению (двоичная разрядность 8 ,10, 12 бит).
5. Момент начала формирования изображения задают устройством запуска. С этого устройства на микропроцессор поступает импульс, соответствующий началу входного сигнала (или сигнала внешнего запуска). В ЦО предусматривают также программные способы запуска на основе анализа вида преобразованного сигнала.
6. Наиболее часто в цифровых осциллографах применяют матричные дисплеи на жидкокристаллических панелях (монохромные и цветные).

Сравнение двух осциллографов с разными разрядностями АЦП.

Разрешающая способность при переходе с 8 на 10-разрядное АЦП возрастает в 4 раза.

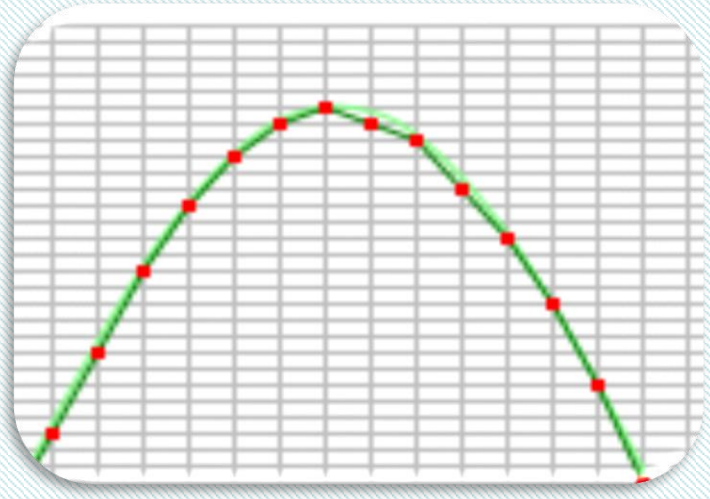


- Доступное число уровней квантования АЦП = 2^N

Число разрядов АЦП (N)	Число уровней квантования	Динамический диапазон
8	256	~48 дБ
12	4096	~72 дБ



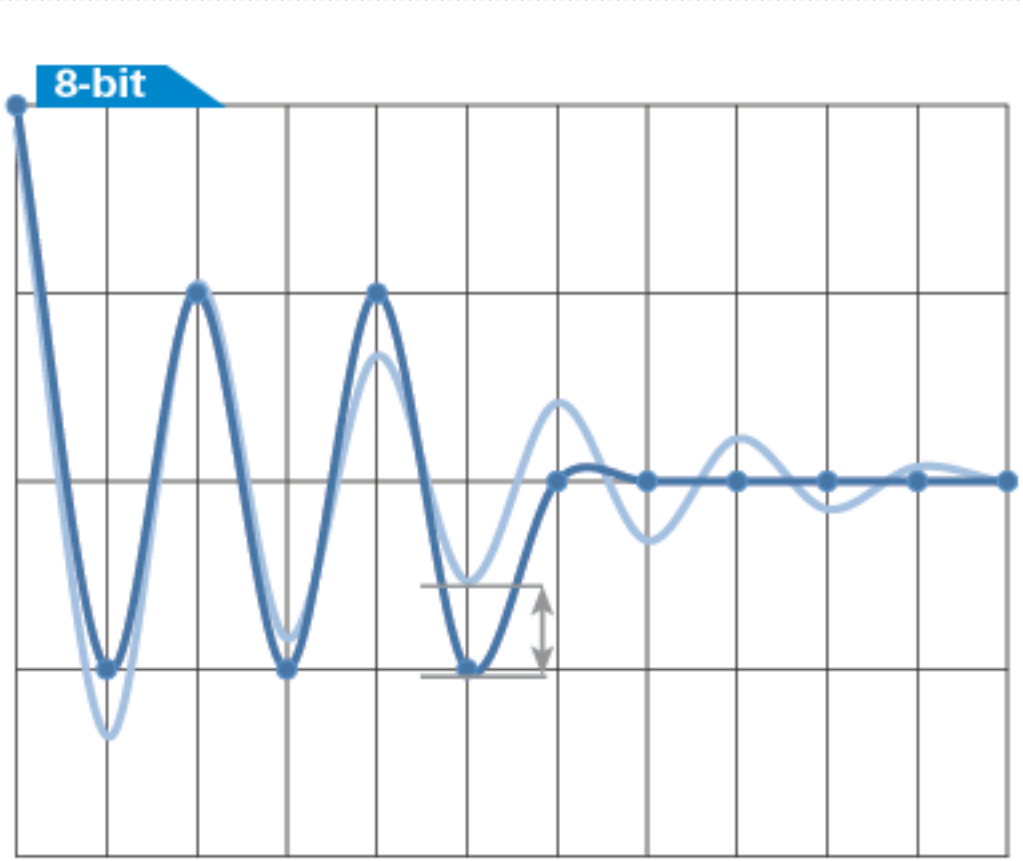
с низким 8-битным разрешением



с разрешением 12 бит

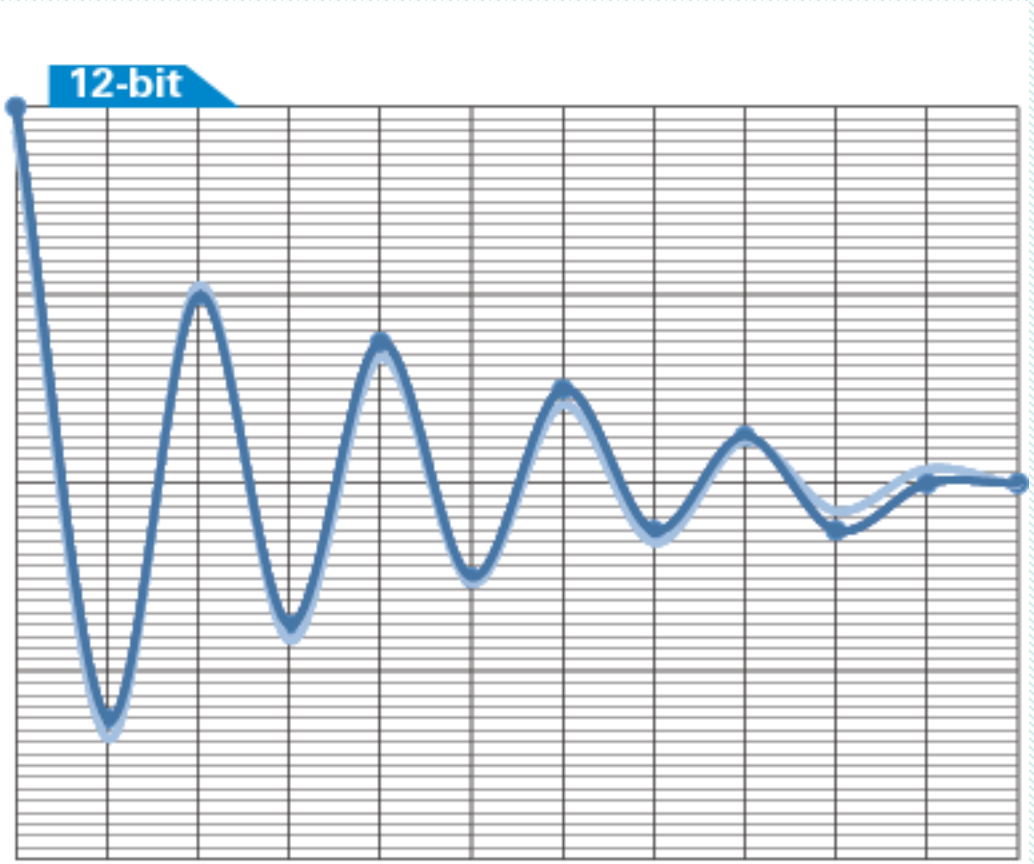
Разрешение АЦП: «12 > 8 – значит точнее !»

АЦП 8 бит



Большая ошибка квантования

АЦП 12 бит



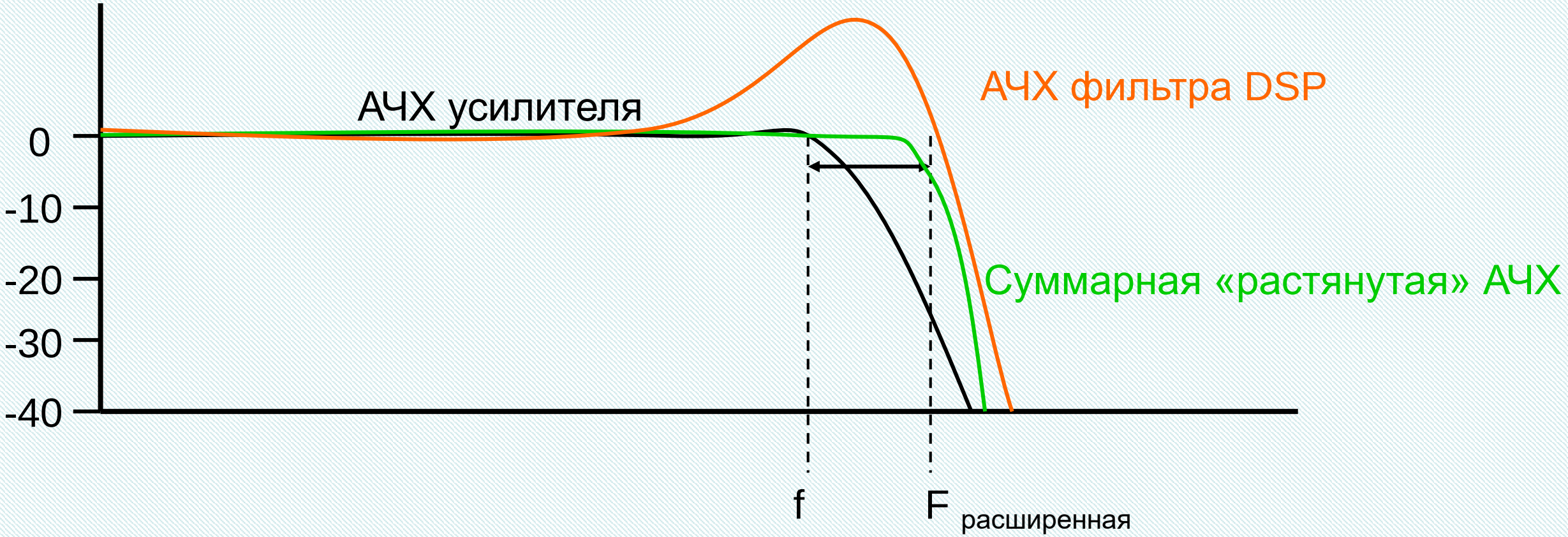
Минимальные искажения формы

Сигнал с выхода АЦП

Сигнал на входе осциллографа

Расширение полосы с использованием DSP

не лучший способ расширения полосы пропускания



Режимы работы *развертки* цифрового осциллографа

.

1. Режим непрерывной развертки имитирует работу самописца (ROLL mode). Все отсчеты поступают на экран.Текущий отсчет сигнала выводится в правом краю экрана. При поступлении следующего отсчета осциллограмма сдвигается на один столбец влево, имитируя движение ленты самописца. Применяют **при медленных развертках**.
2. Режим одиночной развертки (single shot mode). Один кадр изображения строится по отсчетам входного сигнала при возникновении события запуска (например, ручного нажатия кнопки ПУСК, подачи внешнего сигнала).

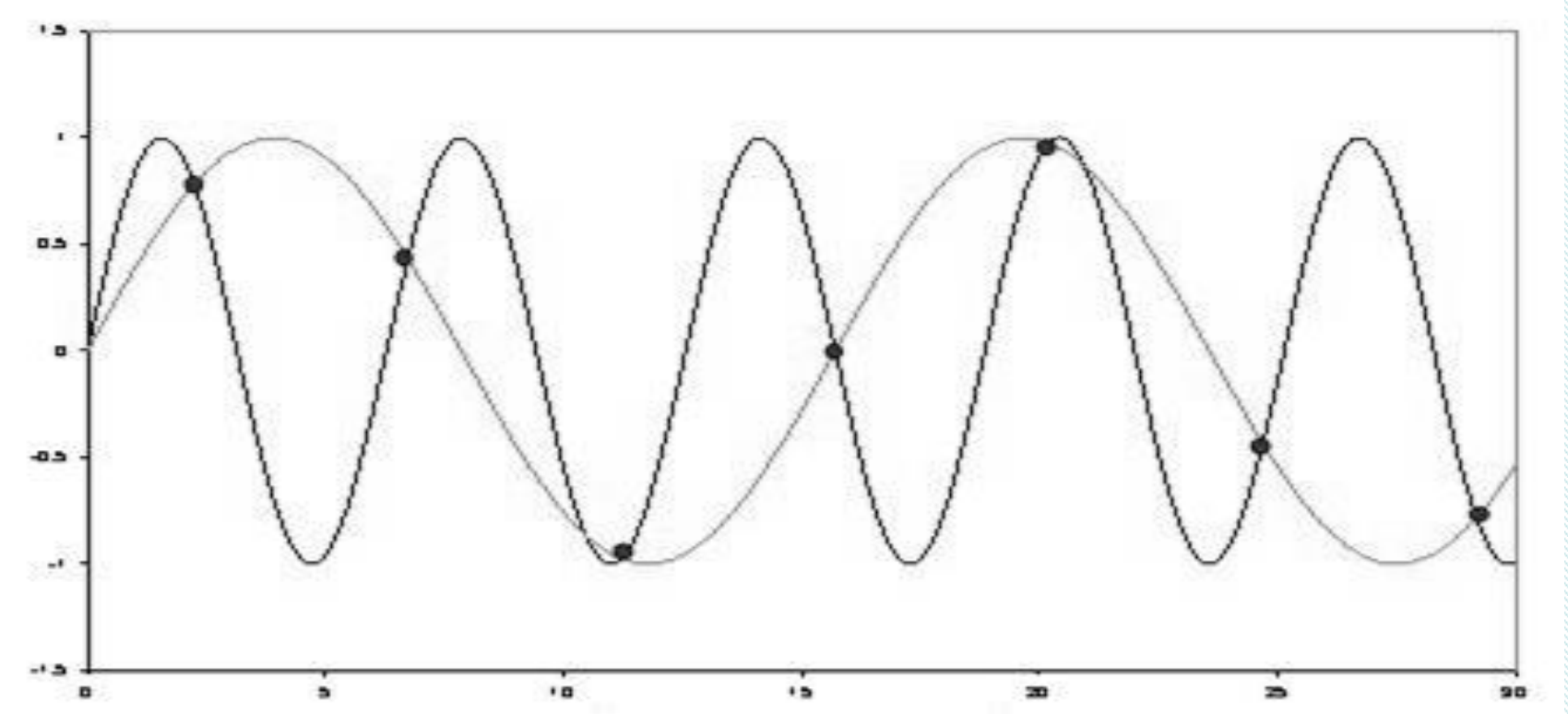
2.

3. Режим запоминания сигнала реализуется при однократном запуске АЦП. Весь буфер БОЗУ доступен для просмотра в произвольном масштабе (с растяжкой и сжатием – режим ZOOM, со смещением по времени).

4. Для наблюдения периодических сигналов используют повторяющийся режим развертки (refresh mode). Этот режим аналогичен автоколебательному или ждущему режимам аналогового осциллографа. В автоколебательном режиме запуска кадры изображения непрерывно строятся даже в отсутствие события запуска. В ждущем режиме кадр строится только при появлении сигнала или события запуска. В ЦО между событиями запуска на экране сохраняется предыдущий кадр изображения.
5. Режим эквивалентного времени (equivalent time mode) применяют для наблюдения коротких повторяющихся сигналов, когда частота дискретизации недостаточна. В режиме эквивалентного времени кадр строится на основе данных ***оцифровки нескольких копий сигнала***, что увеличивает эквивалентную частоту дискретизации и эквивалентную полосу пропускания .

Режимы *построения изображения* на экране ЦО

Частота дискретизации fд по теореме Котельникова связана с верхней граничной частотой спектра сигнала fв, форму которого можно восстановить без искажения (fд > 2fв). Реконструкция формы сигнала на экране происходит визуально, путем мысленного соединения ближайших точек.



При **малом** количестве отсчетов возможен эффект «наложения», когда глаз оператора конструирует ложное изображение (alias). .

Чтобы избежать эффекта наложения для точечного (dots) изображения, частота дискретизации должна быть в 10 – 20 раз выше частоты сигнала. В других случаях необходимо использовать режим интерполяции. В ЦО чаще применяют два метода – **линейную** и **синусоидальную** интерполяции.

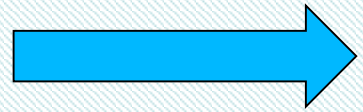
При линейной интерполяции добавляются точки, расположенные на прямой линии между отсчетами сигнала. При этом для получения качественного изображения достаточно выполнять условие $f_д > 10f_в$. Линейная интерполяция больше подходит к импульсным сигналам.

Для гладких сигналов используют синусоидальную интерполяцию типа “sin(x)/x”, которая позволяет получить приемлемое качество изображения уже при $f_д > (3 – 4)f_в$. Однако применение интерполяции снижает скорость вывода осциллограмм на экран.

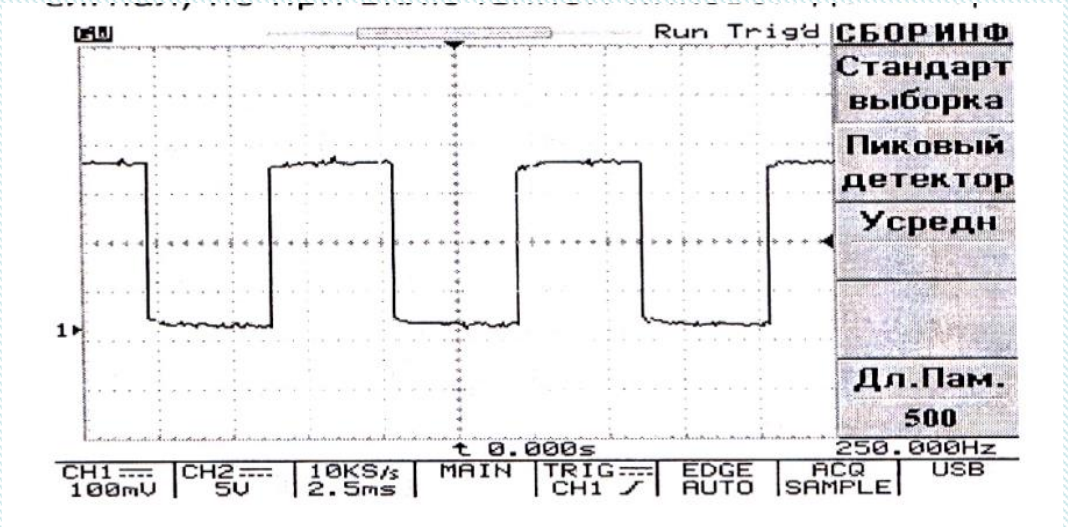
При **большом** количестве точек на каждую точку изображения приходится выборка отсчетов, обычно >1. При построении осциллограммы импользуют режим прореживания отсчетов (децимация).

В стандартном режиме децимации выводится на экран только одна точка из выборки (например, последняя).

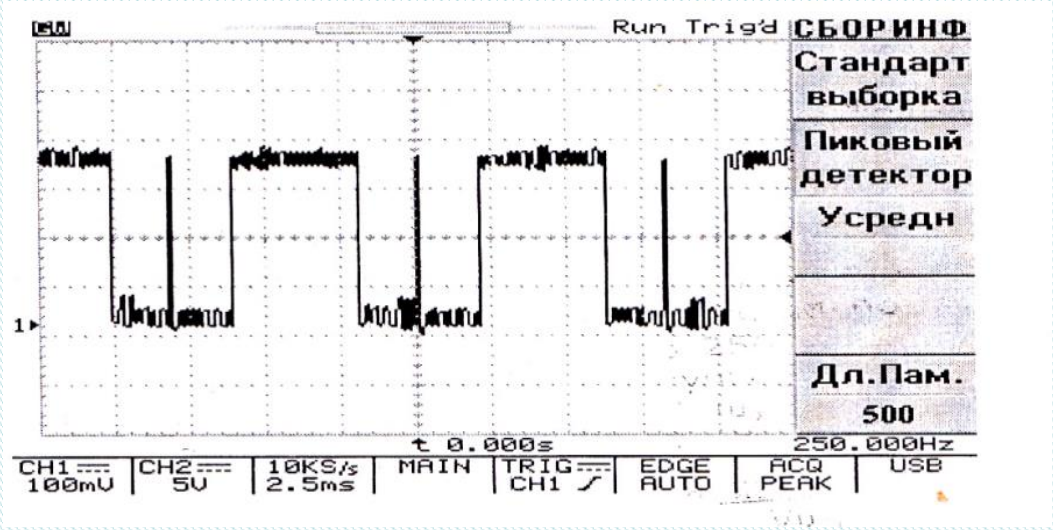
В режиме усреднения на экран выводится точка, представляющая собой среднее арифметическое отсчетов выборки. Этот режим позволяет снижать шумы квантования АЦП, шумы усилителя канала Y и пр., однако на экране не будут представлены мгновенные значения реального сигнала.



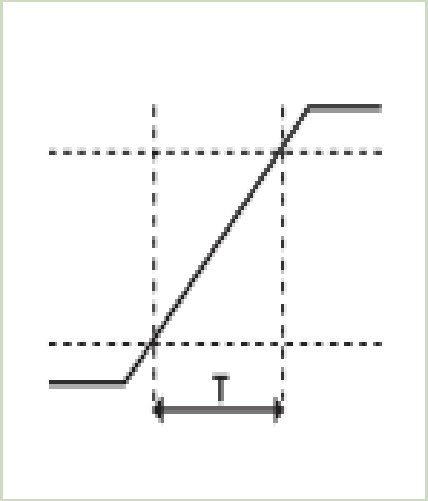
Осциллограмма сглаженного сигнала



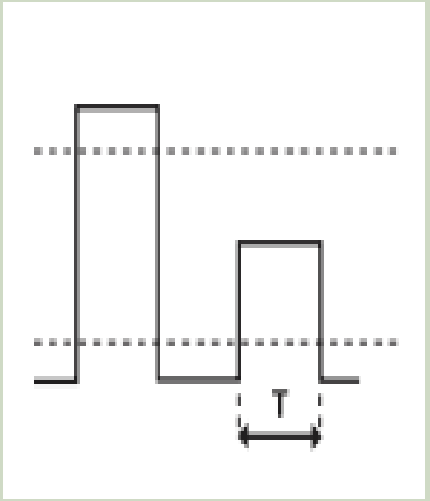
В режиме пик-детектора каждая нечетная точка строится по отсчету с максимальным значением в выборке, следующая (четная) – по отсчету с минимальным значением в выборке. Режим пик-детектора позволяет не пропустить короткие выбросы в сигнале



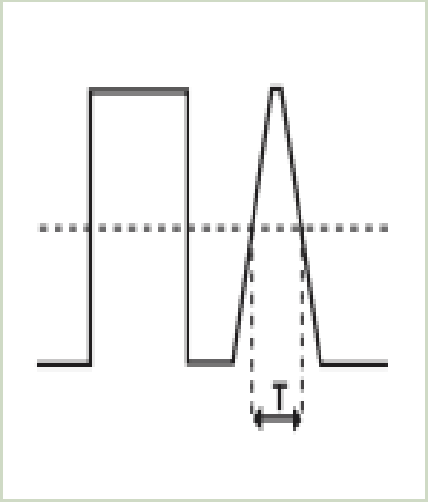
Основные виды запуска в цифровых осциллографах



Запуск по скорости нарастания напряжения. Импульсные сигналы с очень крутыми фронтами имеют в своем спектре высокий уровень высших гармоник, которые могут оказать негативное влияние на работу схемы. Этот режим запуска отличается от обычного запуска по фронту наличием дополнительного параметра – времени. Это позволяет выполнять запуск по фронту с крутизной больше или меньше заданной.



Запуск по поврежденному импульсу. Этот режим позволяет захватывать и исследовать импульсы, которые пересекают один пороговый уровень и, не пересекая второй пороговый уровень, вновь пересекают первый.

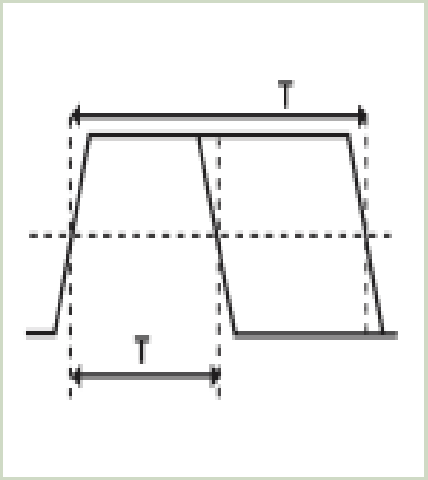


Запуск по глитчу. Этот режим позволяет осуществлять запуск по импульсам, длительность которых меньше или больше заданной. Такой запуск даёт возможность исследовать причины появления даже крайне редких глитчей и их воздействие на другие сигналы.

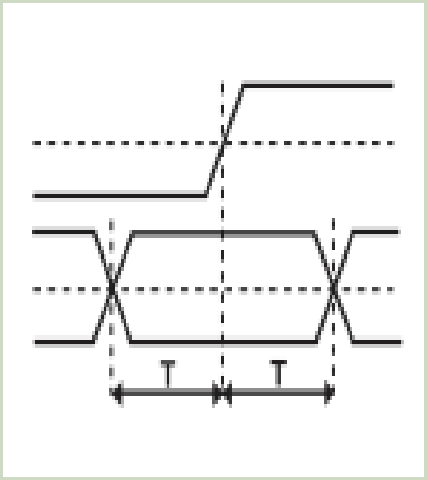


Запуск по логическому выражению. В этом режиме запуск происходит по логическому выражению комбинации определенных входных каналов, что особенно удобно при проверке функционирования цифровой логики.

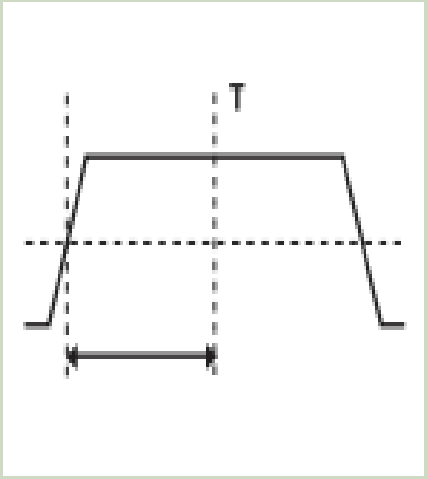
Основные виды запуска в цифровых осциллографах-2



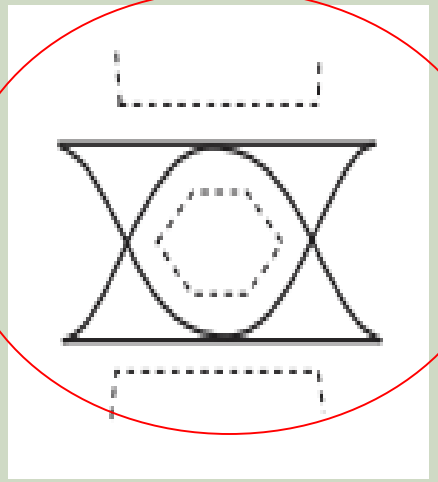
Запуск по длительности импульса. Этот режим позволяет осуществлять постоянный мониторинг сигналов и формировать сигнал запуска по первому же импульсу, длительность которого не соответствует заданным пределам.



Запуск по установке и удержанию. Только этот режим позволяет целенаправленно выявлять малейшие нарушения времени установки и времени удержания, которые очень трудно обнаружить при использовании любых других режимов запуска. Запуск по установке и удержанию существенно облегчает определение характеристик сигнала, касающихся временных соотношений и синхронизации между сигналом тактовой частоты и появлением данных.

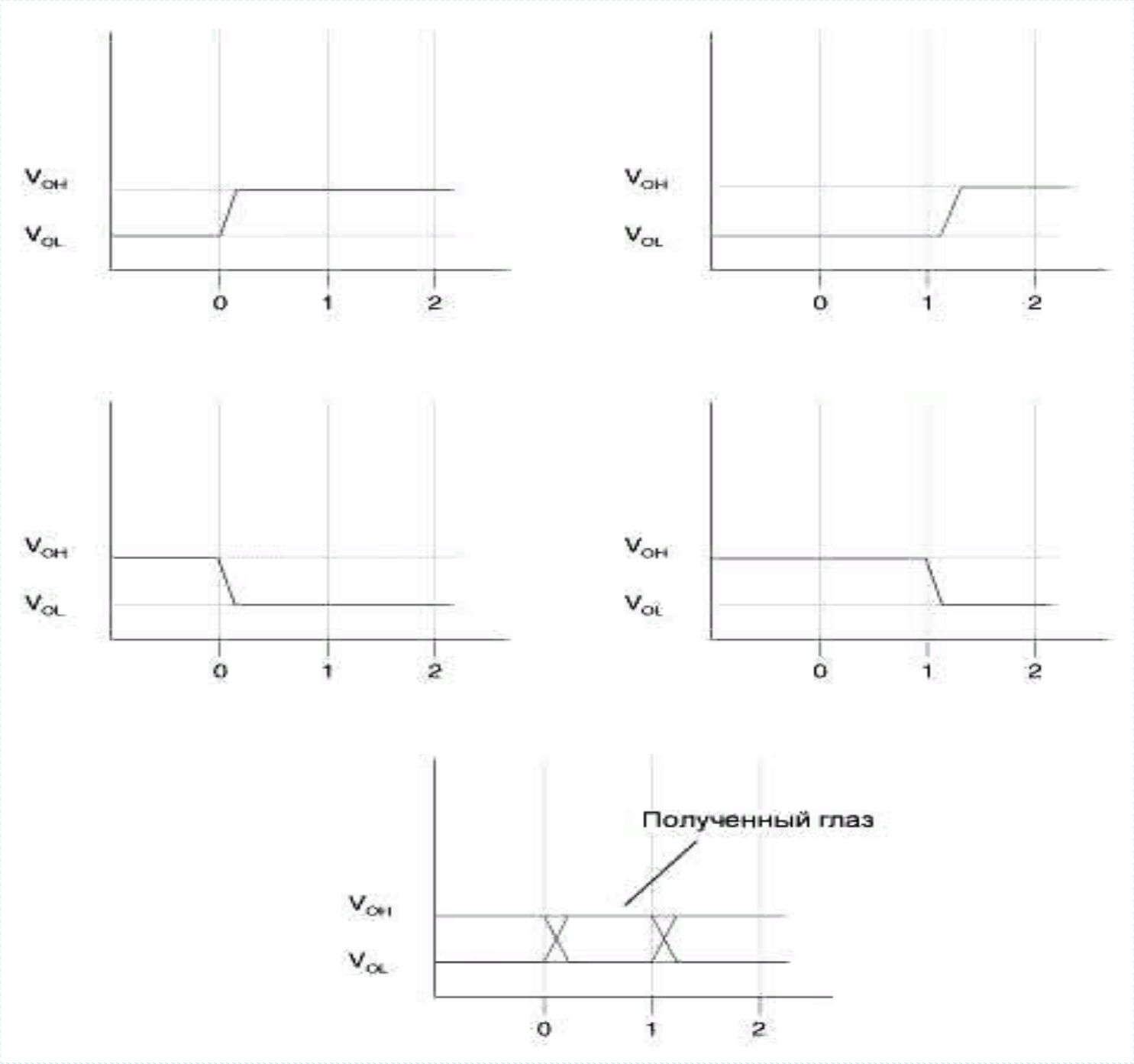


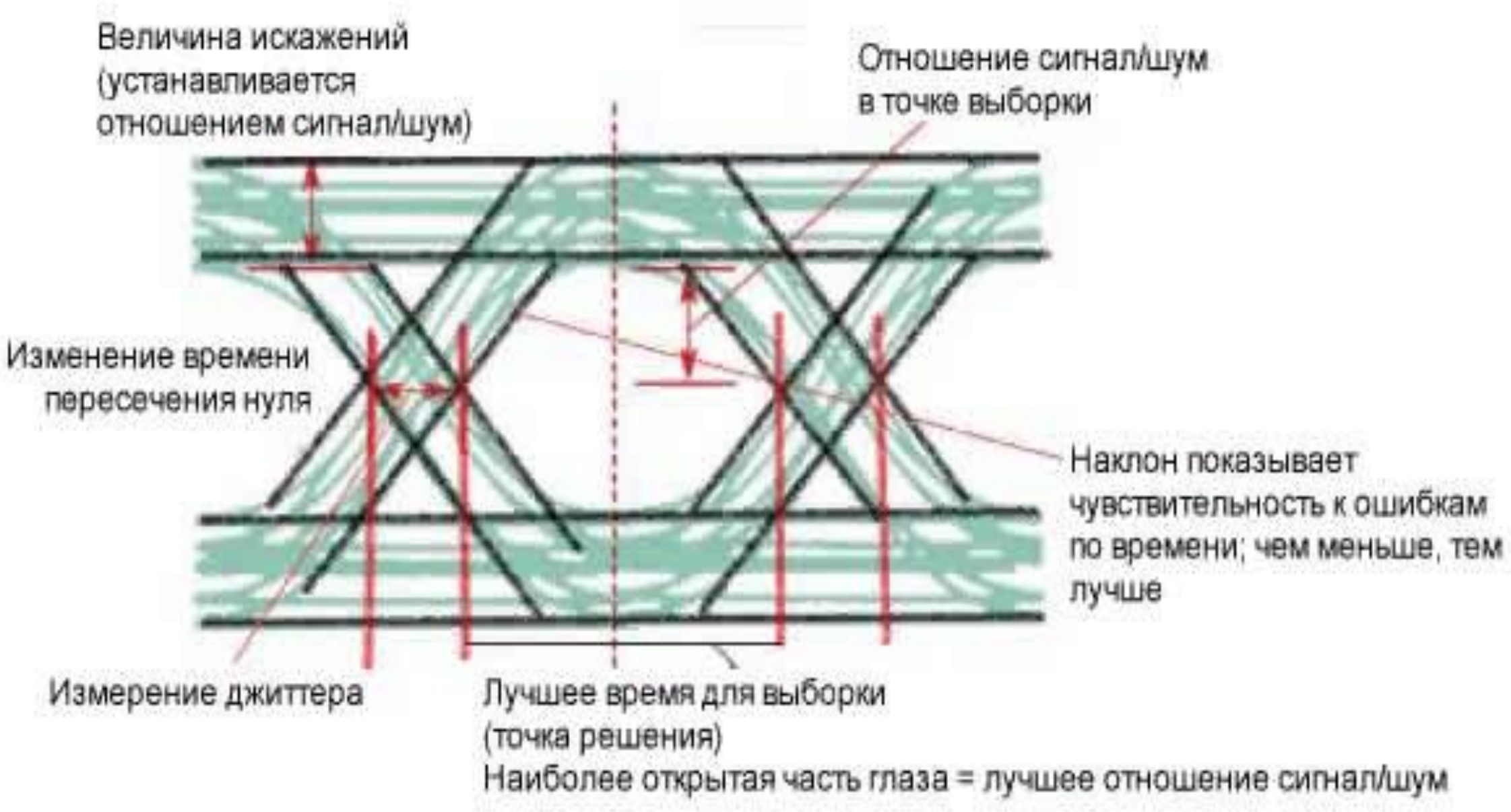
Запуск по таймауту. Этот режим позволяет выполнять запуск, не ожидая окончания импульса запуска, на основании задаваемой задержки.



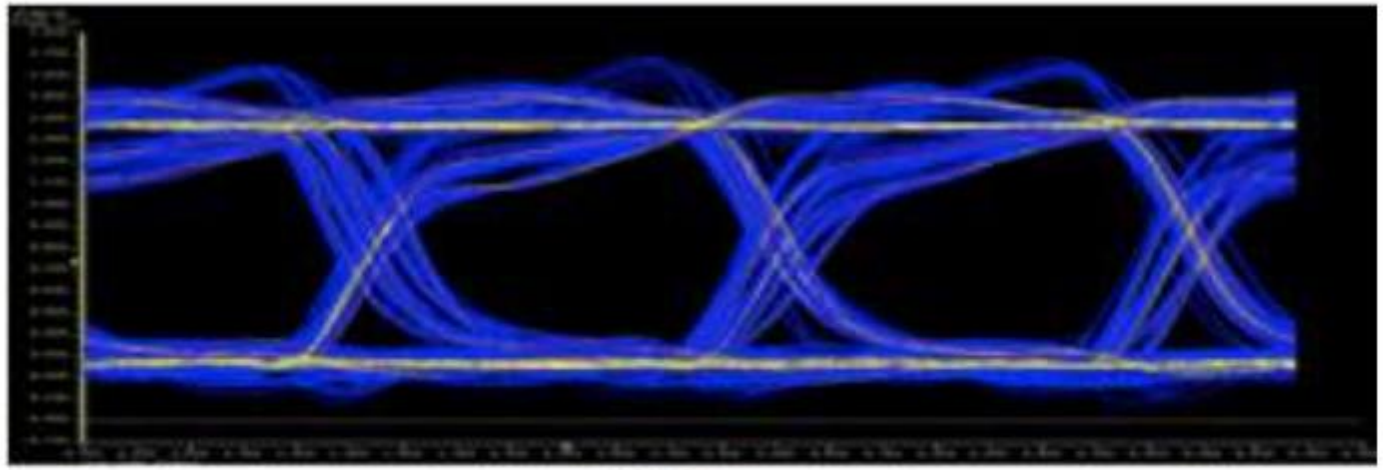
Запуск по коммуникационным сигналам. Этот режим является опциональным и присутствует лишь в специализированных осциллографах. Такой режим применяется при необходимости захвата различных телекоммуникационных сигналов, таких как AMI (кодирование с чередованием полярности элементов), CMI (кодирование с инверсией кодовых посылок), NRZ (кодирование без возврата к нулю).

Для каналов цифровой связи измеряют двухуровневые **глазковые диаграммы:** наложение кадров битовой последовательности данных на интервале не менее 3 тактов сигнала. На рисунке наложение битовых посылок 011, 001, 100 и 110 дают окончательную глазковую диаграмму.

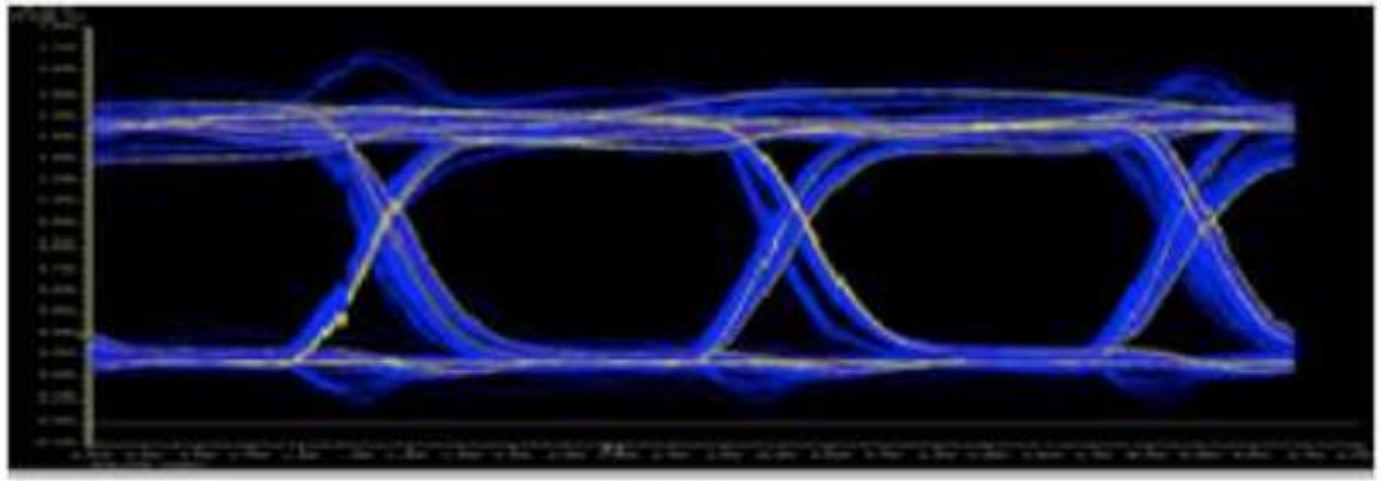



Величина искажений
(устанавливается
отношением сигнал/шум)
Отношение сигнал/шум
в точке выборки
Изменение времени
пересечения нуля
Наклон показывает
чувствительность к ошибкам
по времени; чем меньше, тем
лучше
Измерение джиттера
Лучшее время для выборки
(точка решения)
Наиболее открытая часть глаза = лучшее отношение сигнал/шум

Искажение формы «глаза» из-за рассогласования линии связи



(a)



(b)

(a) Неправильная нагрузка линии передачи заставляет глазковую диаграмму выглядеть «напряженной» (сдавленной).

(b) Правильная нагрузка «расслабляет» глаз.

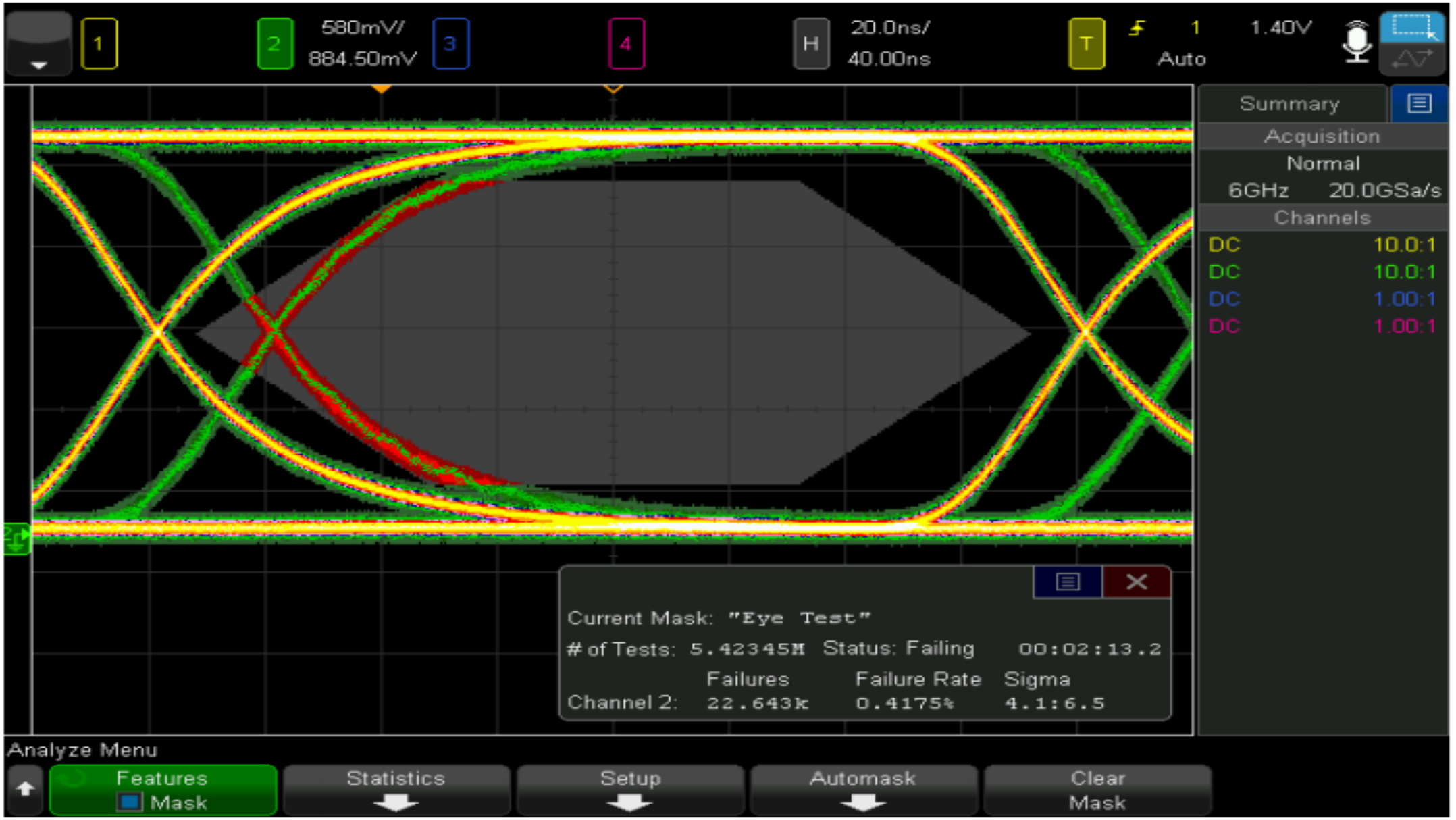
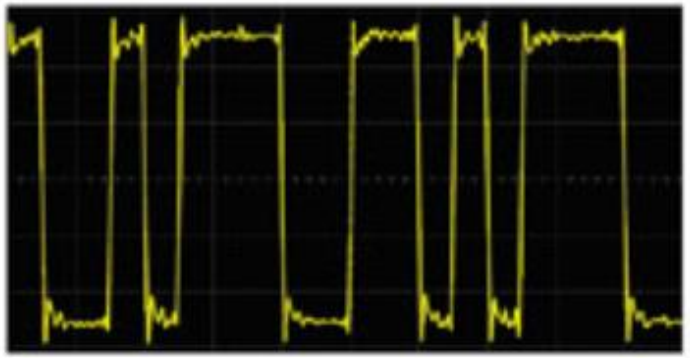
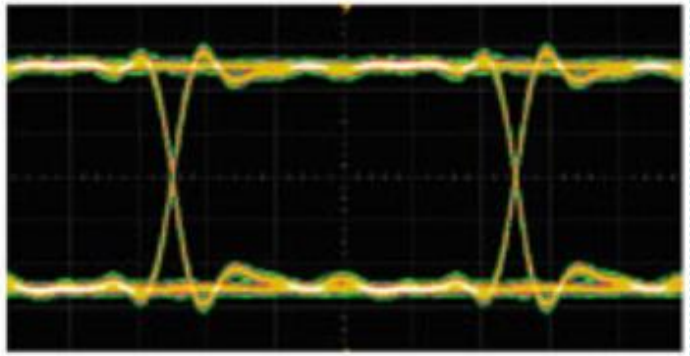


Рисунок 41. Тестирование по маске данных последовательной шины.

Требования к ширине полосы пропускания ЦО для правильного построения глазковой диаграммы



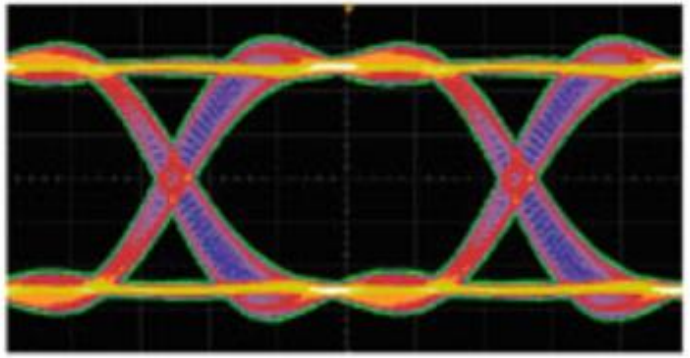
A. Поток последовательных данных, отображаемый на осциллографе с достаточно широкой полосой пропускания



B. Глазковая диаграмма потока последовательных данных, отображаемая на осциллографе с достаточно широкой полосой пропускания



C. Тот же самый поток последовательных данных, отображаемый на осциллографе с недостаточно широкой полосой пропускания

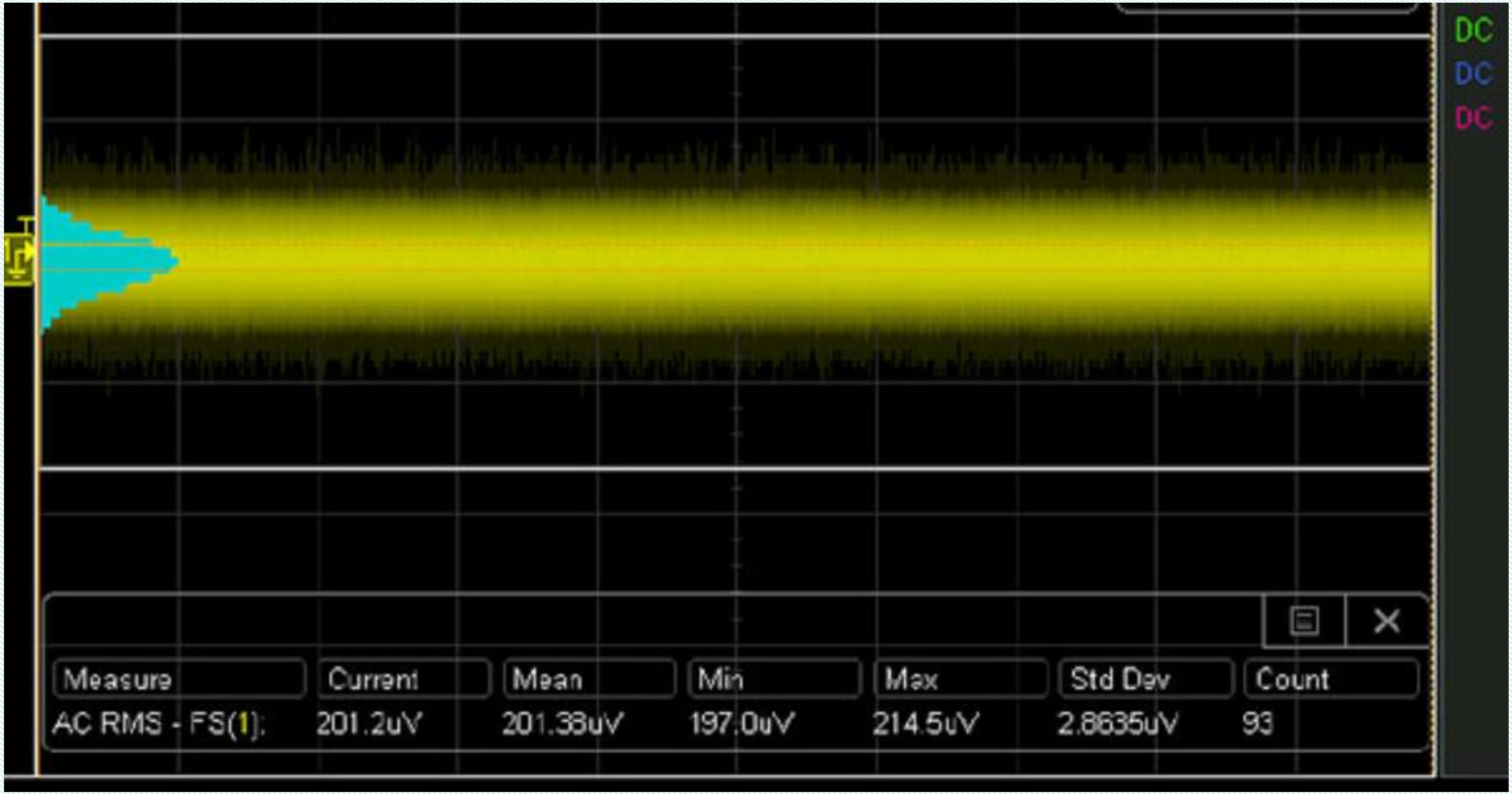


D. Глазковая диаграмма потока последовательных данных, отображаемая на осциллографе с недостаточно широкой полосой пропускания

Два осциллографа с одинаковой разрядностью АЦП, полосой и частотой дискретизации. Искажения сигнала на левой осциллограмме из-за негладких АЧХ и ФЧХ. На правой - осциллограф с корректирующими фильтрами, улучшающими форму частотной характеристики.





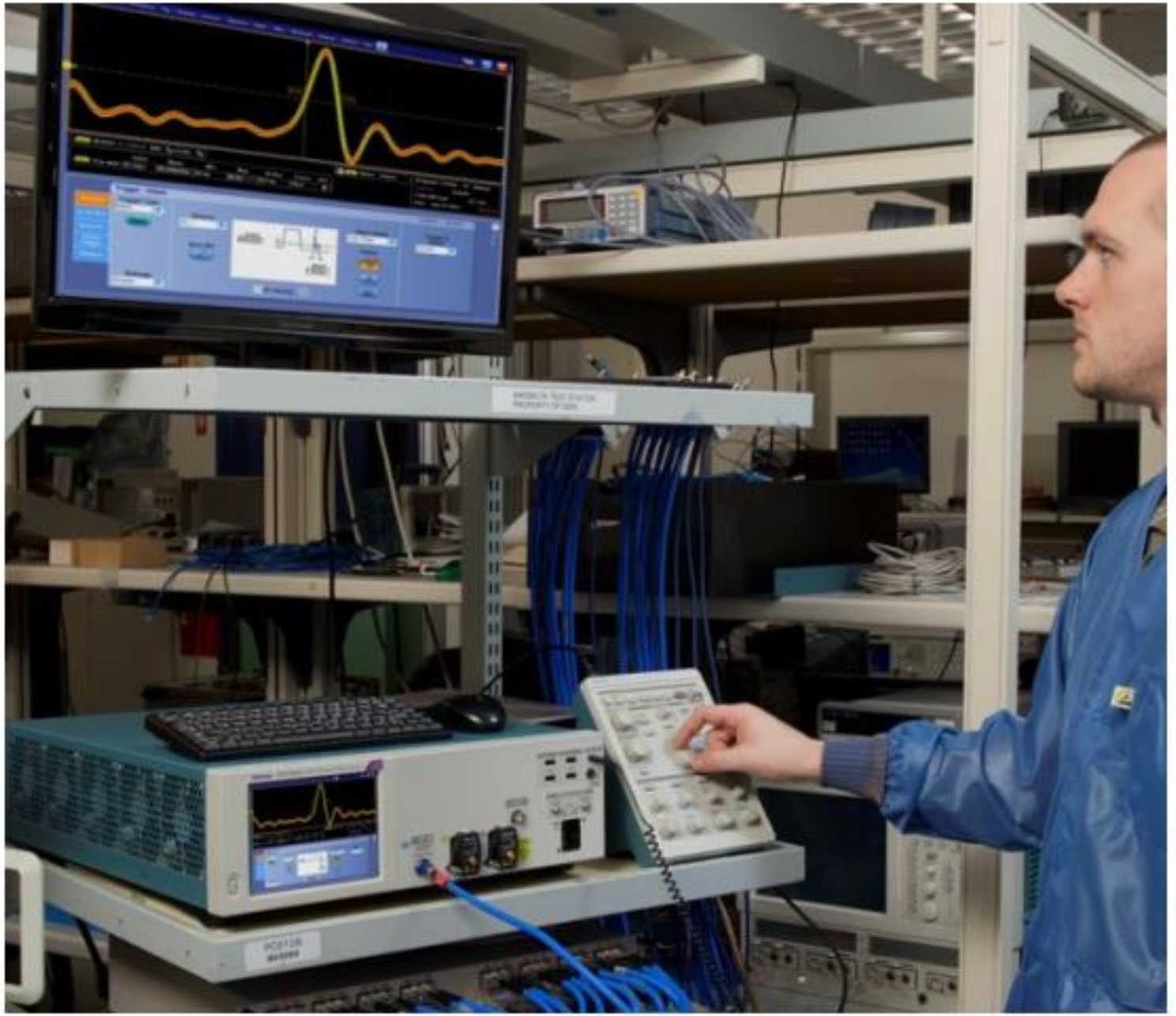


Функция построения вертикальной гистограммы для измерения параметров собственных шумов осциллографа в полосе 6 ГГц.

Tektronix DPO77002SX

Аналоговая полоса пропускания 70 ГГц, время нарастания <6 пс
Значения частоты дискретизации и разрешающей способности по времени
200 Гвыб./с, 5 пс/выб. в режиме реального времени





Осциллографы LeCroy : высокая достоверность на любой частоте

Мы создаем осциллографы которые:

- Аккуратно захватывают, измеряют и отображают сигнал
- Просмотр, отладка, подтверждение соответствия требованиям
- Интегрированная аппаратная и программная архитектура для снижения времени измерения



1.5 GHz – 6 GHz
Wave Pro 7 Zi-A



400 MHz – 4 GHz
Wave Runner Zi
Wave Runner HRO



200 MHz – 1 GHz
Wave Surfer Xs-B



100 MHz – 500 MHz
Wave Jet 300A



60 MHz – 300 MHz
Wave Ace

- Широкий набор средств измерений для отладки и анализа для получения полезной информации
- Расширяет возможности инженеров посредством собственного моделирования

Комплексность сигнала

Полоса пропускания⟶

Стробоскопические Осциллографы LeCroy : высокая достоверность на любой частоте

Комплексность сигнала



- Широкий набор средств измерений для отладки и анализа для получения полезной информации
- Расширяет возможности инженеров посредством собственного моделирования

WaveExpert

100 GHz

Полоса пропускания⟶



LeCroy

LabMaster 10 Zi 65 GHz

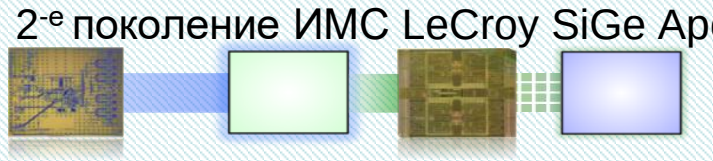
- 2 вх. канала с ПП 65 ГГц с использованием технологии DBI
  - Почти 2-х кратное увеличение ПП реального времени по сравнению с другими ЦЗО
    - Доступны модель с ПП 50/60 ГГц
  - Скорость выборки АЦП 160 Гвыб/с
  - Макс. память для анализа данных 1024 Мб/кан
- 4 аналоговых канала с ПП = 36 ГГц (на базе SiGe однокристальных АЦП)
  - Удвоение общего доступного числа каналов в системе
  - Увеличение полосы пропускания
    - ПП=36 ГГц против 32 / 33 ГГц у конкурентов
  - Частота дискретизации 80 ГГц по всем четырем входным каналам
  - Память 512 Мб/ кан для всех активных каналов (4 кан режим)

Поочередное использование полос пропускания

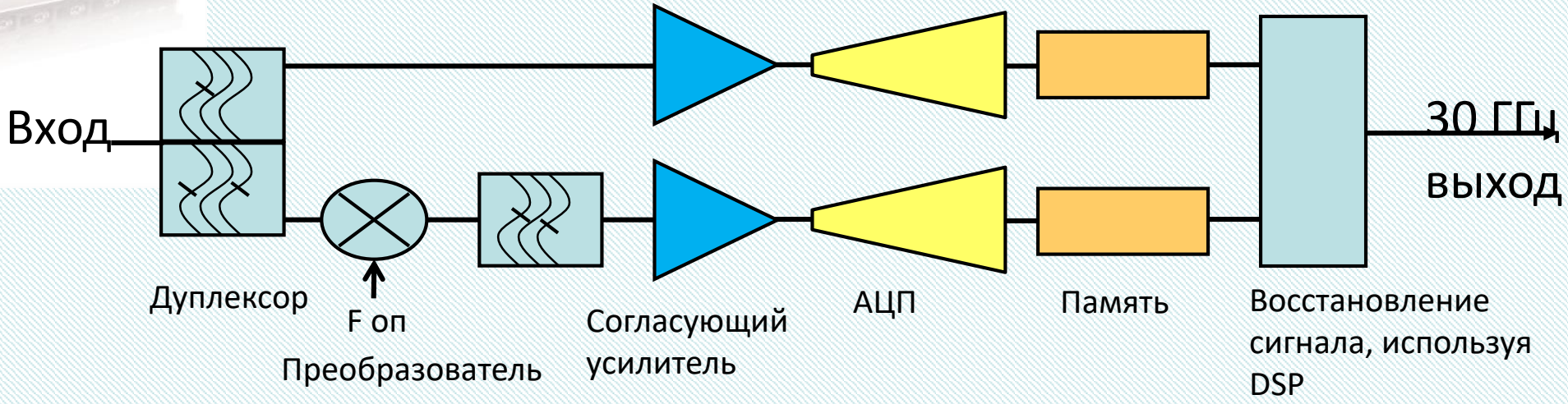
Новый метод достижения самой высокой полосы пропускания



SDA 830Zi-A

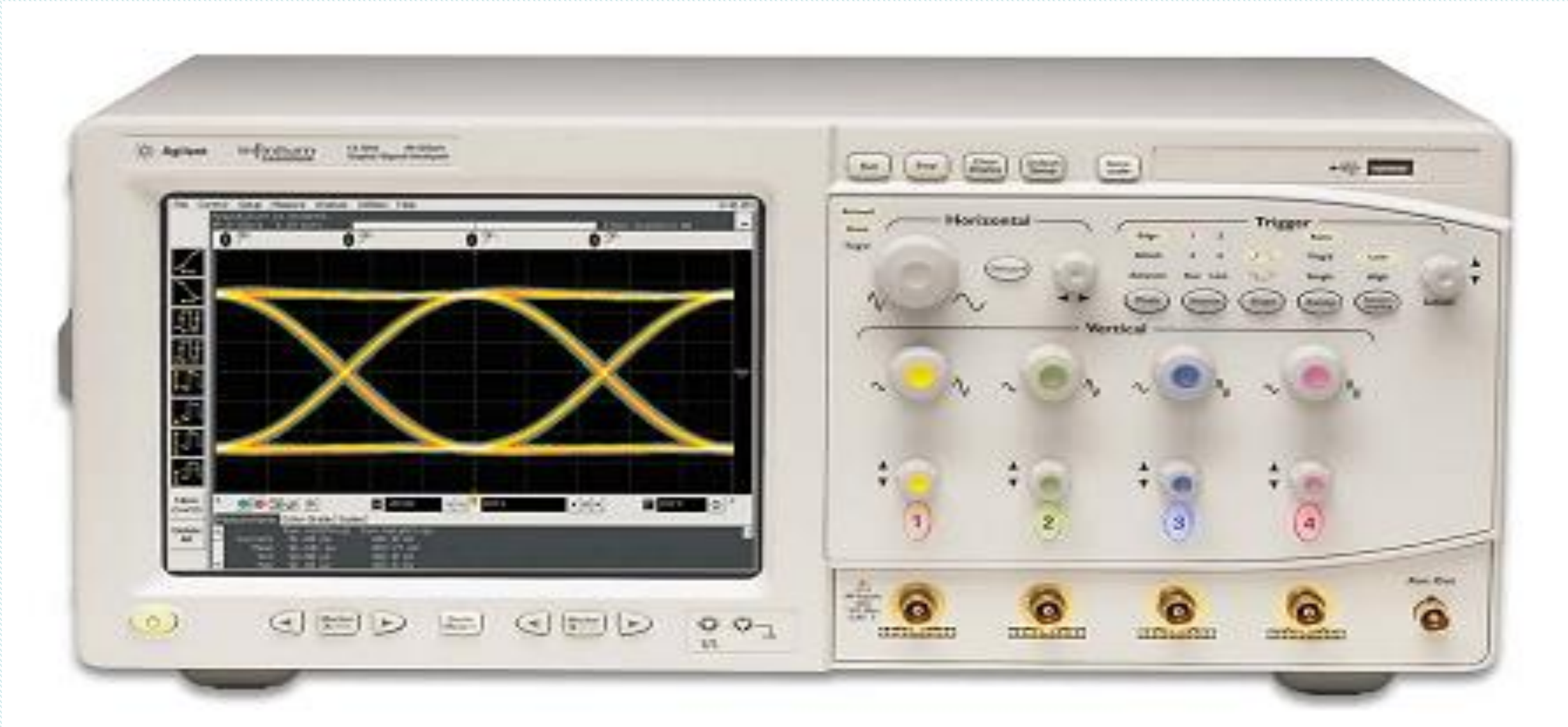


Обеспечивает ядро 5-го поколения DBI с полосой 25 – 30 ГГц

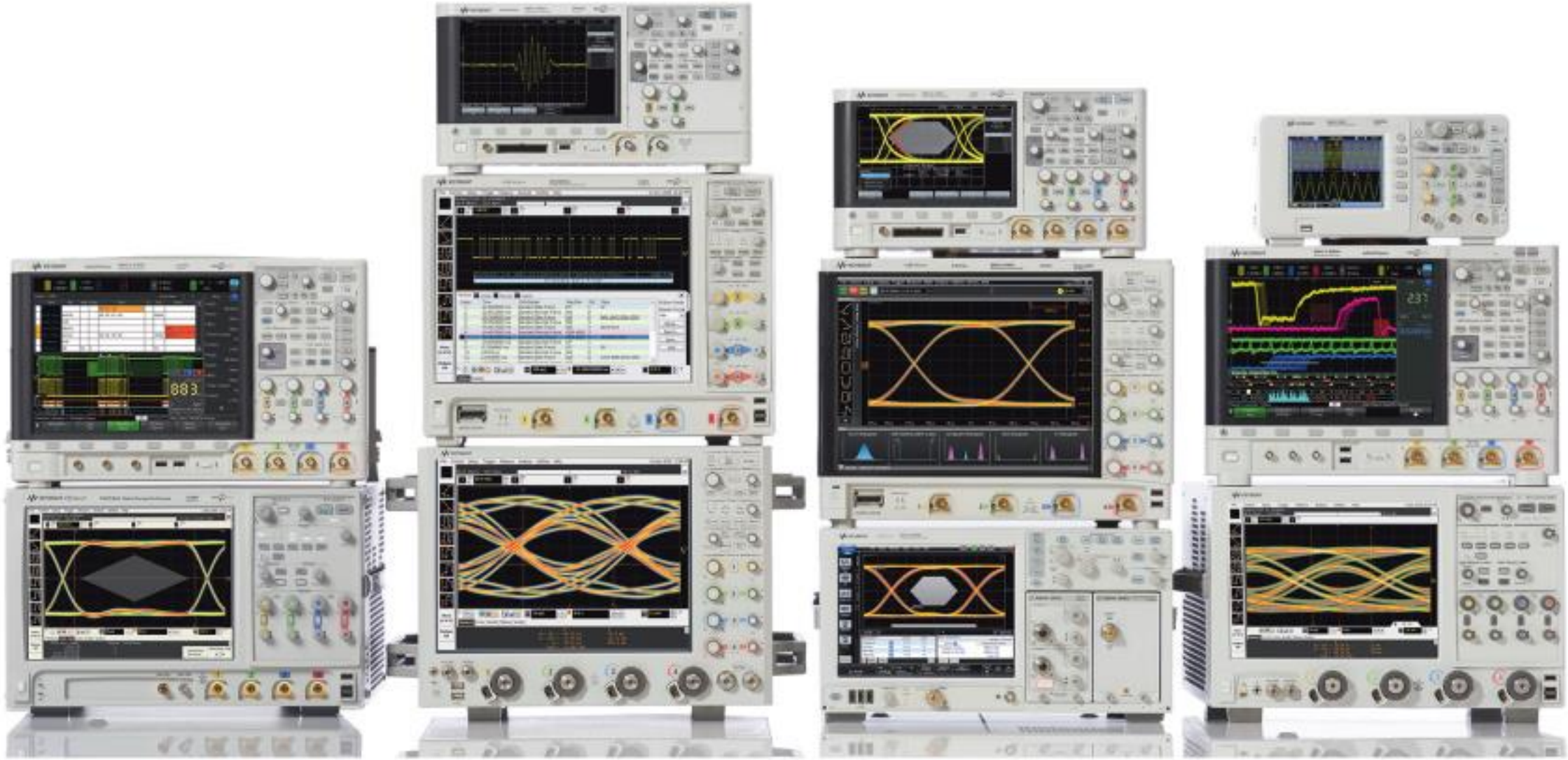


- 30 ГГц / 2 канала + 20 ГГц / 4 канала
- 5-ое поколение DBI в 830Zi-A имеет на 3 dB лучше шумы
- Возможность обновления полосы пропускания любого осциллографа 8 Zi-A до 45 ГГц

Agilent DSA80000B Digital Signal Analyzer
2-GHz to 13-GHz Oscilloscope



Keysight Technologies InfiniiVision 2000X 3000X 4000X 6000X-Series Oscilloscopes



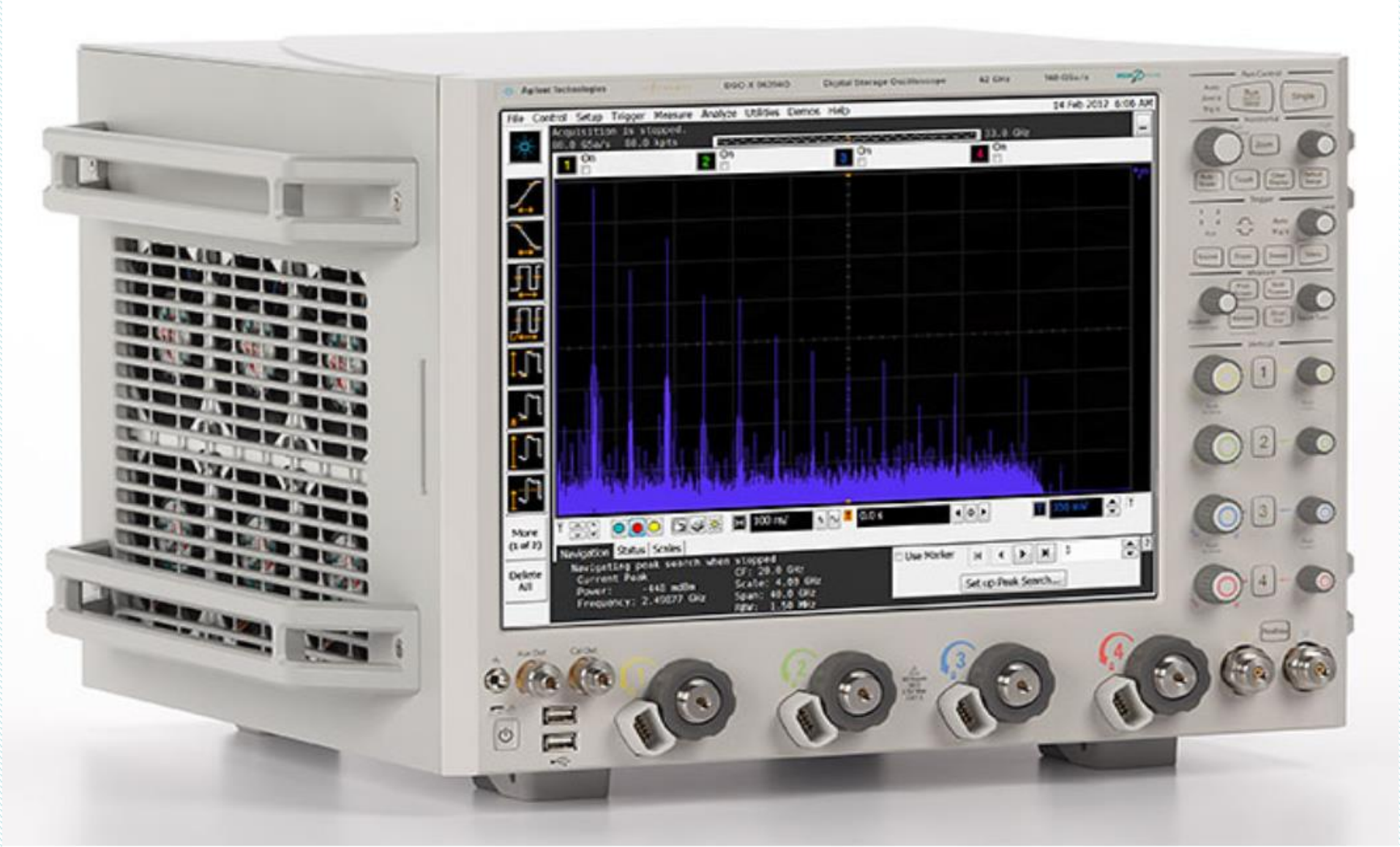


Рис. 2. Осциллографы серии Agilent Infiniium 90000Q с полосой пропускания до 63 ГГц с наименьшим в отрасли уровнем шума и джиттера и с самой глубокой памятью

Пробники

The Industry's First 30 GHz Probing System
InfiniiMax III probe amp/probe head architecture

Probe Amplifier



Probe amps – 16 GHz, 20 GHz, 25 GHz, 30 GHz

Performance verification and de-skew fixture



Probe Heads

30 GHz Browser with LED Headlight



ZIF probe head



28 GHz ZIF probe tips

16 GHz solder-in probe head



28 GHz 2.92mm/3.5mm/SMA probe head



Probe Adapters

Sampling scope adapter



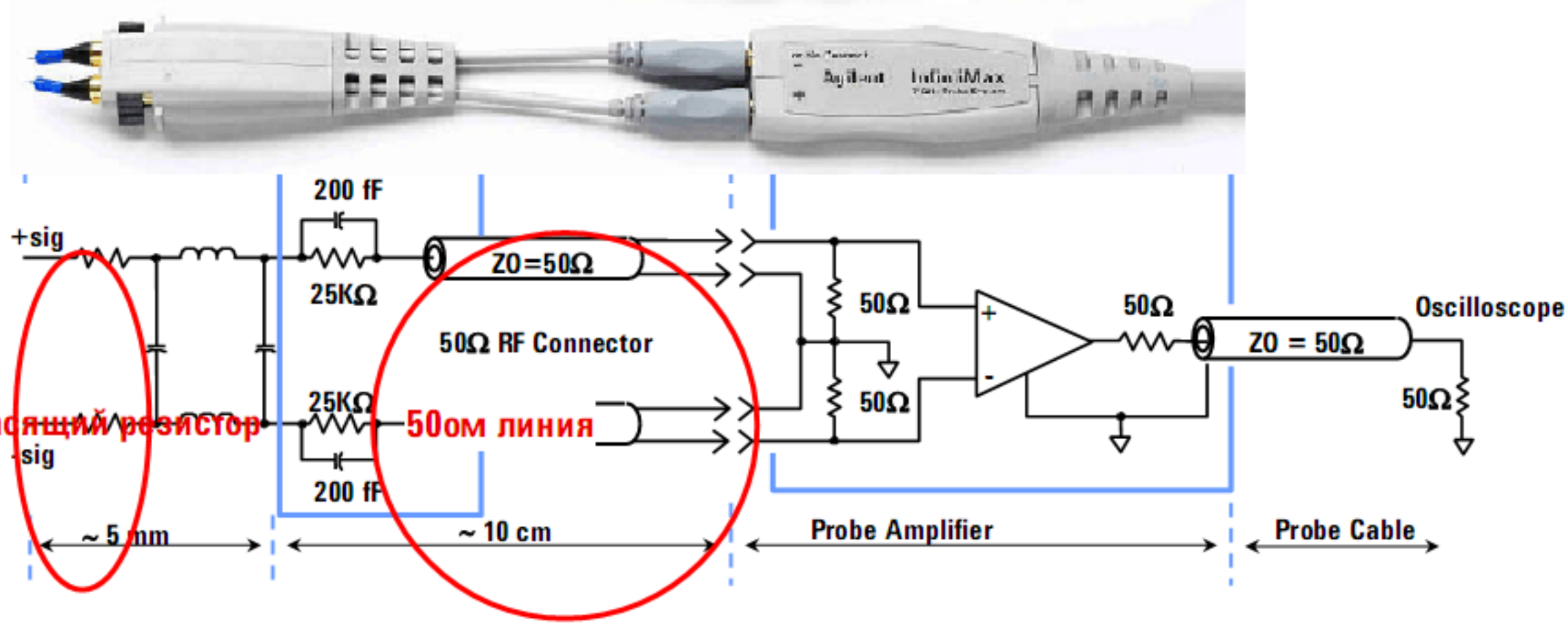
High impedance probe adapter



Precision BNC 50 ohm adapter
adapter



Agilent: Активные пробники InfiniiMax I и II



Верхняя граница полосы пропускания от 1.5 до 13 ГГц (-3dB), изменяемое расстояние между контактами дифференциального пробника

Стробоскопический осциллограф Infiniium DCA-X 86100D



FemtoScope 1000/2000/3000



5 or 16 GHz bandwidth
4, 2 or 1 channels
500 MSa/s RT частота дискретизации, 12-битный АЦП, глубина памяти 250 кслов

Производитель **: ELTESTA** (Вильнюс, Литва) , основан в 1993 на базе Вильнюсского завода радиоизмерительных приборов (ВЗРИП И НИИ РИП (НИИ 555).
The name of company was derived of two words – ELECTRONICS and TESTING, i.e. ELTESTA.

Линейка цифровых осциллографов АКИП на основе СВЧ осциллографов ELTESTA

- *АКИП-4133/1А и АКИП-4133/2А – полоса пропускания 5 ГГц, время нарастания 70 пс*
- *АКИП-4133/3А и АКИП-4133/4А – полоса пропускания 16 ГГц, время нарастания 21,9 пс*



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Факультет радиотехники и телекоммуникаций

Кафедра Теоретических основ радиотехники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

http://kepstr.eltech.ru/tor/mt

А.А. Данилин

Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ» (2 редакция)

Анализаторы спектра СВЧ диапазона

Санкт-Петербург
2025 г.

Спектральный анализ СВЧ сигналов

Спектральная функция сигнала u(t) (*спектральная плотность*) ->

прямое преобразование Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt$$

Измерять можно только *текущий частотный спектр*

$$S(\omega, \mathrm{t}) = \int_{-\infty}^{t} u(t) e^{-i\omega t} dt$$

Модуль - *амплитудная спектральная функция* или ***амплитудный спектр сигнала.***

Для периодических сигналов используют спектральное представление в виде *ряда Фурье:*

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\frac{2\pi}{T}t + \varphi_n) \qquad u(t \pm kT) = u(t),\ k = 0,1,2,3\ldots$$

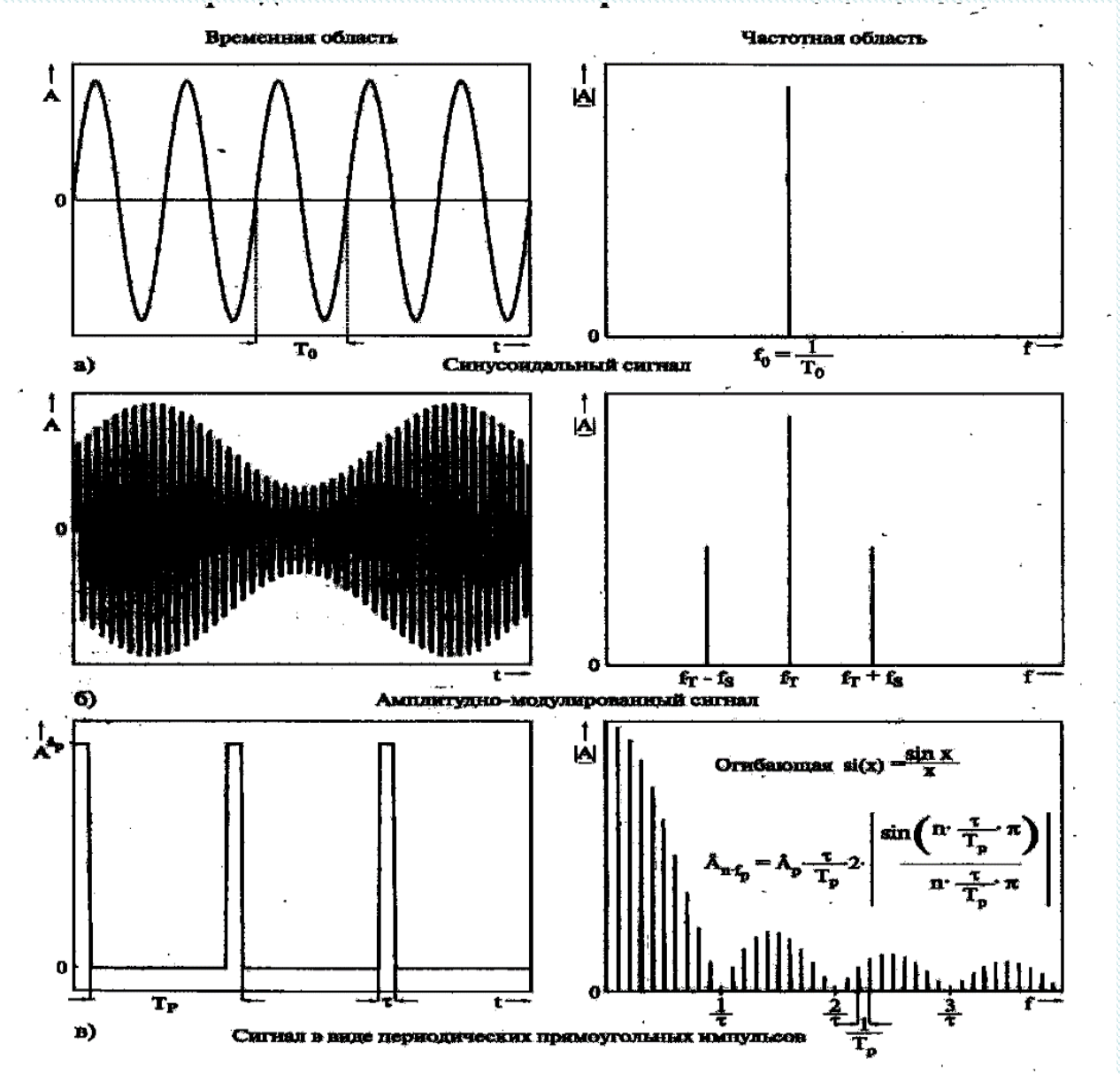
Ряд представляет собой совокупность гармонических колебаний с кратными частотами. Амплитуды U_n и начальные фазы φ_n представляют собой ***амплитудный*** и ***фазовый*** спектры. U_0 - постоянная составляющая.

Шумовые и случайные сигналы характеризуются *спектральной плотностью мощности (энергетический спектр)* :

$$W(\omega) = \lim_{T \to \infty} \frac{|S(\omega, T)|^2}{T}$$

$S(\omega,T)$ – спектральная плотность реализации случайного процесса на интервале [-T/2,T/2]..

Графическое представление спектров периодических сигналов



Синусоидальный (тональный) сигнал

Радиосигнал с тональной амплитудной модуляцией (АМ)

Прямоугольный видеоимпульс с большой скважностью

Основные задачи анализа спектров сигналов СВЧ

Обычно ограничиваются измерением амплитудных спектров (***скалярные спектроанализаторы)***. С их помощью решают следующие измерительные задачи:

- измерение амплитуд и частот гармонических составляющих периодических сигналов (одного или нескольких одновременно)
- измерение амплитудной спектральной функции непериодических сигналов (одиночных или неповторяющихся)
- измерение спектральной плотности мощности случайных сигналов (шумовых и информационных).

Приборы для исследования *комплексных* спектральных функций : ***векторные анализаторы сигналов.***

Классификация анализаторов спектральных характеристик сигналов

Анализаторы спектра:

Универсальный измеритель частотных характеристик сигнала, выполняющий:

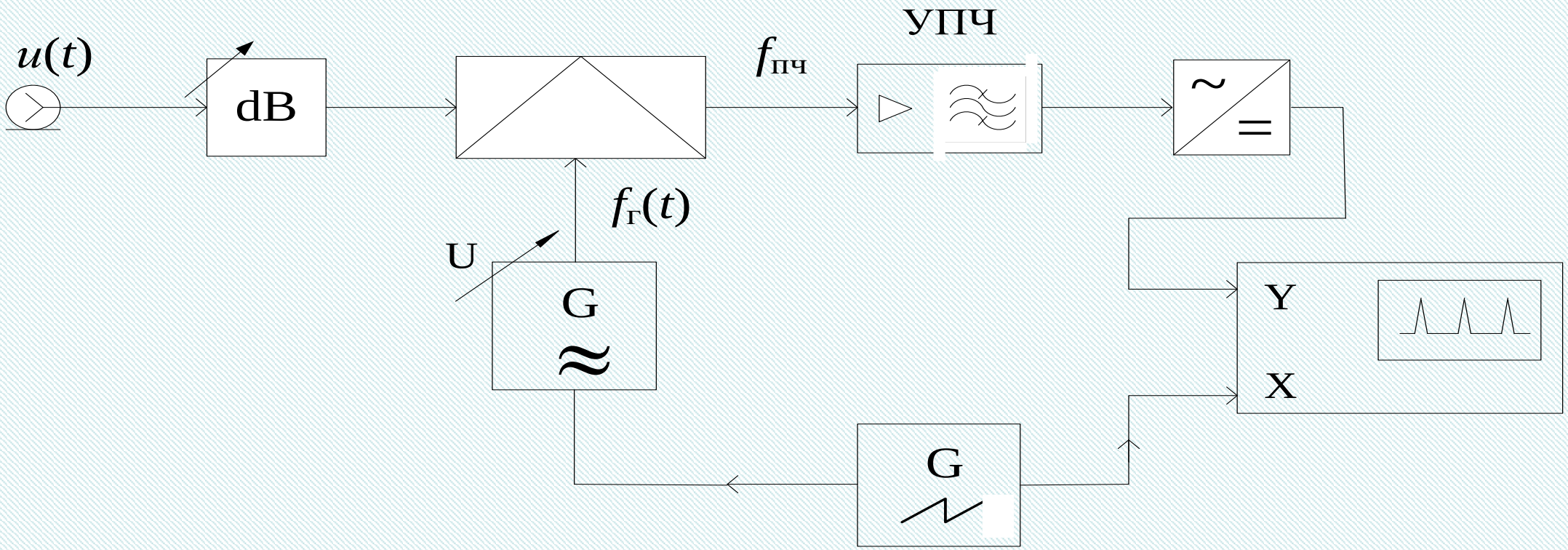
- Визуализацию спектра сигнала с большой скоростью
- Абсолютное и относительное измерение частоты
- Абсолютное и относительное измерение уровня гармоник
- Измерение уровня шума
- Измерение комбинационных, побочных составляющих и продуктов искажений
- Измерение параметров АМ, ЧМ, импульсно-модулированных ВЧ сигналов и сигналов с цифровой модуляцией
- Измерение параметров электромагнитной совместимости (ЭМС)

Анализаторы сигналов:

Высокочувствительный супергетеродинный приемник со свиппируемой частотой настройки. Может работать как:

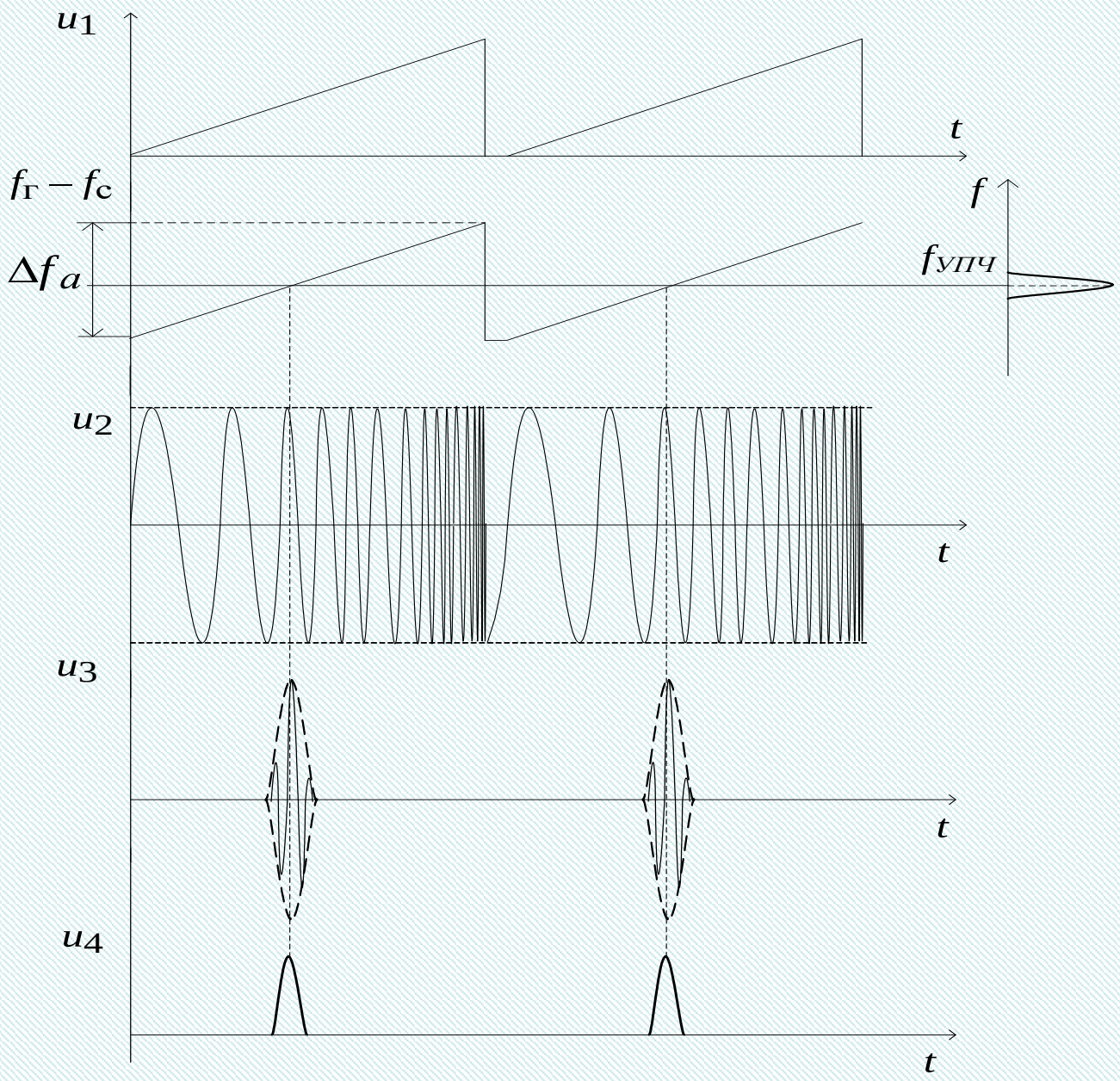
- селективный пиковый вольтметр, откалиброванный в среднеквадратических значениях (СКЗ) уровня синусоидального сигнала. Большой динамический диапазон
- **векторный анализатор спектра**. Анализатор отображает индивидуальные частотные компоненты сигнала в диапазоне от нескольких микрогерц до десятков ГГц. Декодирование сигналов со сложной модуляцией
- измеритель амплитуд, частот и фаз каждой спектральной компоненты.. Диагностика электромагнитных помех. Мониторинг использования частотного диапазона, обнаружение посторонних сигналов

Упрощенная структурная схема последовательного анализатора спектра аналогового типа



$$f_{г}(t) = f_{г\,min} + (f_{г\,max} - f_{г\,min}) \cdot \frac{u_{р}(t)}{U_{р}}$$

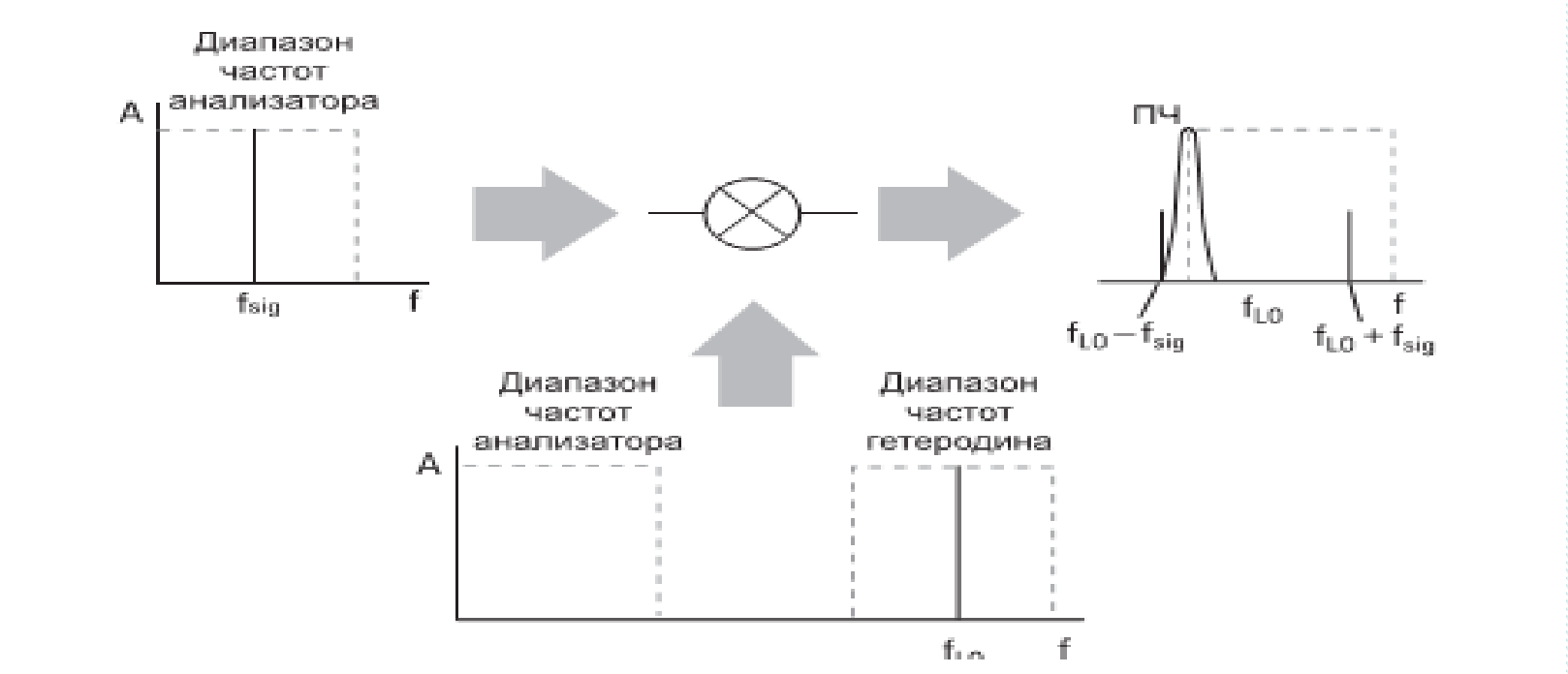
$$f_{г}(t_0) - f_{с} = f_{ПЧ}$$



Осциллограммы сигналов :

- - напряжение развертки
- - закон изменения частоты гетеродина и выходного сигнала смесителя
- - осциллограмма выходного сигнала смесителя
- - выходной сигнала узкополосного фильтра УПЧ
- - огибающая (сигнал с выхода детектора)

Как правильно выбрать расположение частот сигнала, гетеродина и ПЧ?



$$f_{гет} - f_c = f_{ПЧ}$$

1. Частота ПЧ не должна не попадать в полосу частот сигнала, т.к. при этом входной сигнал просачивается на выход смесителя при любой частоте гетеродина («сквозное прохождение ПЧ»)

$$f_{гет} > f_{ПЧ}$$

2. При равенстве $f_{гет} \approx f_{ПЧ}$ внизу полосы анализа (малая частота сигнала) формируется *нулевой* отклик АС («сквозное гетеродинное просачивание»). Надо, чтобы

$$f_{гет} > f_{ПЧ} > f_{c\,max}$$

Типовое расположение 1 ПЧ и сигнала 1

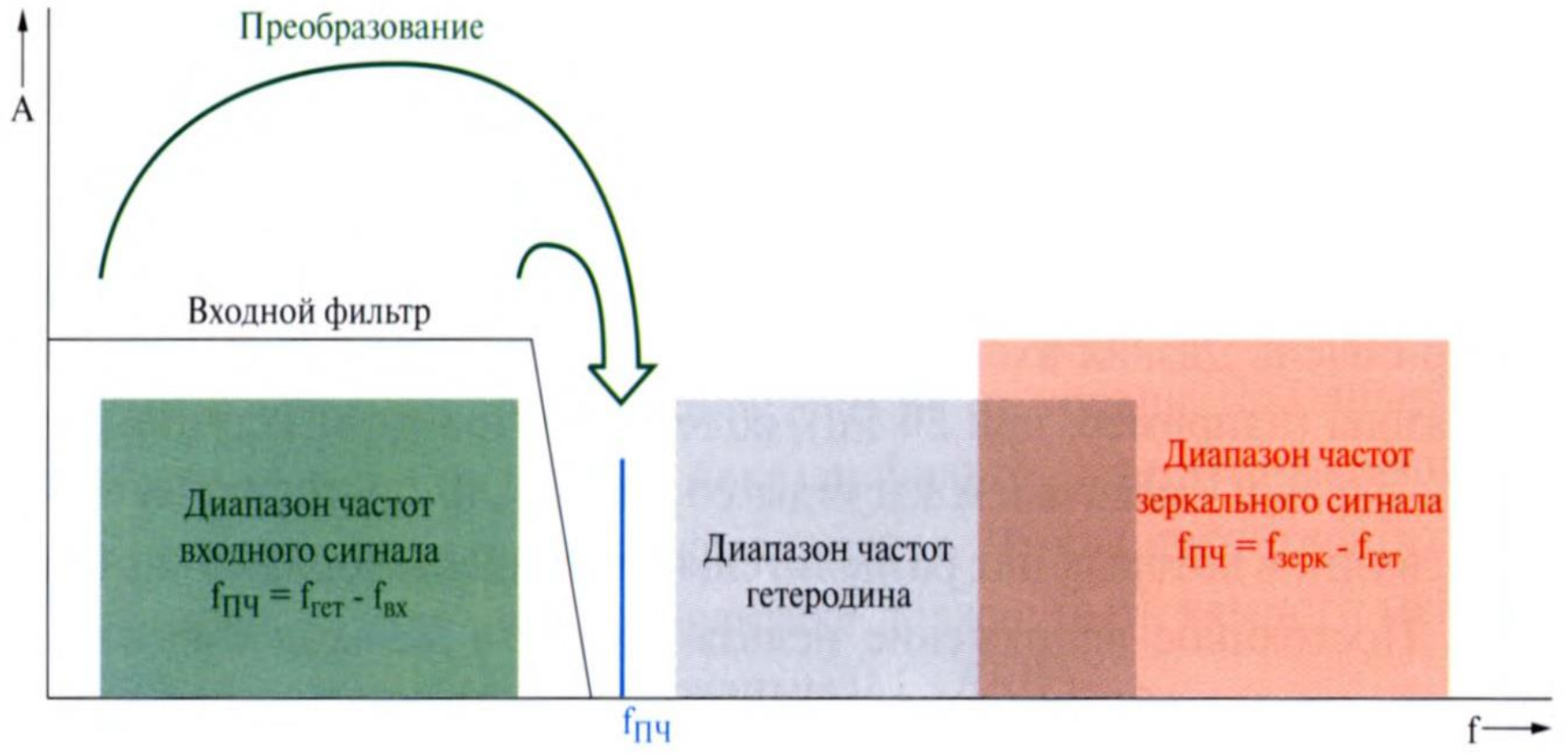
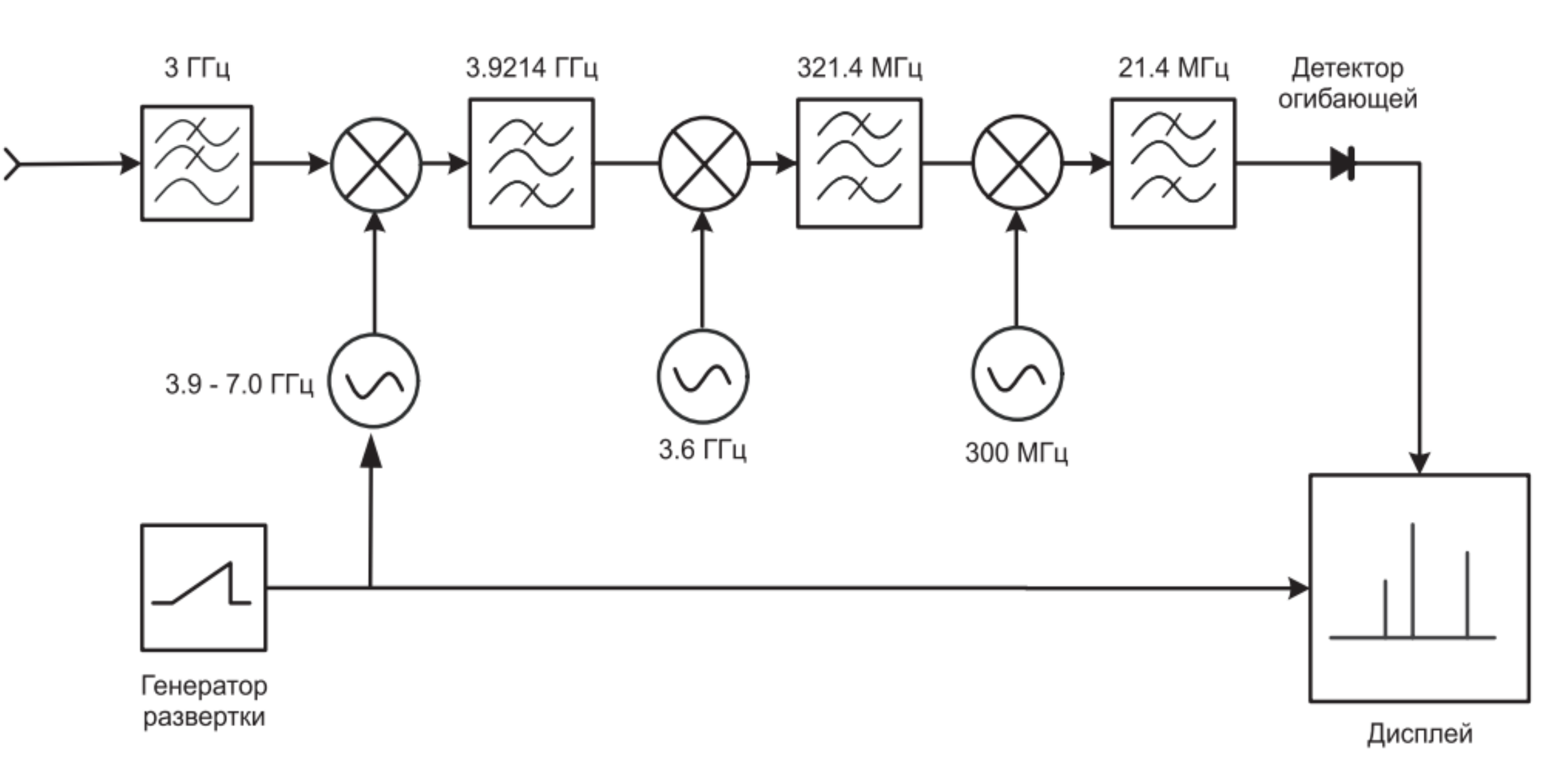


Рис. 4.4. *Принцип высокой промежуточной частоты*

Радиотракт последовательного аналогового анализатора спектра с тройным преобразованием частоты



Расширение диапазона вверх - «внутреннее гармоническое смешение»

Для верхнего поддиапазона выбрана ПЧ ниже (например, равная второй ПЧ основной схемы 321.4 МГц). Для низкой частоты ПЧ подавление зеркального канала осуществляется преселектором с электронной перестройкой.

AC PSA используют вторую гармонику и нижнюю боковую полосу частот (N=2-) для диапазона до 13.2 ГГц, и четвертую (N=4-) для диапазона до 26.5 ГГц.

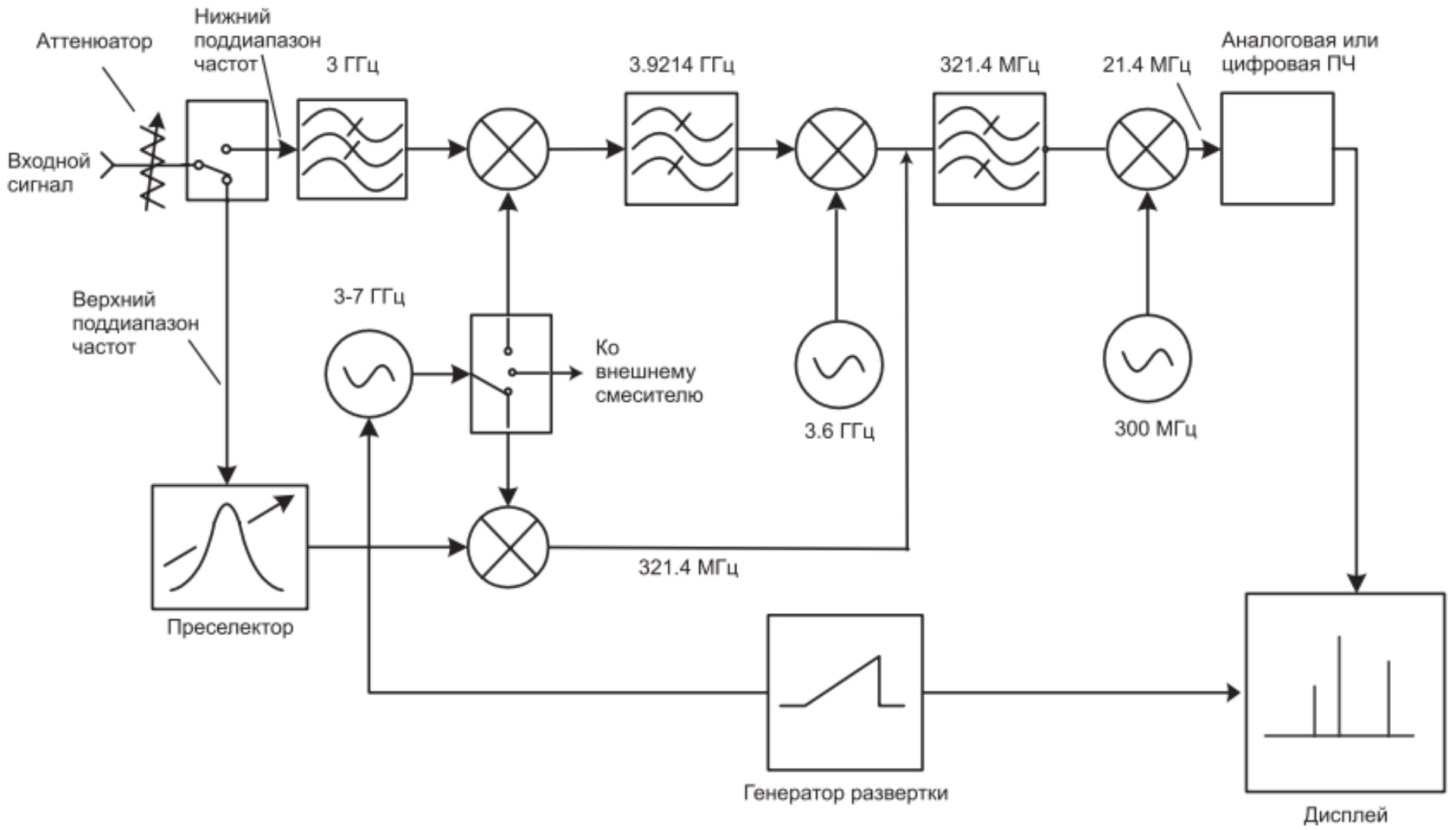
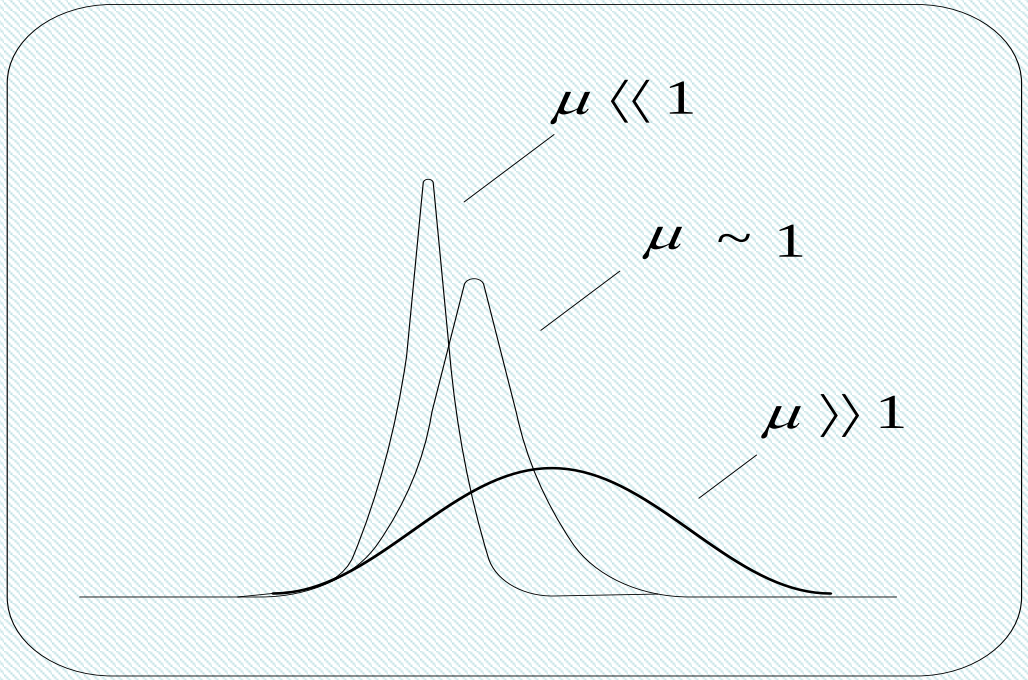


Рисунок 7-1. Схема с переключением между нижним и верхним поддиапазонами

Условия неискаженного воспроизведения спектрограммы

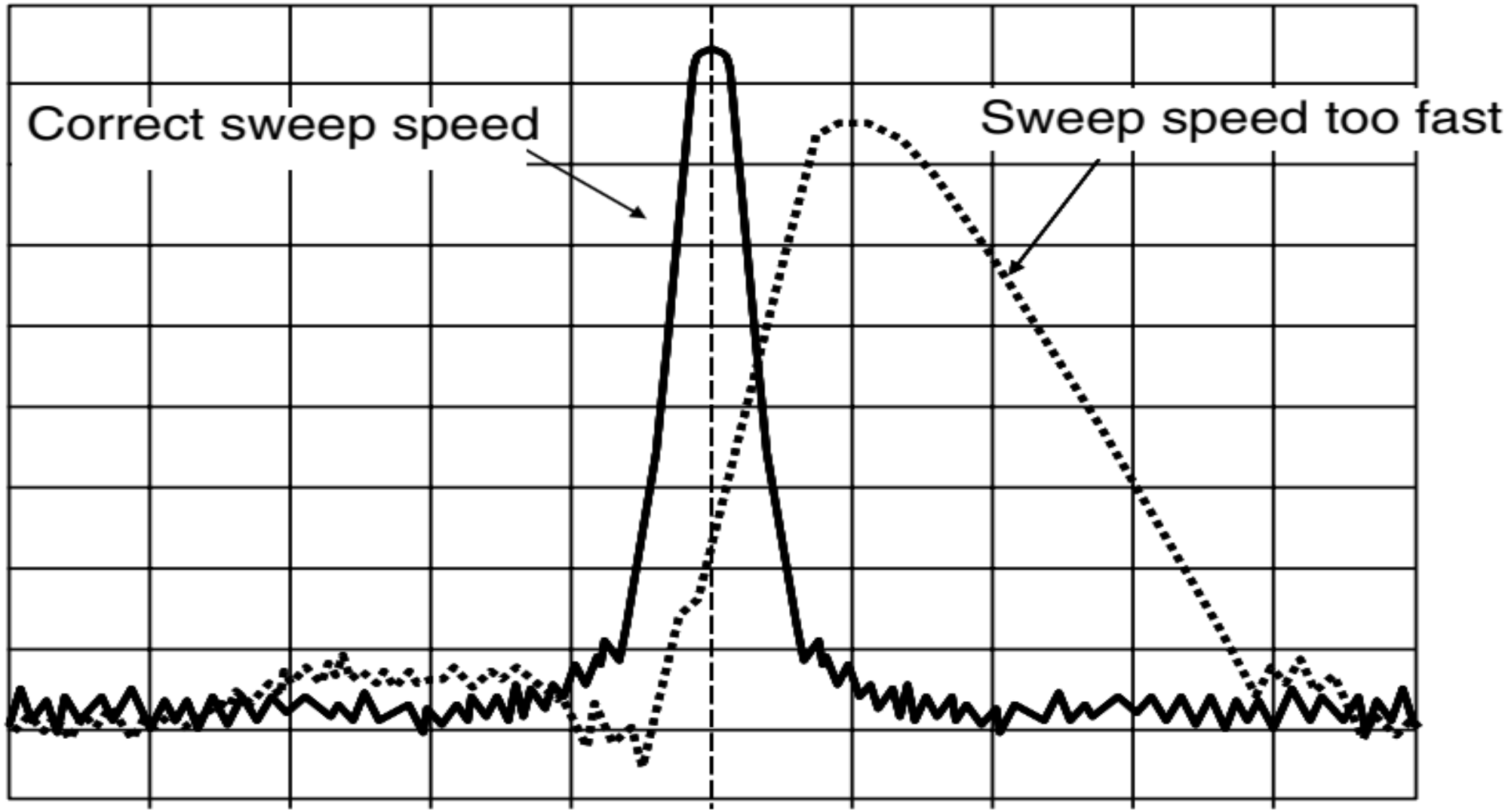
- Длительность времени анализа Та >>Т – периода сигнала
- Собственые шумы АС
- Нелинейные искажения во входных цепях АС
- Помехи по паразитным каналам (зеркальный канал, соседний канал и пр.)
- Отсутствие динамических искажений

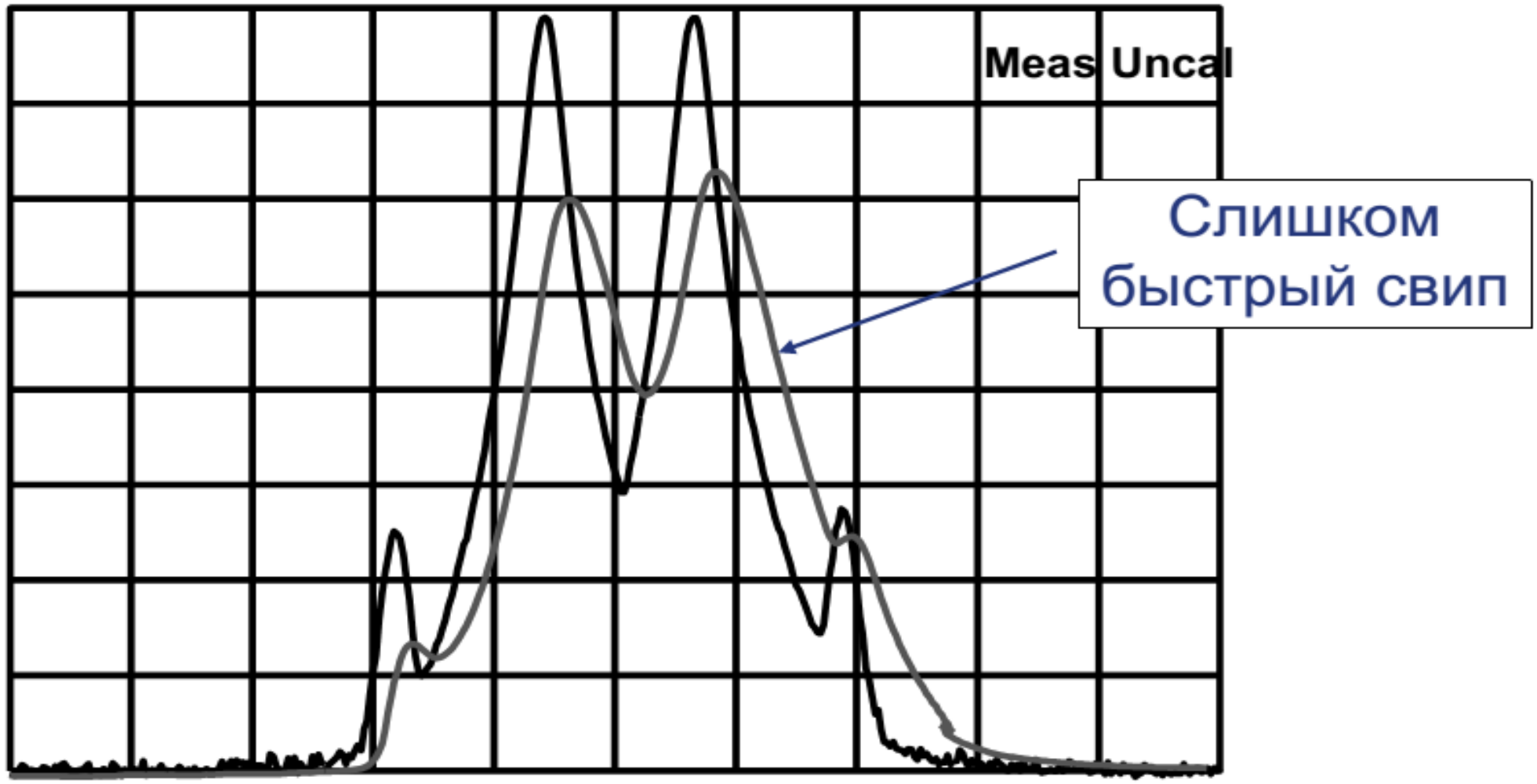


$$\mu = \frac{\Delta f_a}{A \cdot (\Delta f_{УПЧ})^2 \cdot T_a} \leq 1$$

$$T_a \geq \frac{\Delta f_a}{A \cdot (\Delta f_{УПЧ})^2}$$

Искажения одиночного отклика при слишком малом времени анализа

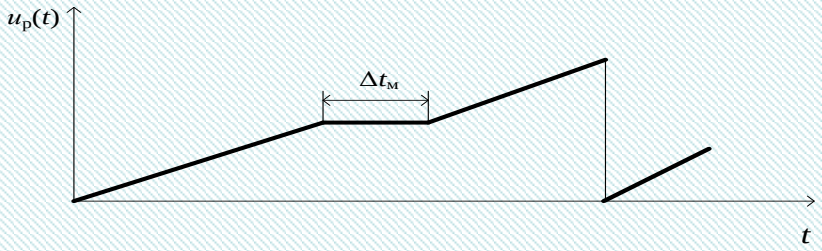


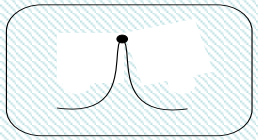


При слишком быстром свипировании нарушается калибровка

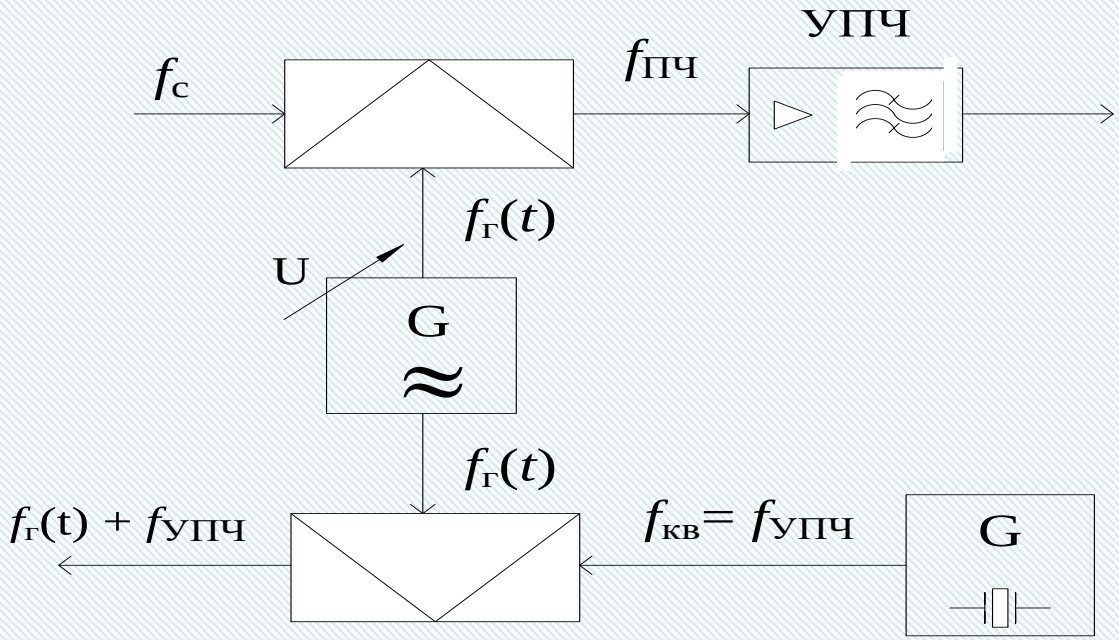
Измерение параметров спектра

- Метод калиброванных шкал
- Метод сравнения с эталонными сигналами (частотные метки)
- Метод стоп-метки

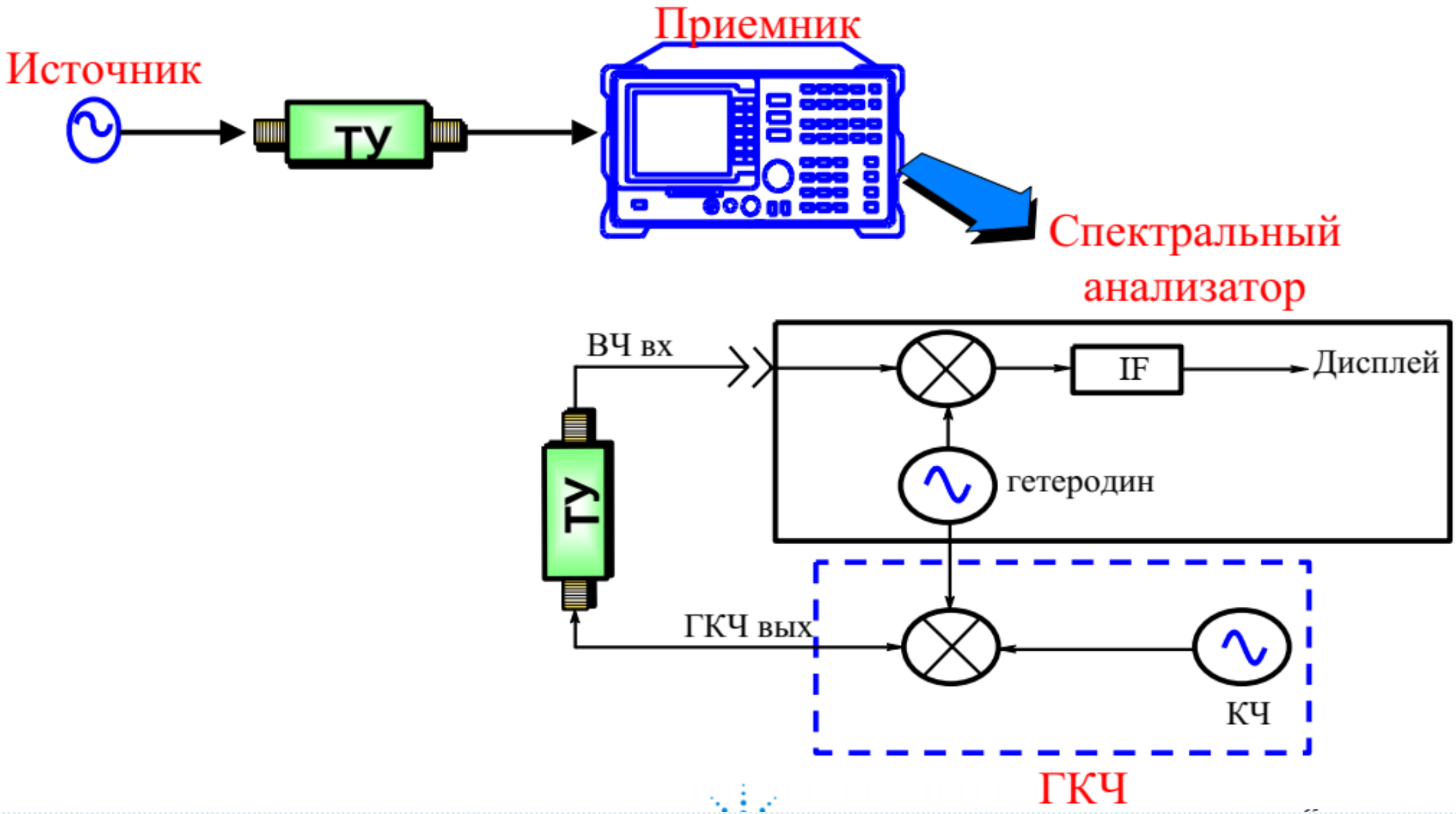




Измерение частоты стоп-метки с помощью следящего генератора (tracking generator)



Анализ АЧХ: следящий ГКЧ



Основные показатели качества анализаторов спектра

- Предельно допустимый уровень
- Частотный диапазон
- Погрешность: частота и амплитуда
- Разрешение
- Чувствительность
- Искажения
- Динамический диапазон



KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Параметры анализаторов спектра

- диапазон рабочих частот;
- погрешность измерения амплитуды;
- погрешность измерения частоты;
- скорость анализа (величина, равная полоса обзора/время обзора. Единица измерения – Гц/с) . Скорость анализа связана с разрешением по частоте – чем оно выше, тем меньше скорость. Это связано с ограниченной длиной БПФ и увеличением времени расчета БПФ.
- средний отображаемый уровень шумов (DANL - displayed average noise level) – усредненная спектральная плотность собственных шумов прибора. Единица измерения – дБм/Гц. Определяет минимальную амплитуду входного сигнала, которую можно наблюдать и измерять при помощи анализатора.

Основные параметры анализаторов спектра - 2

- точка компрессии 1 дБ по входу – максимальный уровень входного сигнала в дБм, при котором ошибка измерения амплитуды сигнала за счет нелинейности трактов прибора достигает 1 дБ.
- динамический диапазон - разность между точкой компрессии по входу анализатора спектра и средним отображаемым уровнем шумов. Единица измерения – дБ/Гц. Отношение максимальной амплитуды входного сигнала к минимальной (чувствительность), которые можно одновременно измерять при помощи анализатора спектра.
- фазовый шум - спектральная плотность мощности фазовых флуктуаций, отображаемая анализатором спектра при подаче на его вход идеального монохроматического сигнала. Единица измерения – дБн/Гц на различных отстройках от частоты сигнала.

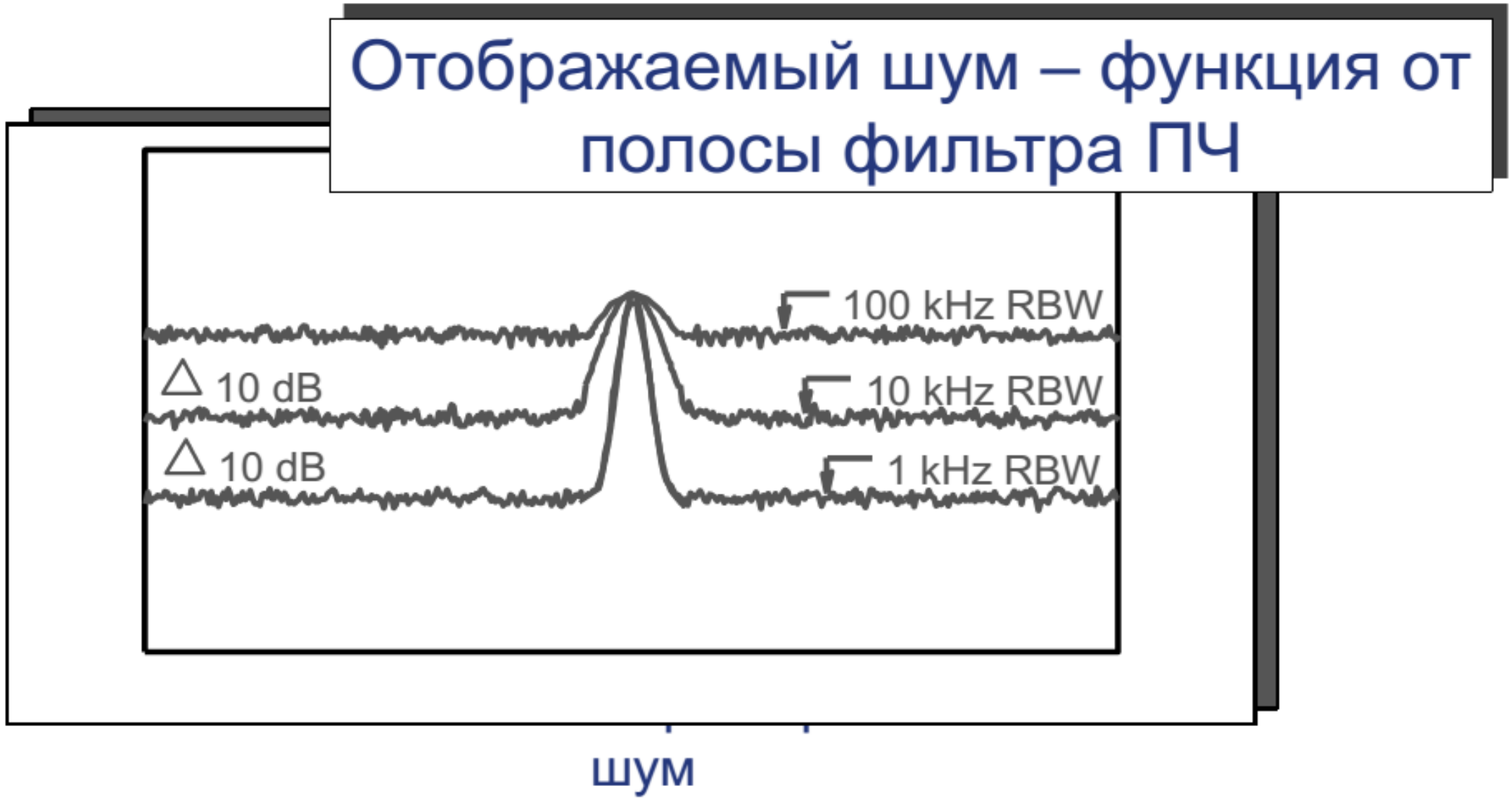
Основные параметры анализаторов спектра - 3

- Уровень паразитных спектральных компонент, вносимых анализатором спектра и отсутствующих во входном сигнале. Измеряют (относительно уровня входного сигнала. Единица измерения – дБн.
- Полоса единичного анализа (полоса захвата сигнала в МГц) - полоса, в которой осуществляется одновременная обработка всех спектральных компонент анализатором спектра (полоса БПФ). Если полоса сигнала превышает полосу единичного анализа, спектр сигнала может отображаться анализатором спектра некорректно.
- разрешение по частоте.

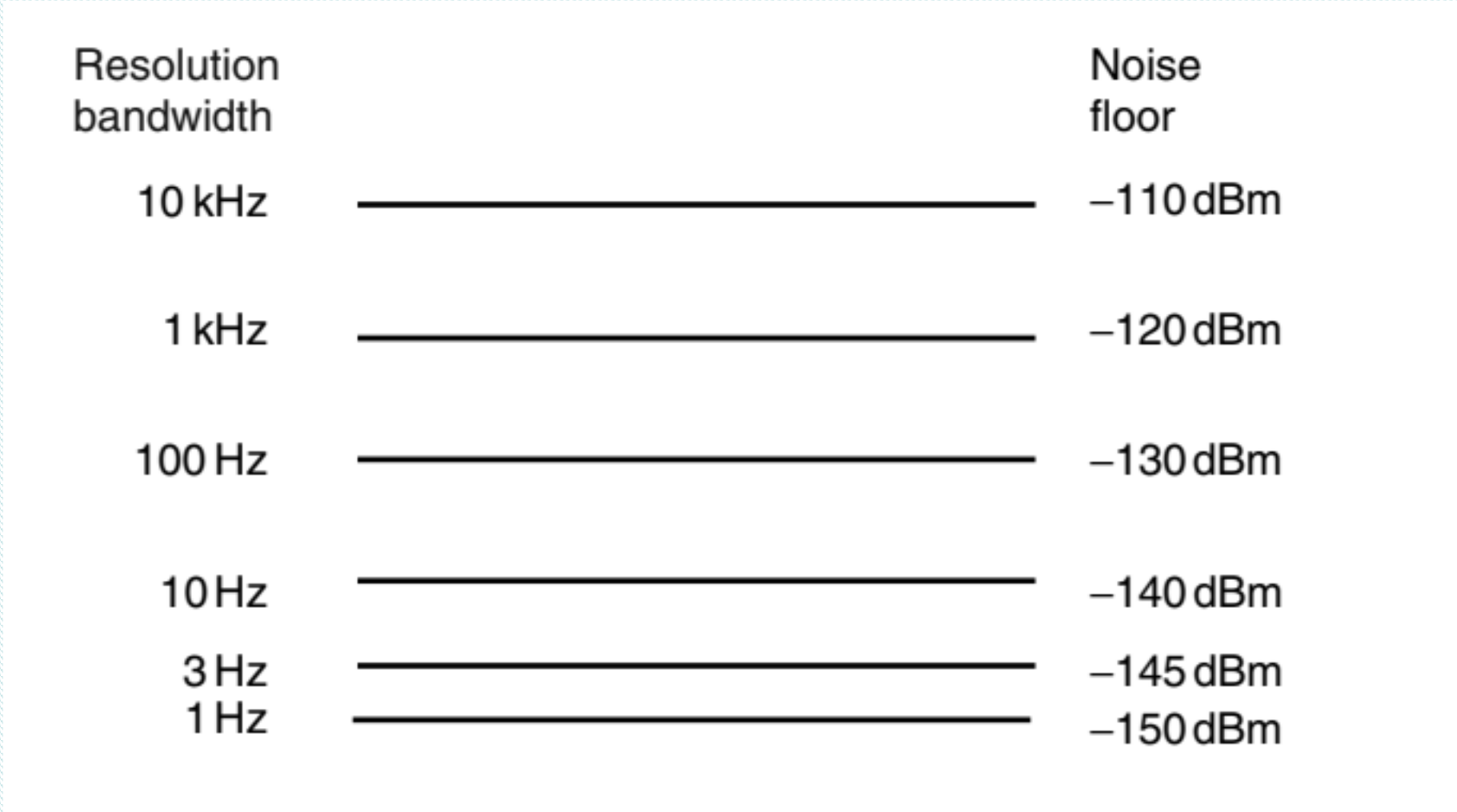
<u>Чувствительность</u> – минимальный уровень измеряемого сигнала) . Определяется уровнем собственного шума (DANL - displayed average noise level**)**



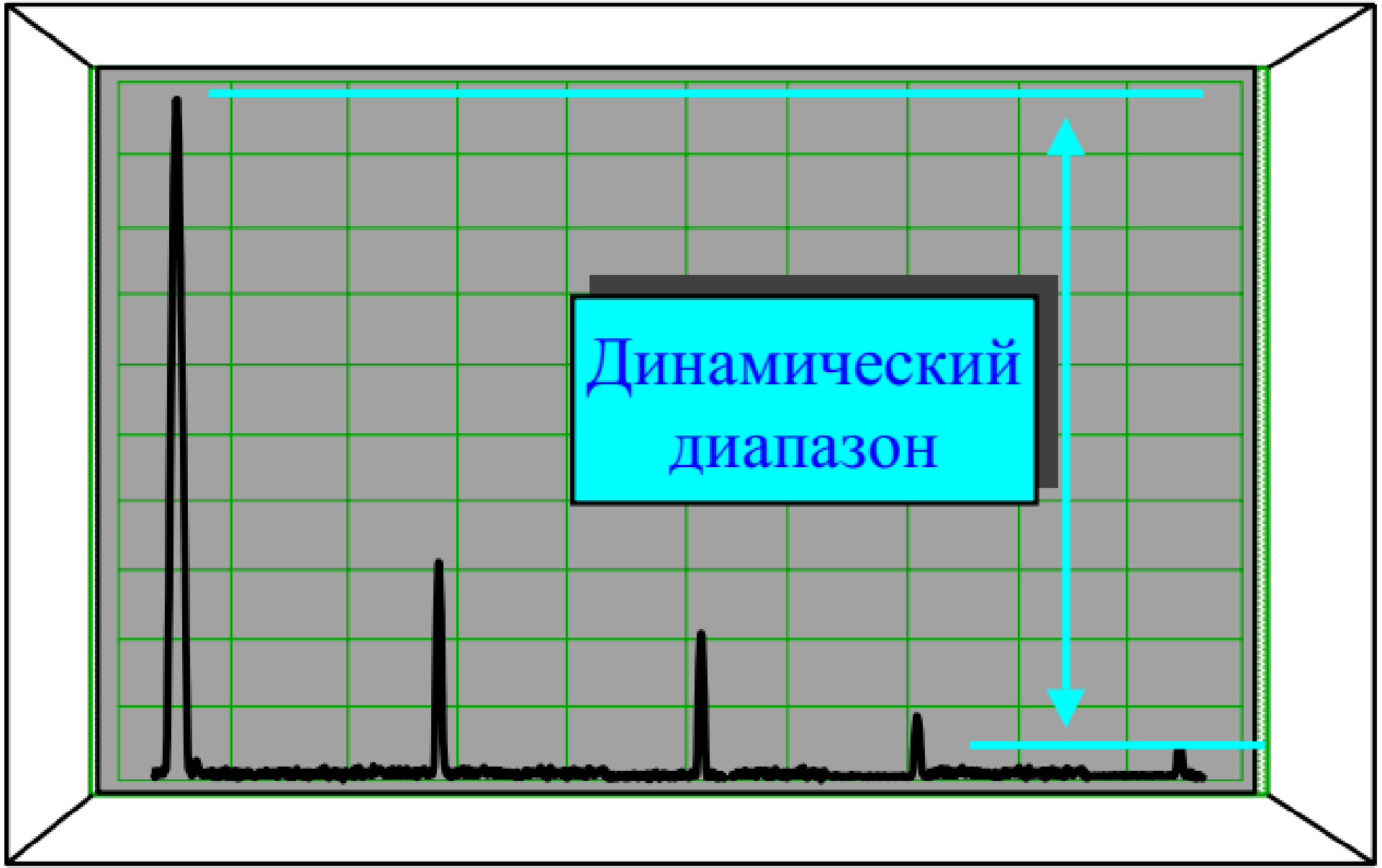
Чувствительность: зависимость от ширины фильтра ПЧ



Уровень шума при различной полосе пропускания радиофильтра (RBW)

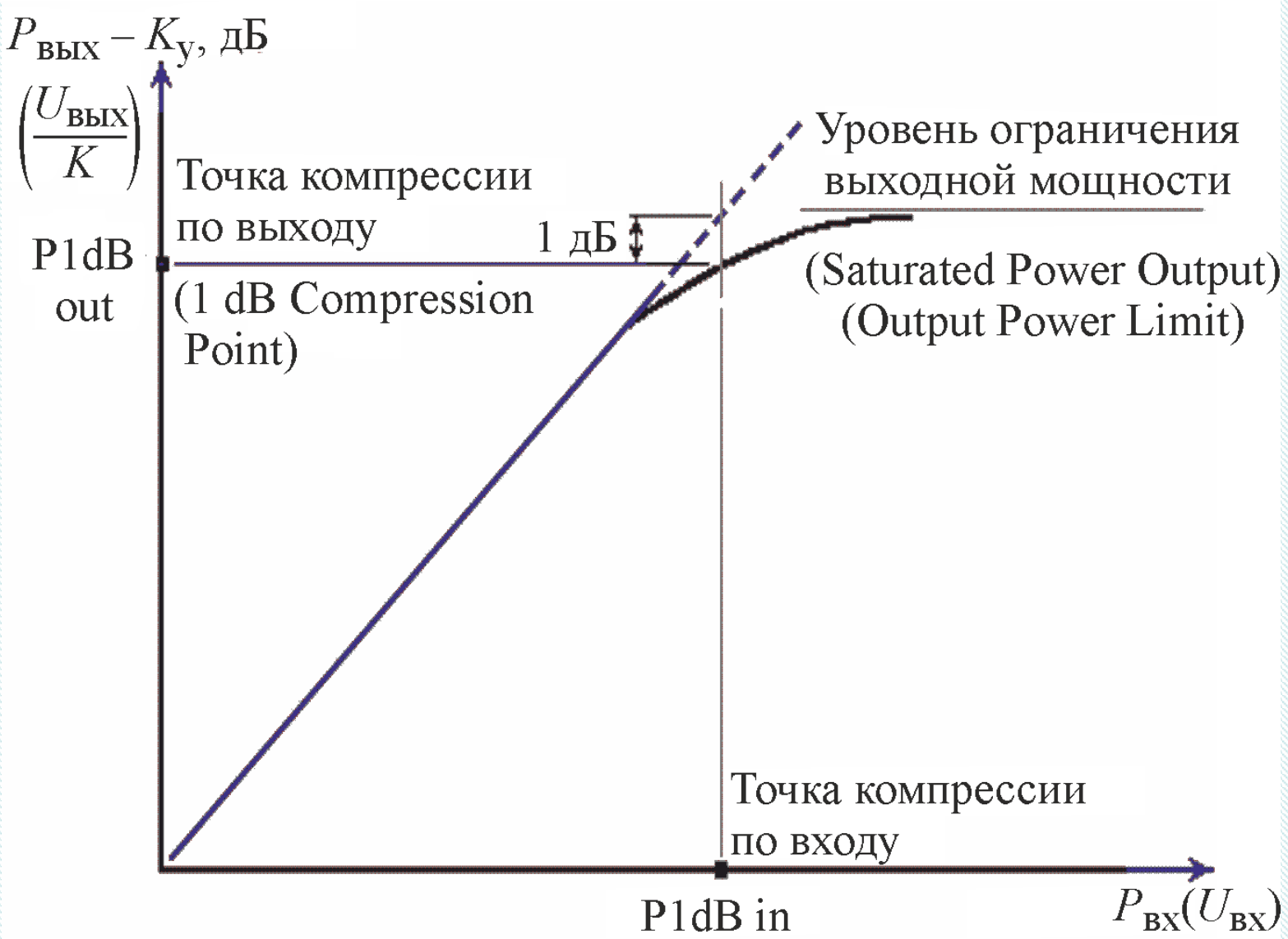


Уровень шума при различной полосе пропускания радиофильтра (RBW)


Динамический
диапазон

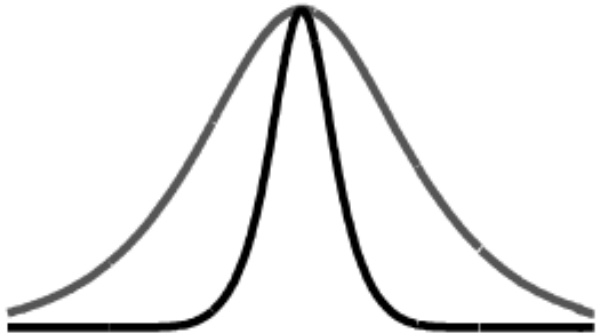
Точка компрессии 1 дБ по входу АС

Точка, где отклонение амплитудной характеристики АС от линейной зависимости составляет 1 дБ, называется *точкой компрессии* (однодецибельной точкой компрессии, 1 dB compression point, P1dB)



Точку компрессии задают соответствующим уровнем входного сигнала (input compression point P1dB in). Чем больше значение сигнала в точке компрессии, тем выше линейность усилителя.

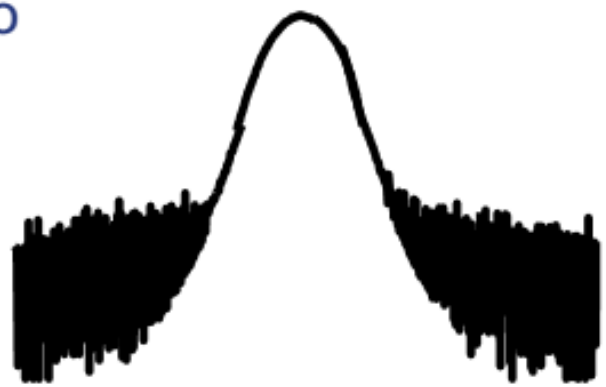
Чем определяется разрешение по частоте?



Полоса разрешающего фильтра

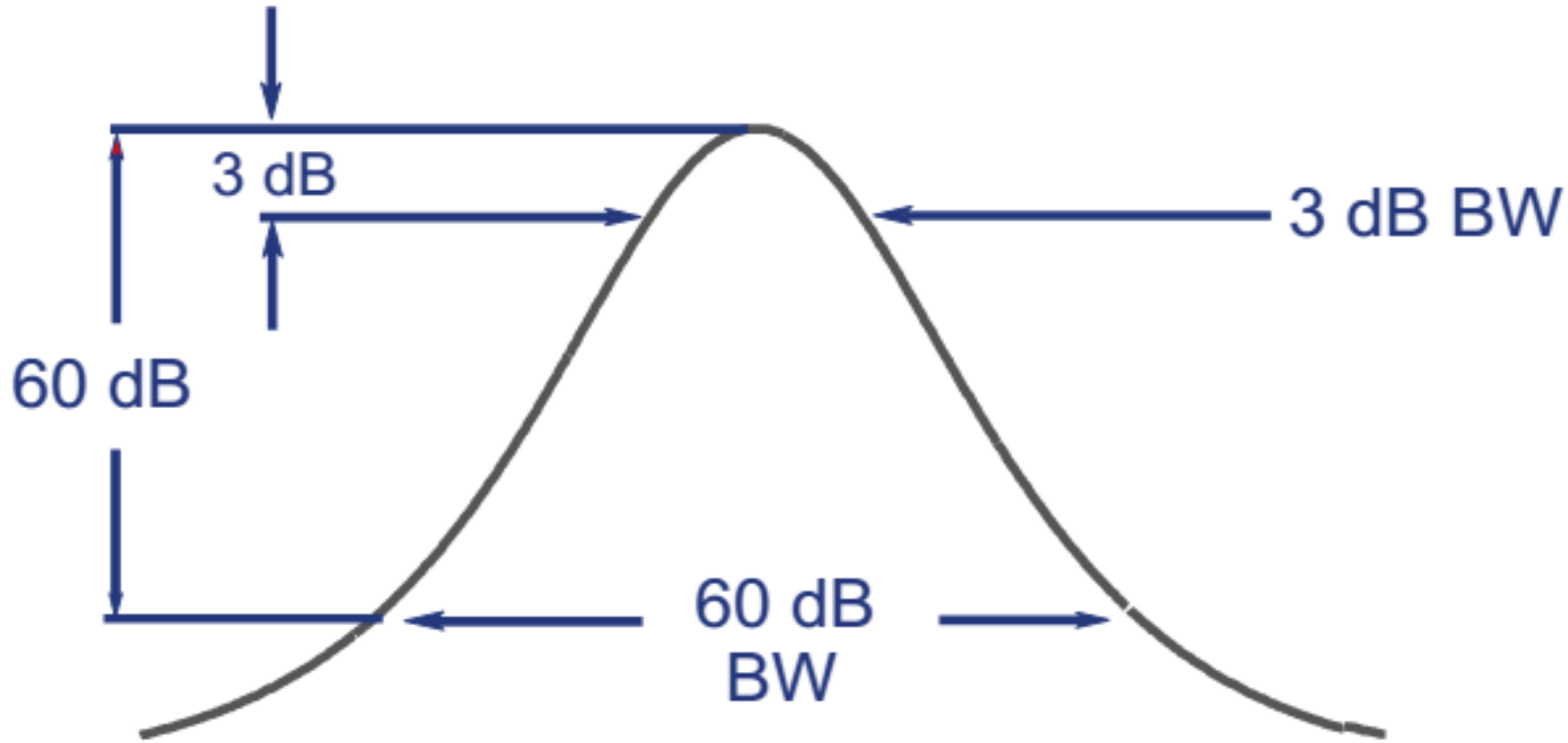


Тип и избирательность ФПЧ



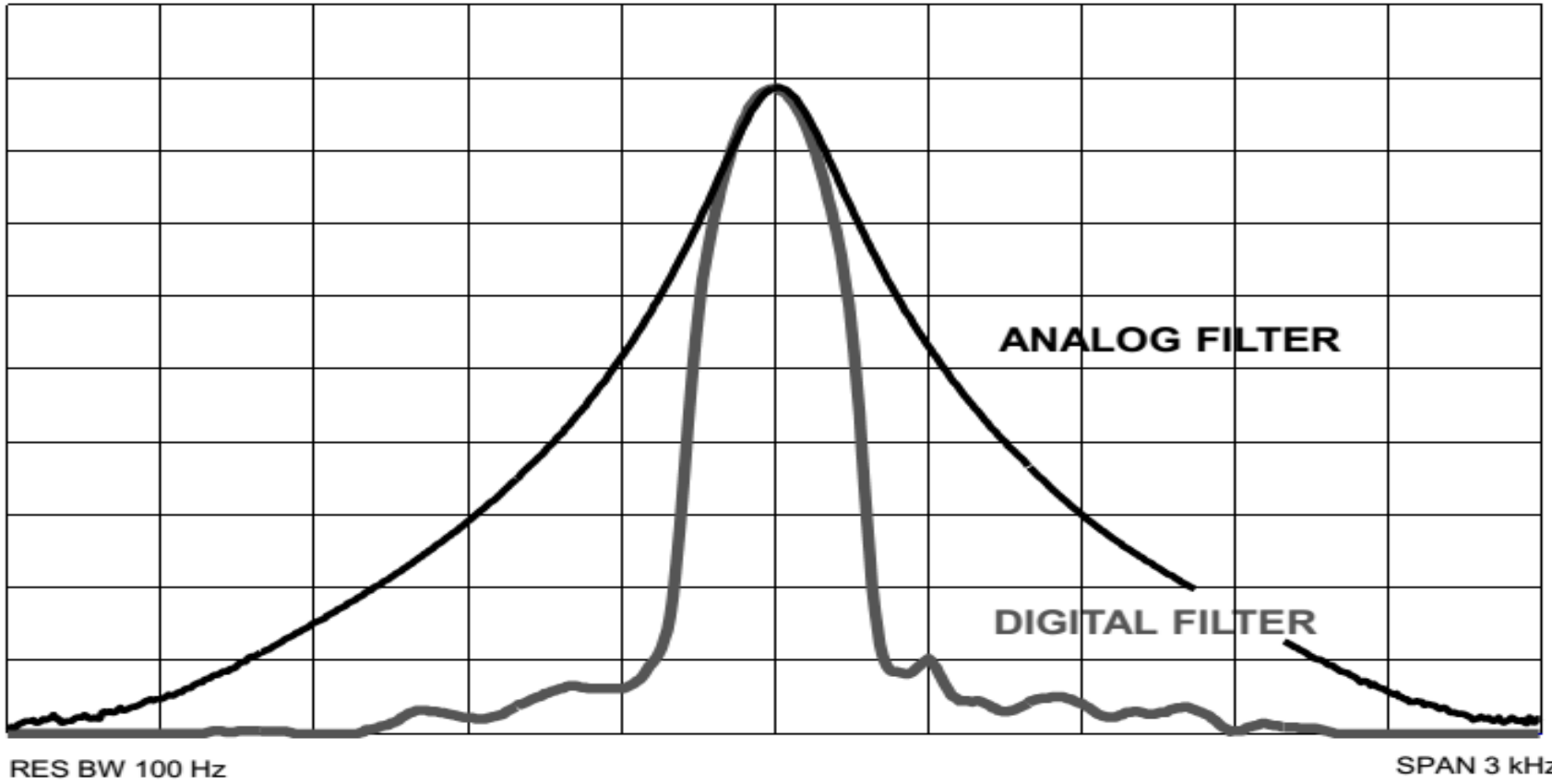
Шумовые полосы

Избирательность или коэффициент прямоугольности ФПЧ



$$\text{Selectivity} = \frac{\text{60 dB BW}}{\text{3 dB BW}}$$

Разрешение: тип и избирательность ФПЧ



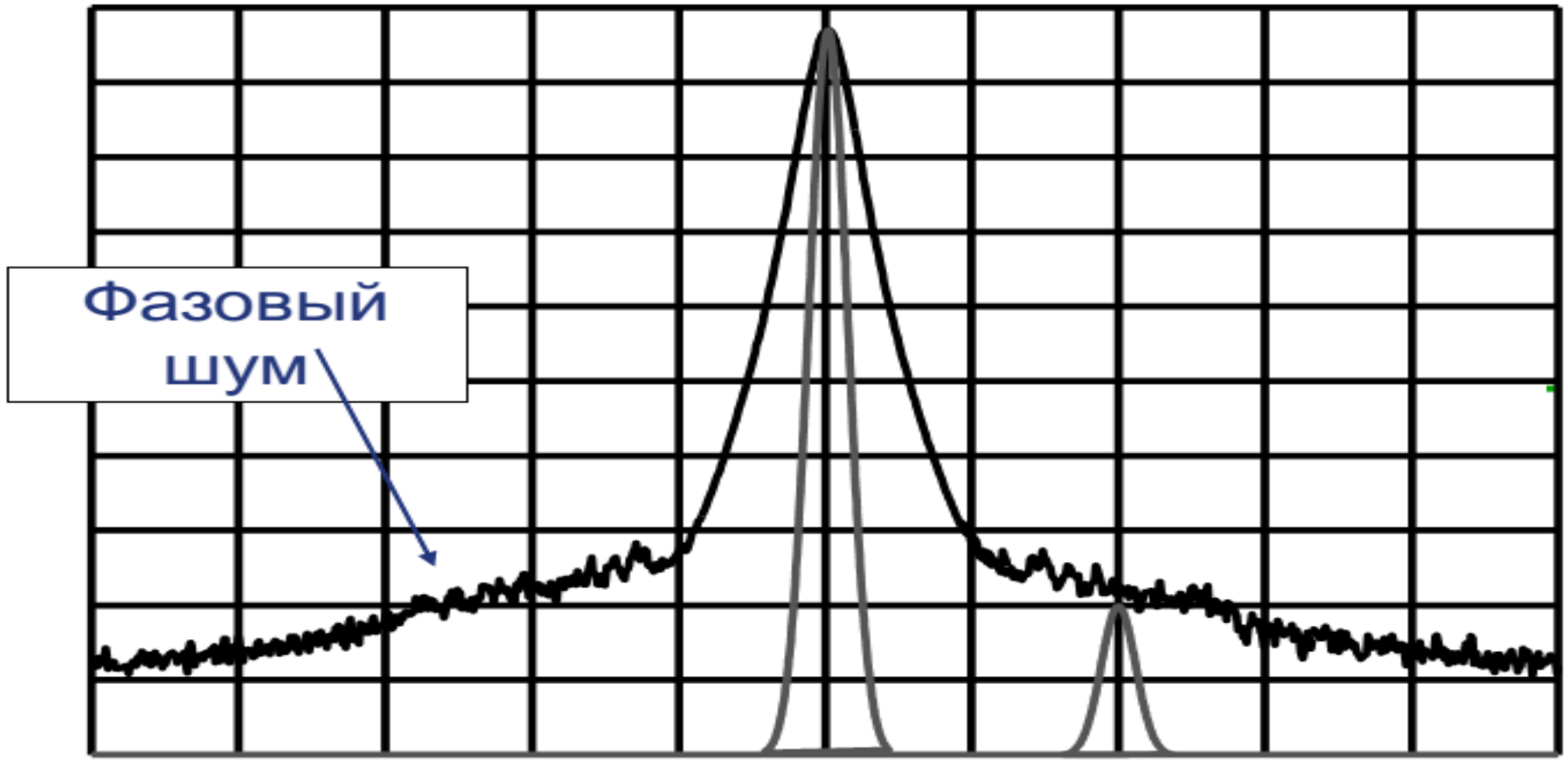
Typical Selectivity

Analog	15:1
Digital	≤5:1

*** Для анализаторов X-серии избирательность 4.1:1**

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

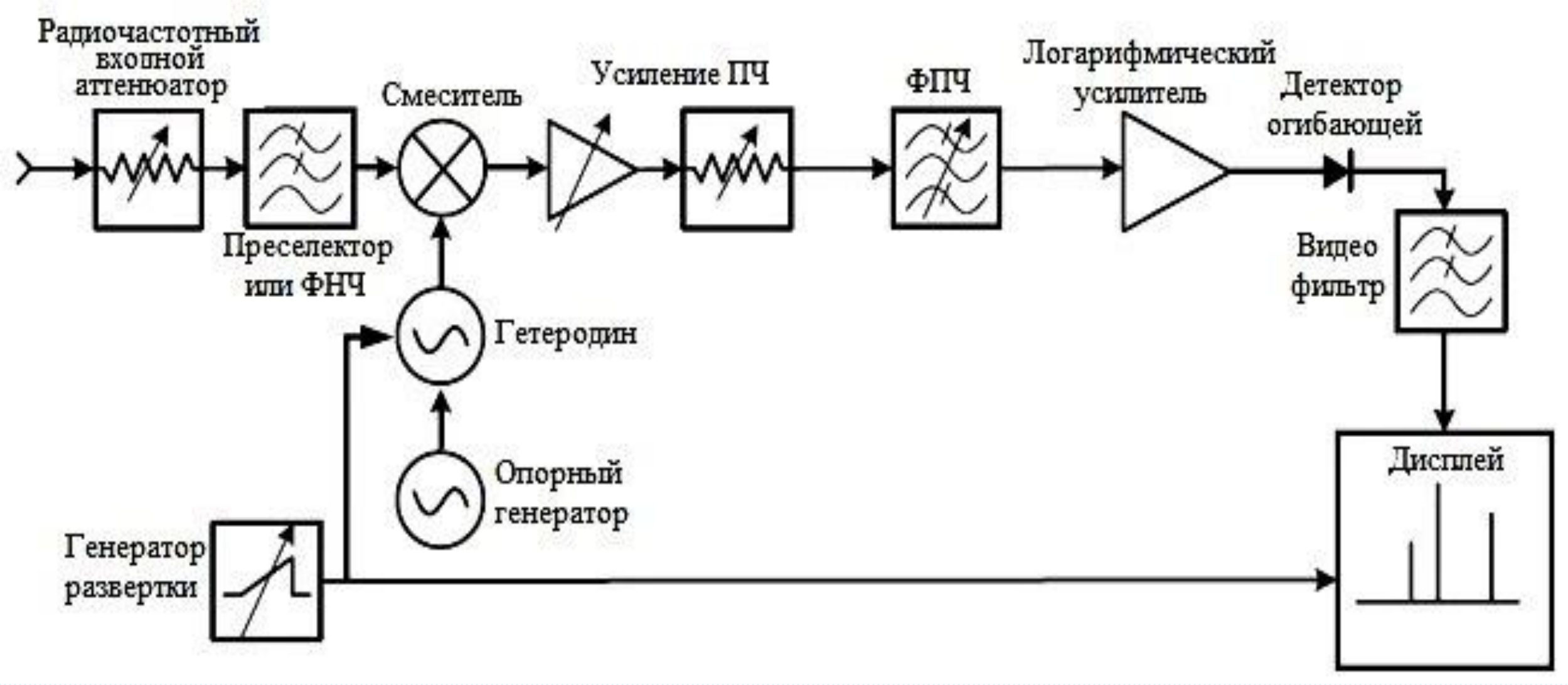
Разрешение: шумовые полосы



Шумовые полосы могут помешать разделению сигналов разных уровней

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Полная схема анализатора спектра с плавно перестраиваемым гетеродином



Аналоговый анализ спектра широкополосного сигнала

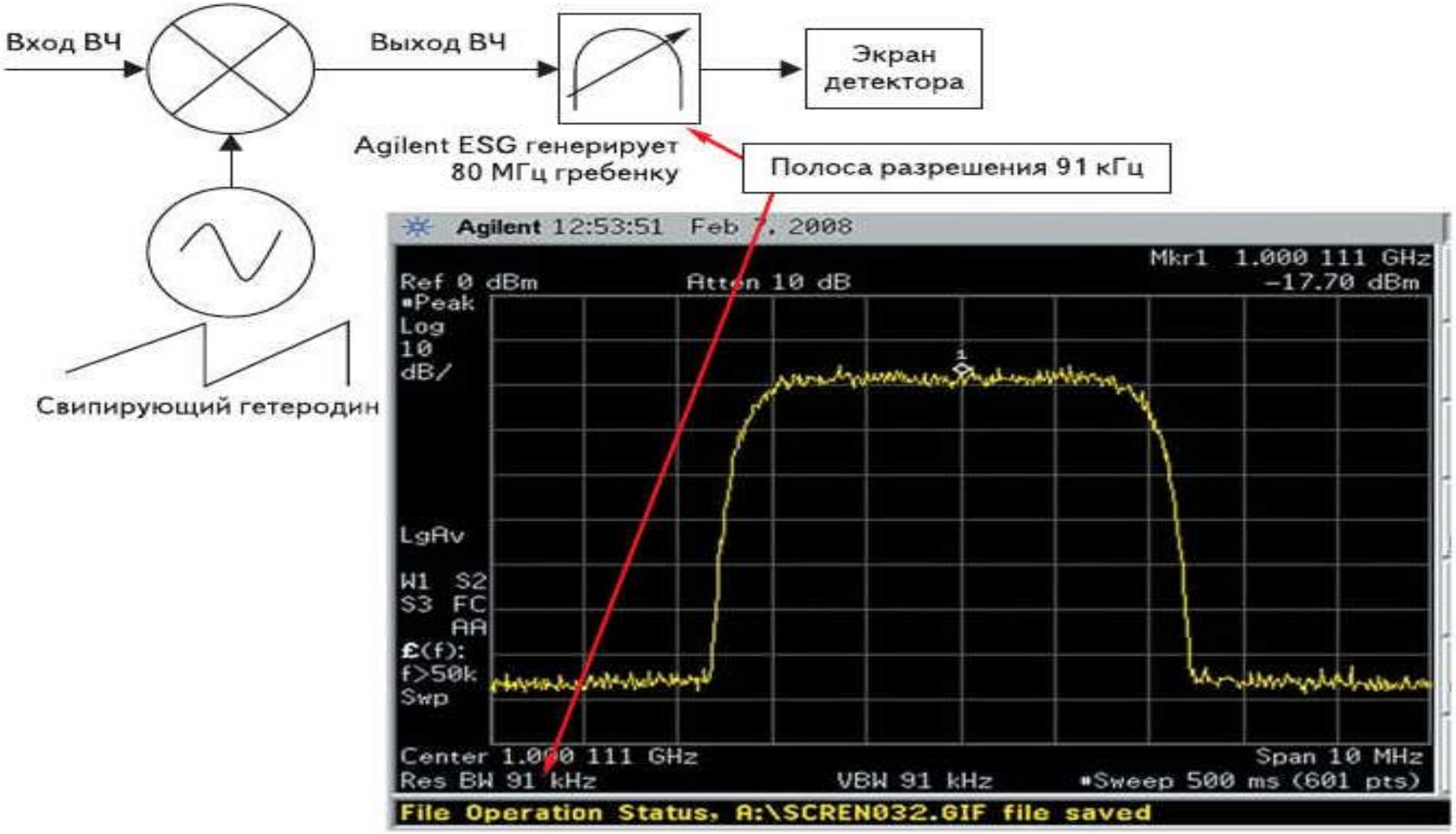
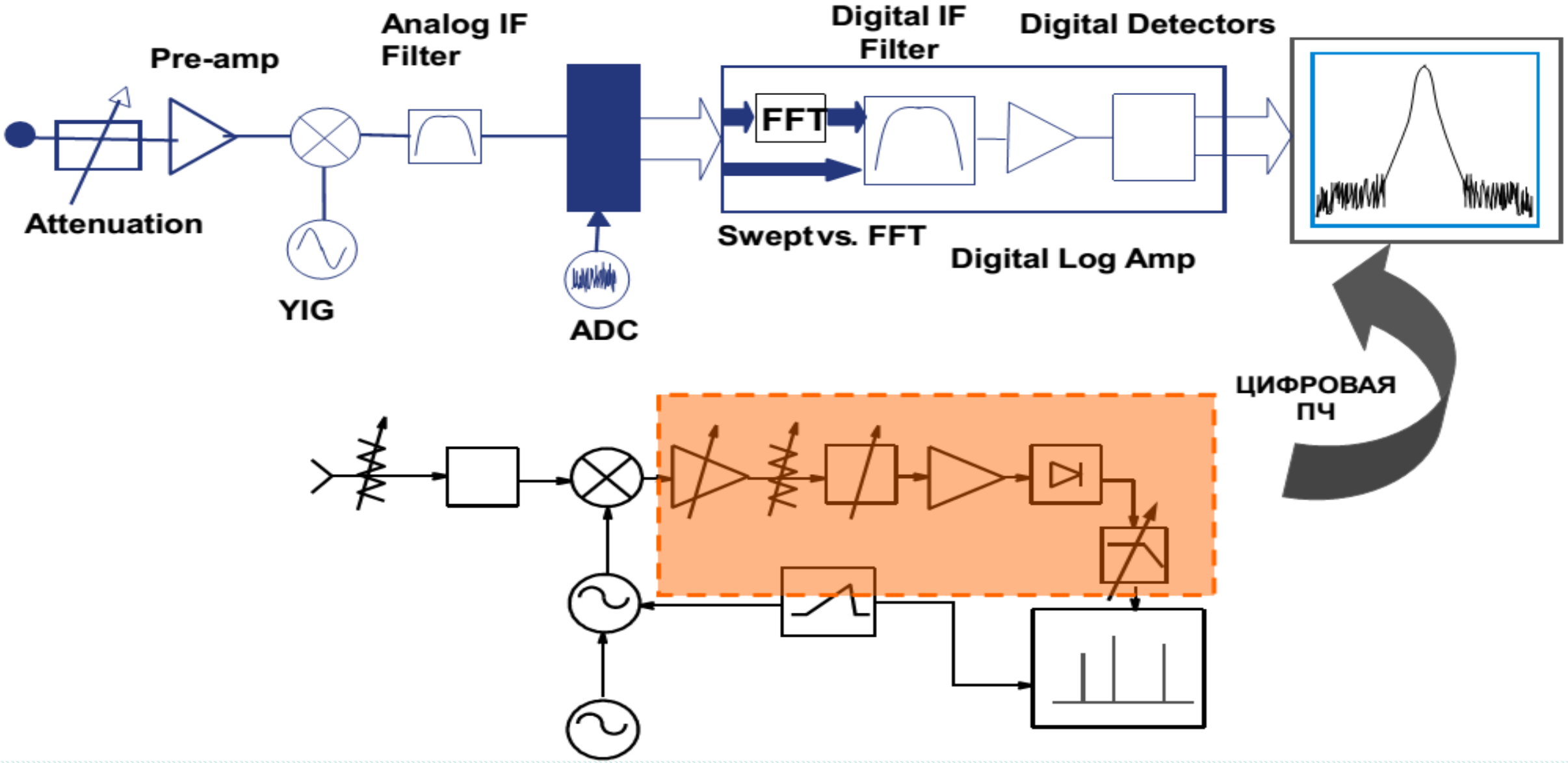
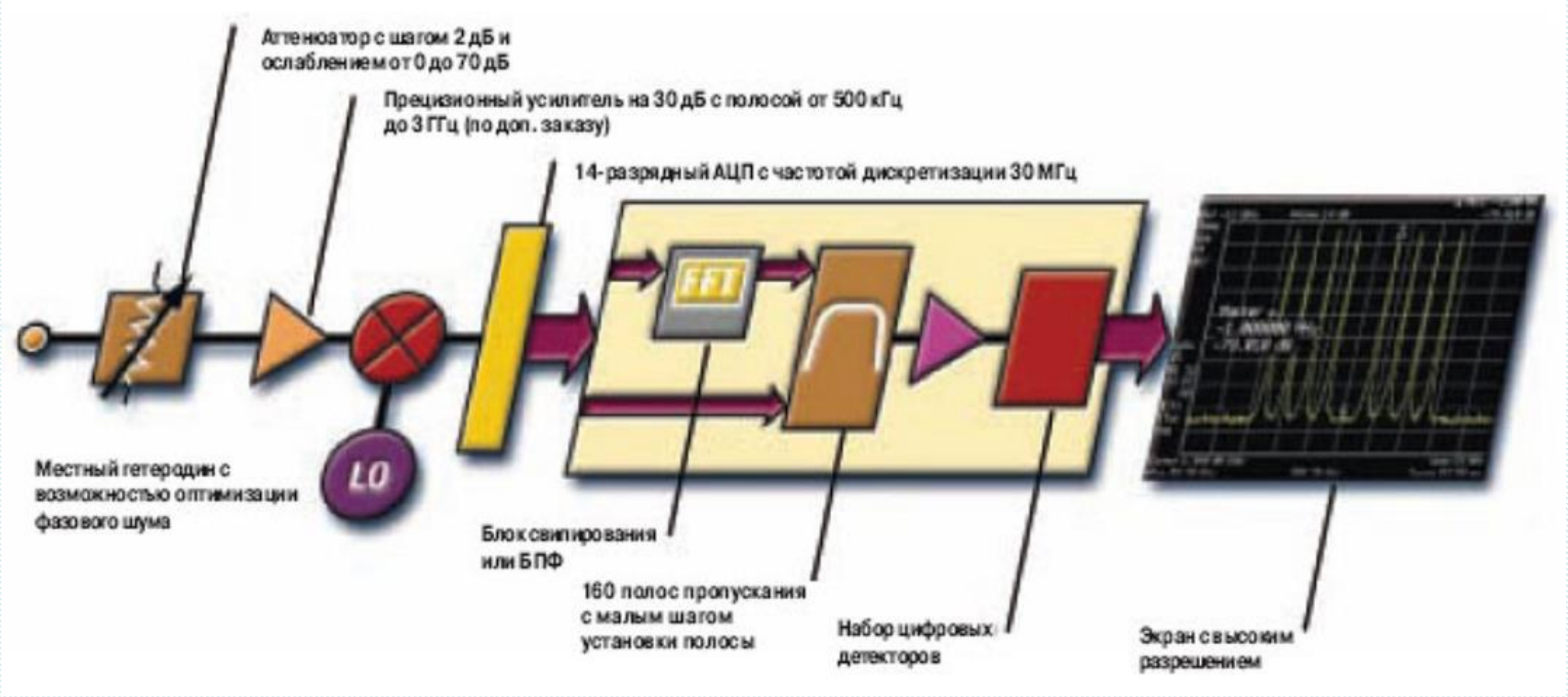


Схема анализатора спектра с цифровой ПЧ и дискретно перестраиваемым гетеродином



Анализатор спектра Agilent PSA с “цифровым интеллектом”



Цифровой БПФ анализ широкополосного сигнала спектроанализатором с фиксированным гетеродином

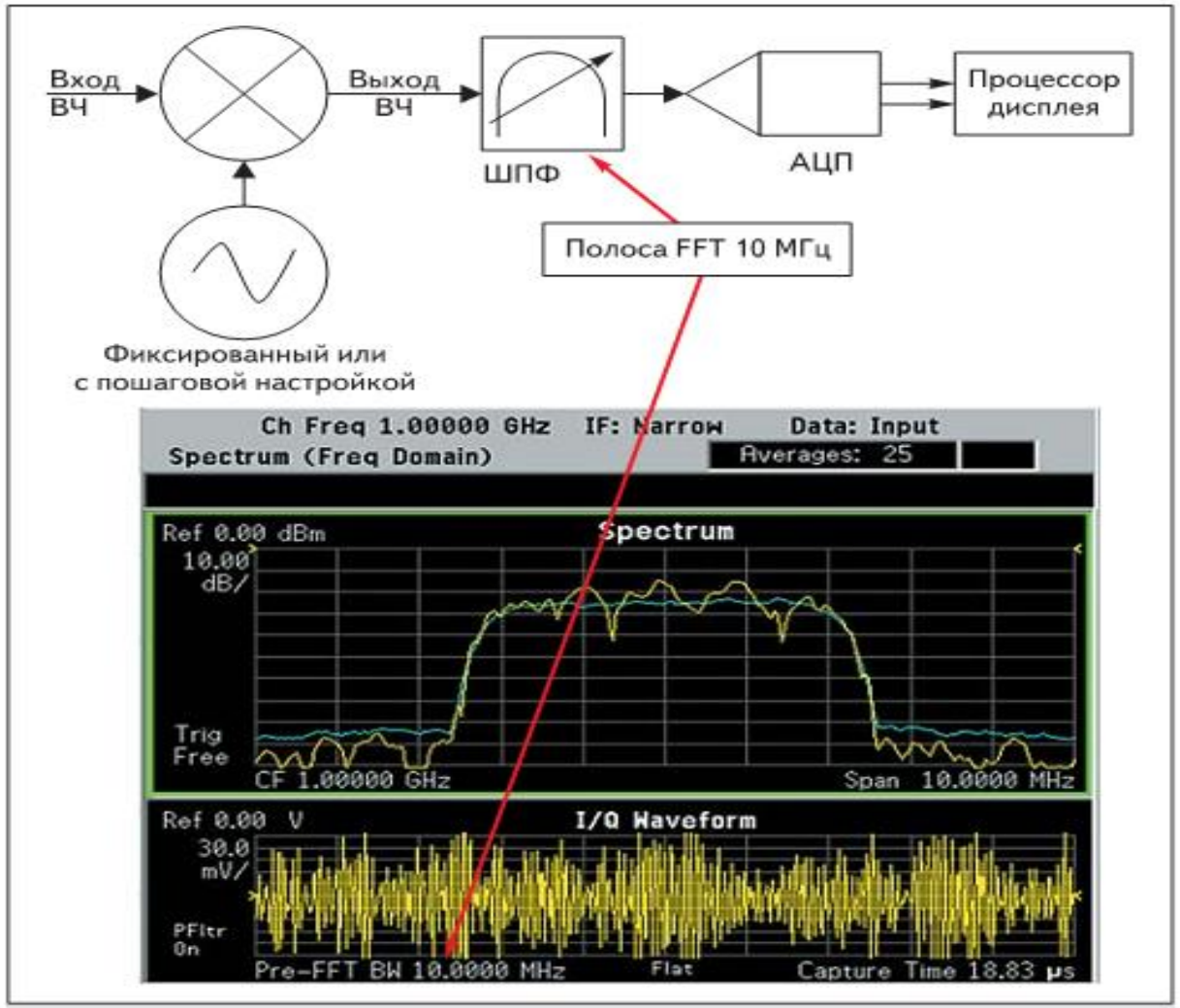


Рис. 2. Оцифрованные данные и быстрое преобразование Фурье

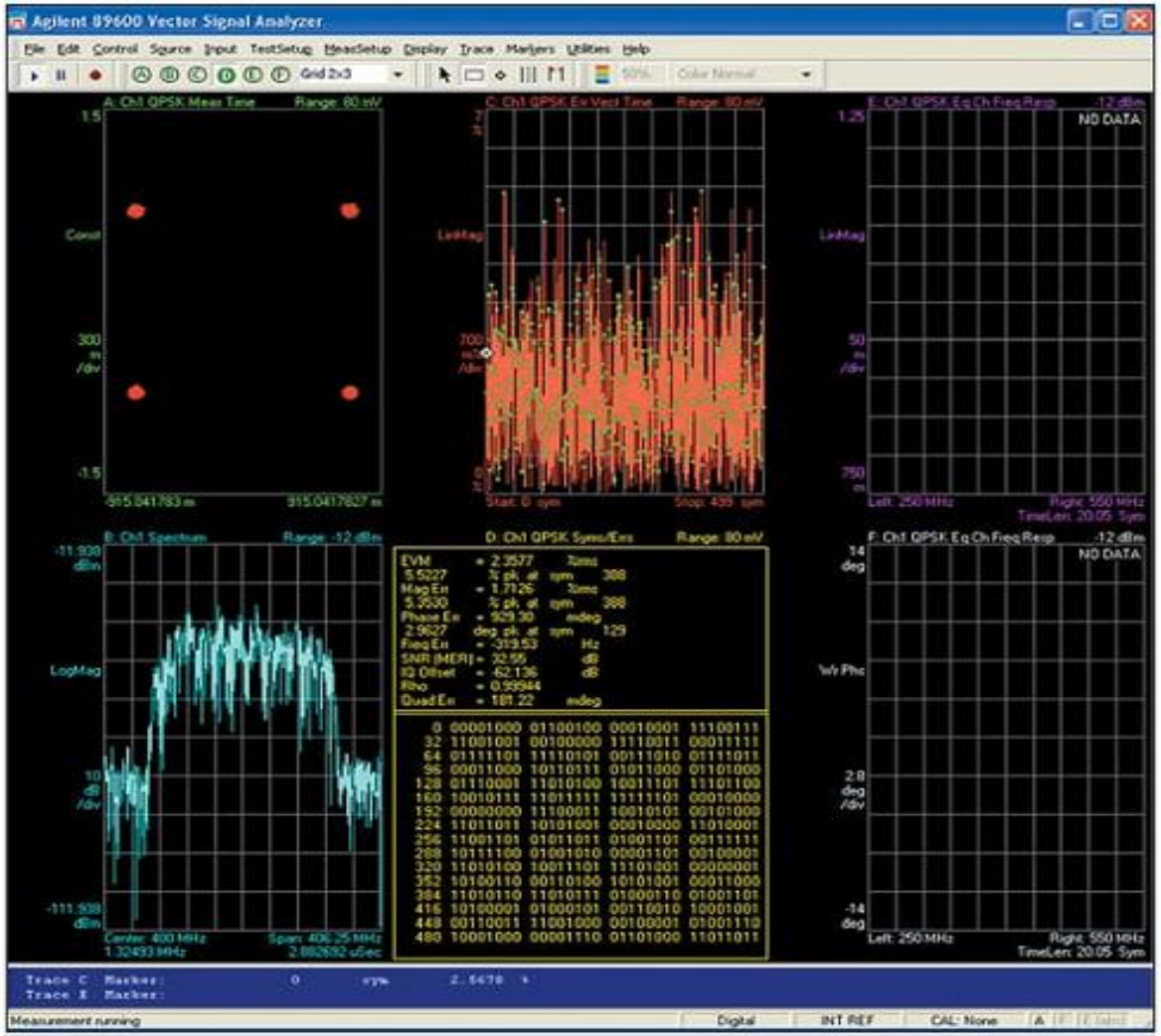
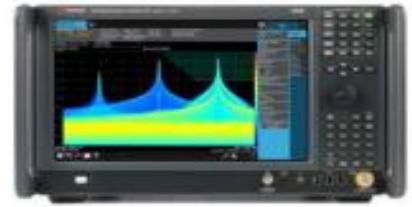


Рис. 4. Спутниковый сигнал, полоса 300 МГц



Приложения анализаторов серии X

Фазовый шум, форма шума, аналоговая демодуляция
Pulse
LTE/LTE-Advanced FDD & TDD
W-CDMA/HSPA+



UXA

Неограниченная производительность
3 Гц до 110 ГГц, до 5 ГГц BW
Real-time spectrum analysis
255 МГц real-time streaming



PXA

Эталон для ключевых приложений
3 Гц до 50 ГГц, 510 МГц BW
Real-time spectrum analysis
255 МГц real-time streaming
Улучшенные фазовые шумы (DDS LO)



MXA

Оптимальный выбор для беспроводной связи
10 Гц до 26,5 ГГц, 160 МГц BW
Real-time spectrum analysis



EXA

Максимальная выгода до мм диапазона
10 Гц до 44 ГГц, 40 МГц BW
Улучшенные фазовые шумы



CXA

Лидирующий бюджетный прибор
9 кГц до 26.5 ГГц, 25 МГц BW
Улучшенные фазовые шумы



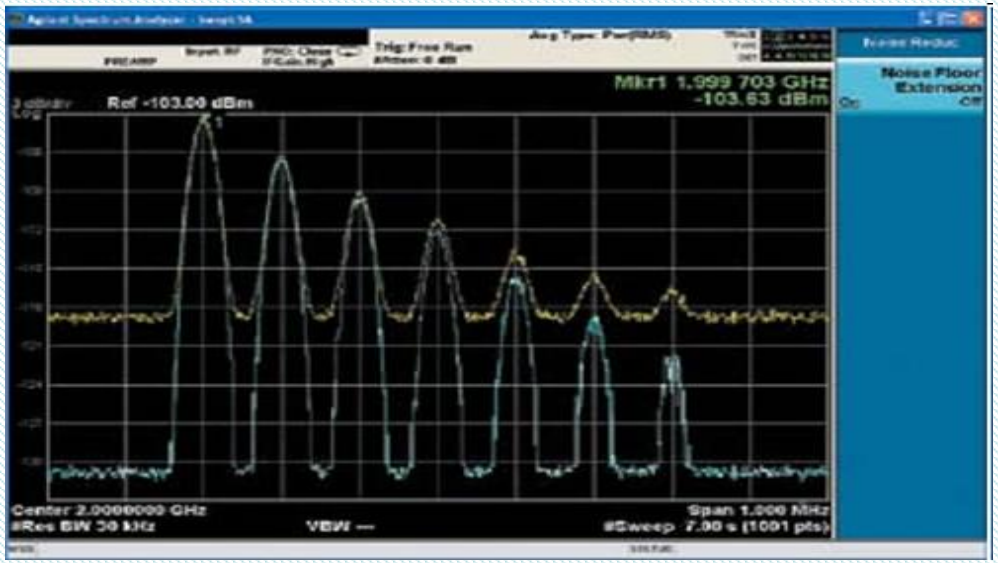
NFA

до 40 ГГц

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Анализатор спектра Keysight Technologies N9030A





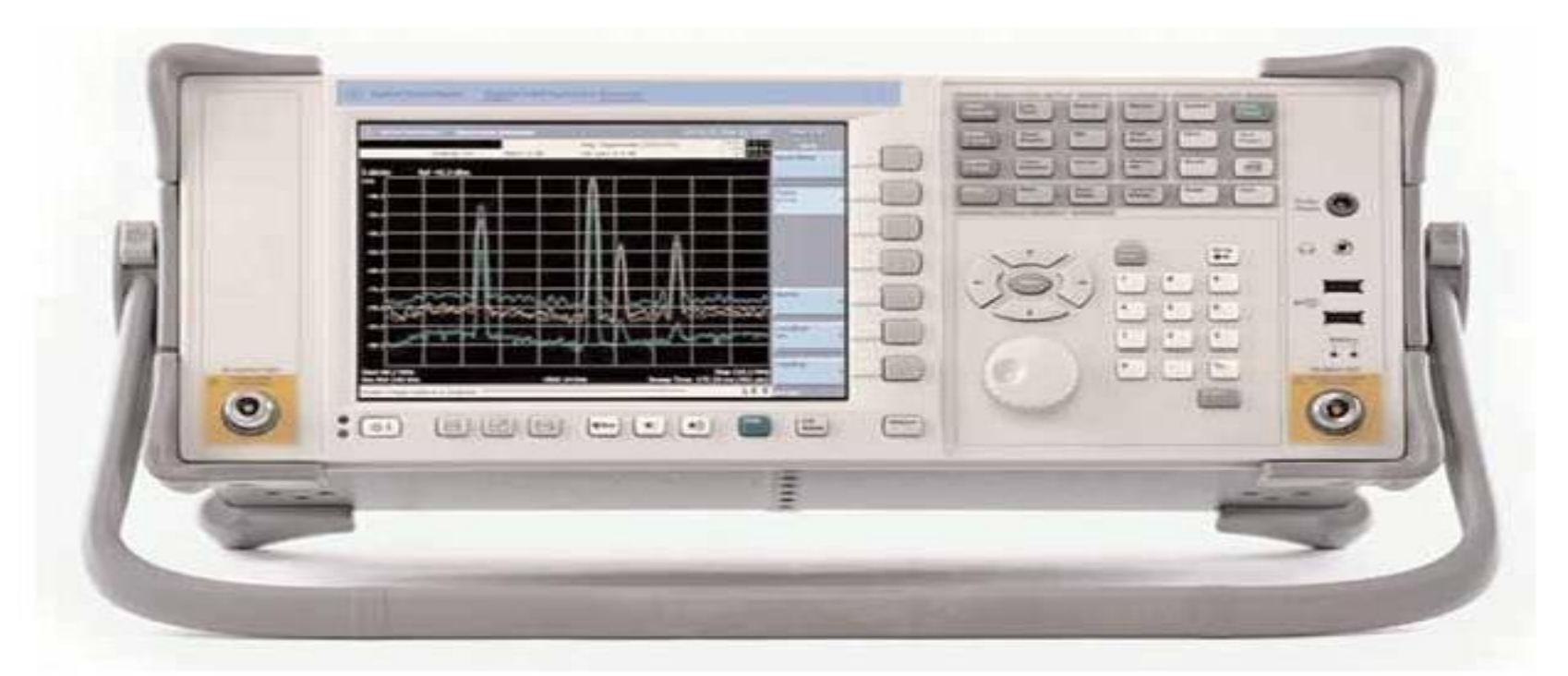
•Уровень собственных шумов до -161 дБм

•Средний уровень собственных шумов -172 дБм при использовании метода уменьшения шумов NFE

• Динамический диапазон до 75 дБ; полоса анализа / демодуляции 10МГц..140 МГц

• Погрешность измерения уровня ±0,19 дБ

Анализатор спектра Keysight Technologies CSA (N1996A)



Фазовый шум на частоте 1 ГГц (отстройка 10 кГц): –85 дБс/Гц
Динамический диапазон по третьей гармонике на 1 ГГц : 96 дБ
Средний уровень собственного шума на частоте 1 ГГц : –148 дБм
Стандартные пределы установки ослабления 40 дБ, дискрет аттенюатора 1 дБ
Суммарная амплитудная погрешность ±1,5 дБ

Анализатор спектра Keysight Technologies N9320A



Ручной анализатор спектра ВЧ диапазона Keysight Technologies N9340A



Фазовый шум на частоте 1 ГГц (отстройка 10 кГц): –87 дБс/Гц
Макс. динамический диапазон по третьей гармонике на 1 ГГц : 89 дБ
Средний уровень собственного шума на частоте 1 ГГц: –144 дБм
Стандартные пределы установки ослабления 51 дБ, дискрет 1 дБ
Суммарная амплитудная погрешность ±1,5 дБ

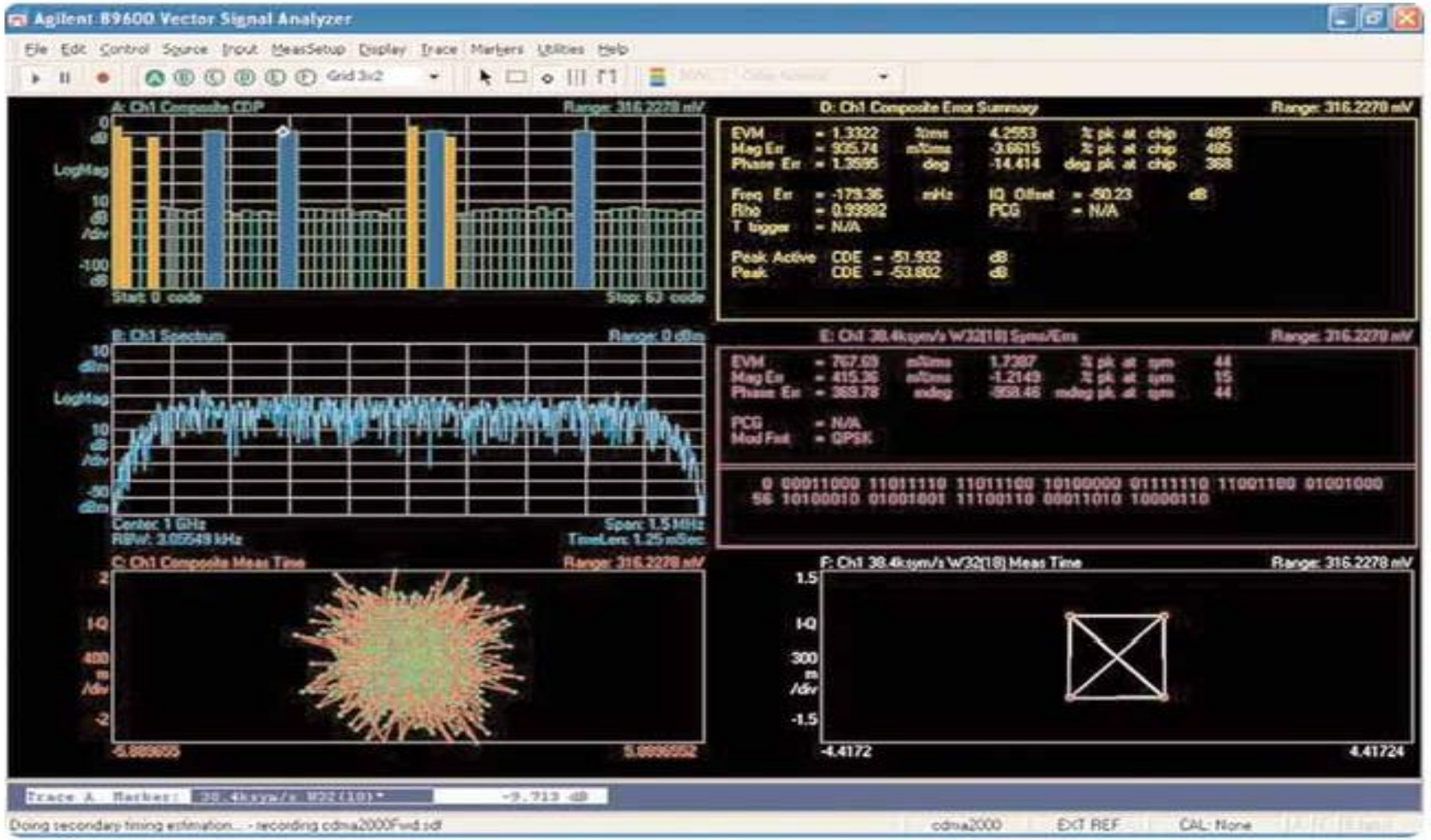
Анализатор спектра Keysight Technologies серии PXA





KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Программа векторного анализа сигналов 89601A/89601AN

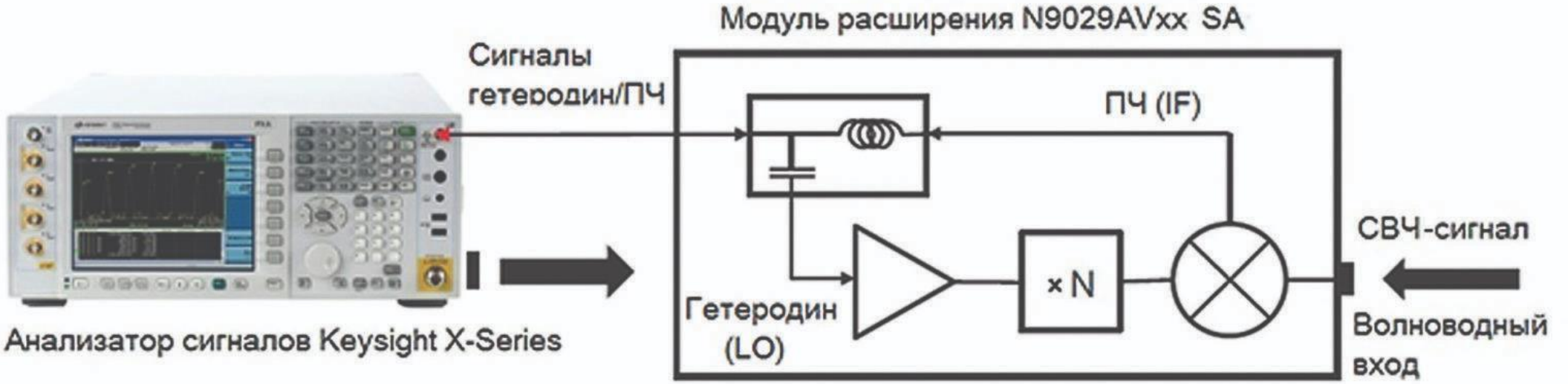


Форматы демодуляции
FSK: уровень 2, 4, 8, 16 (включая GFSK)
MSK (включая GMSK), BPSK, QPSK, OQPS
QAM и пр.
Сотовая связь:
cdma2000, WFCDMA, HSPA, GSM, EDGE,
CDMA (базовые станции), CDMA
и пр.
Беспроводные сети:
WLAN IEEE 802.11a/b/g/j/p/n (MIMO),
Bluetooth, WiMAX IEEE 802.16 OFDM/OFDM
ZigBee™
Цифровое ТВ.
Частная мобильная радиосвязь.

Расширители частот (SAX -Spectrum Analyzer Extenders) Keysight N9029 для анализаторов спектра X-Series







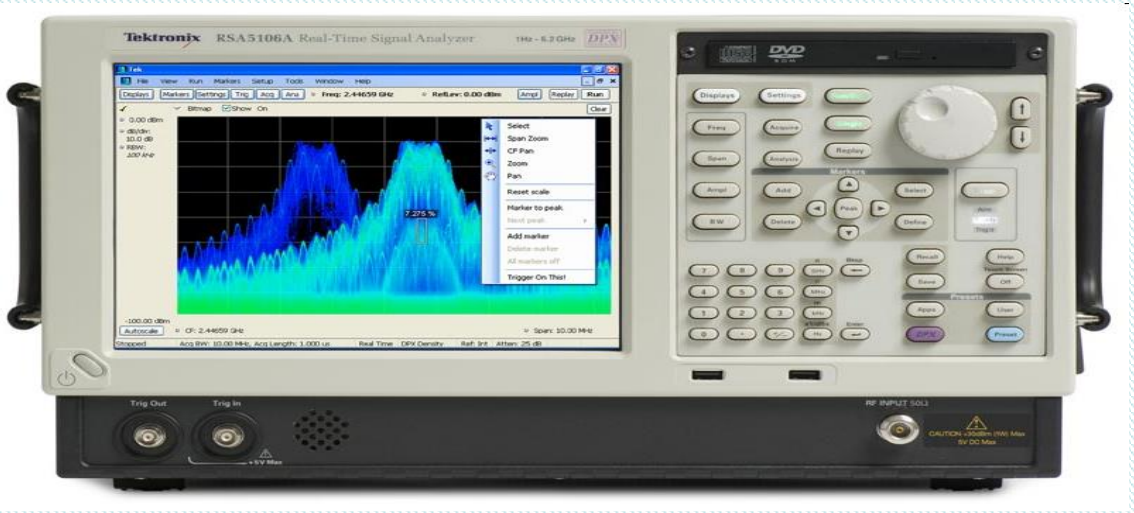
Модель расширителя частот N9029AV03 перекрывает диапазон WR3.4 220–330 ГГц.

Анализаторы спектра Tektronix

RSA6000



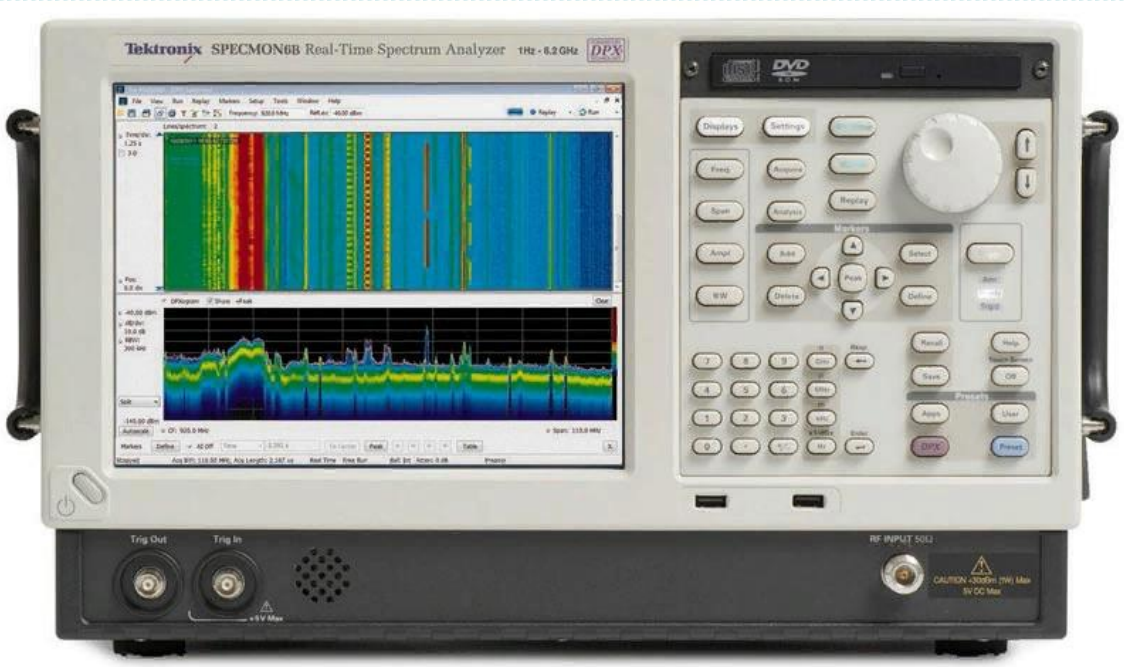
RSA5106A





RSA3303A

Анализаторы спектра Tektronix



Анализатор спектра реального времени SPECMON6B

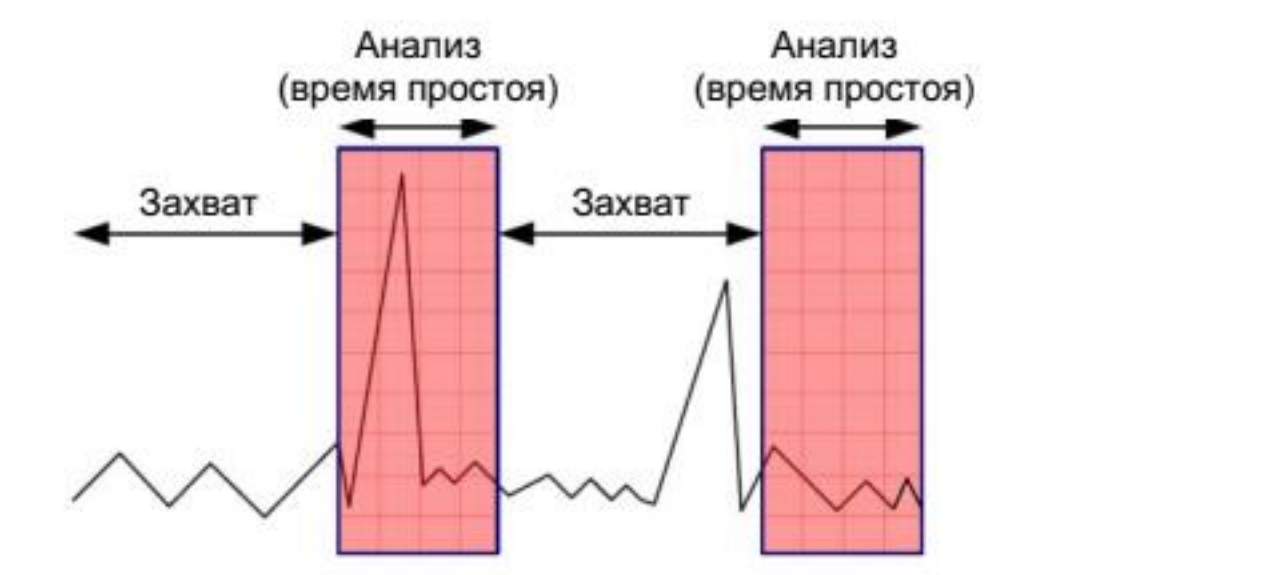


Портативные анализаторы спектра реального времени серии H500/SA2500

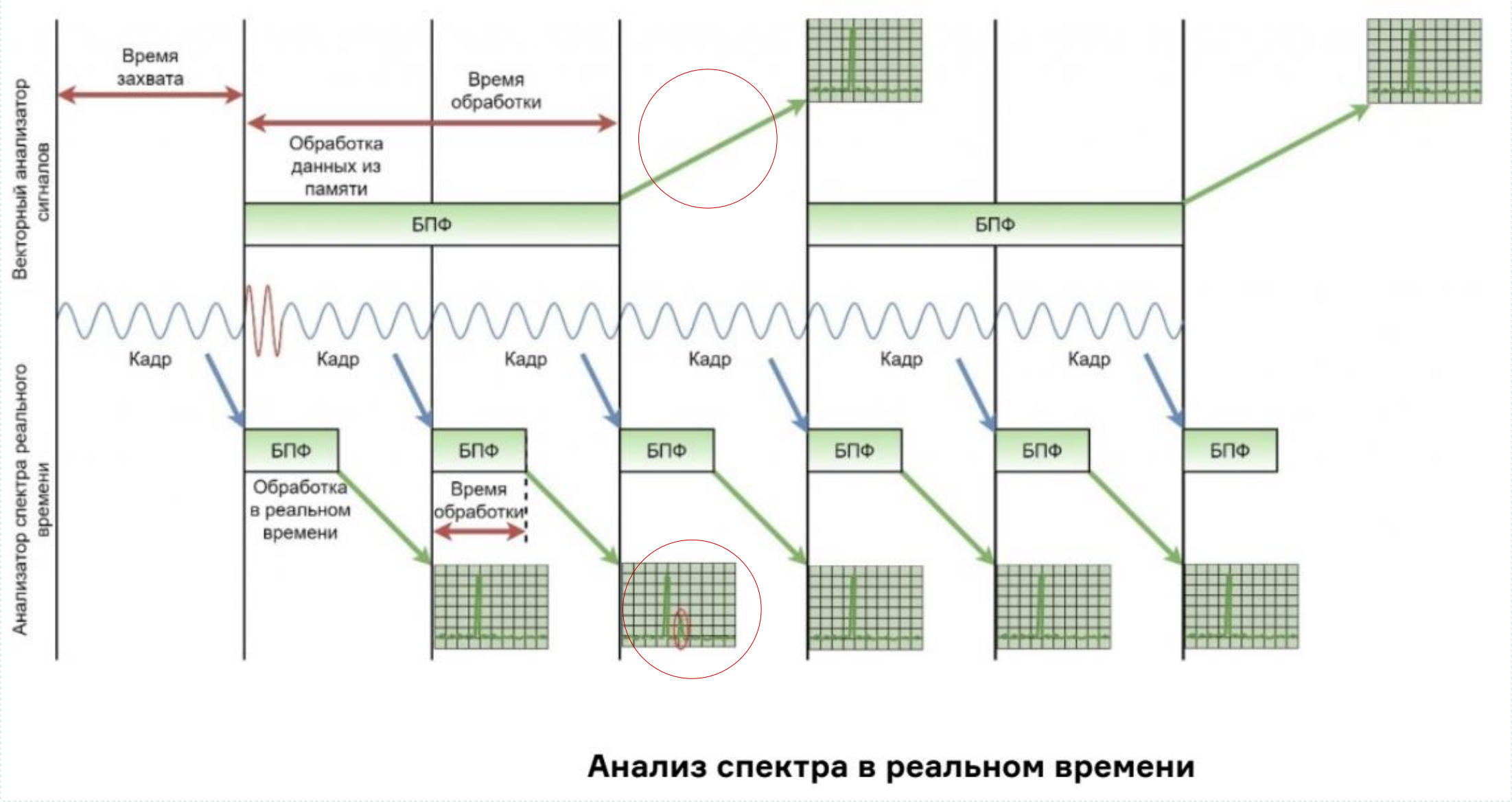


Анализатор спектра Tektronix USB RSA507A

«Мертвое» время при последовательном БПФ-анализе спектра в широкой полосе частот



Захват сигнала - накопление отсчетов сигнала в течение некоторого отрезка времени. Затем – расчет спектра – в это время захват сигнала не производится. Спектроанализаторы реального времени не имеют «мертвого» времени за счет широкой полосы захвата и каскадной обработки полученных данных. Полоса захвата - важный параметр АС. В современных АС - сотни МГц и даже 1 ГГц



Анализ спектра в реальном времени

Сверху- Традиционный АС с БПФ (есть «мертвое время»).
Снизу – работа в реальном времени без потери информации

Анализатор спектра реального времени Tektronix RSA 6100

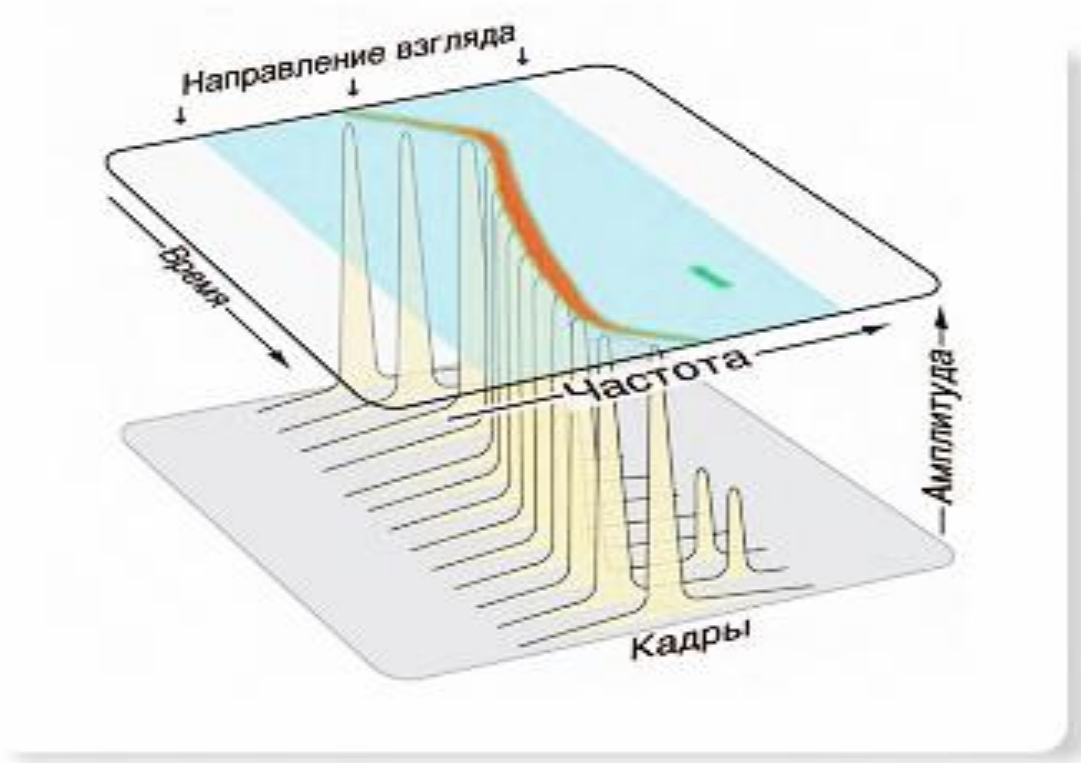


Рис. 1-10. Отображение спектрограммы

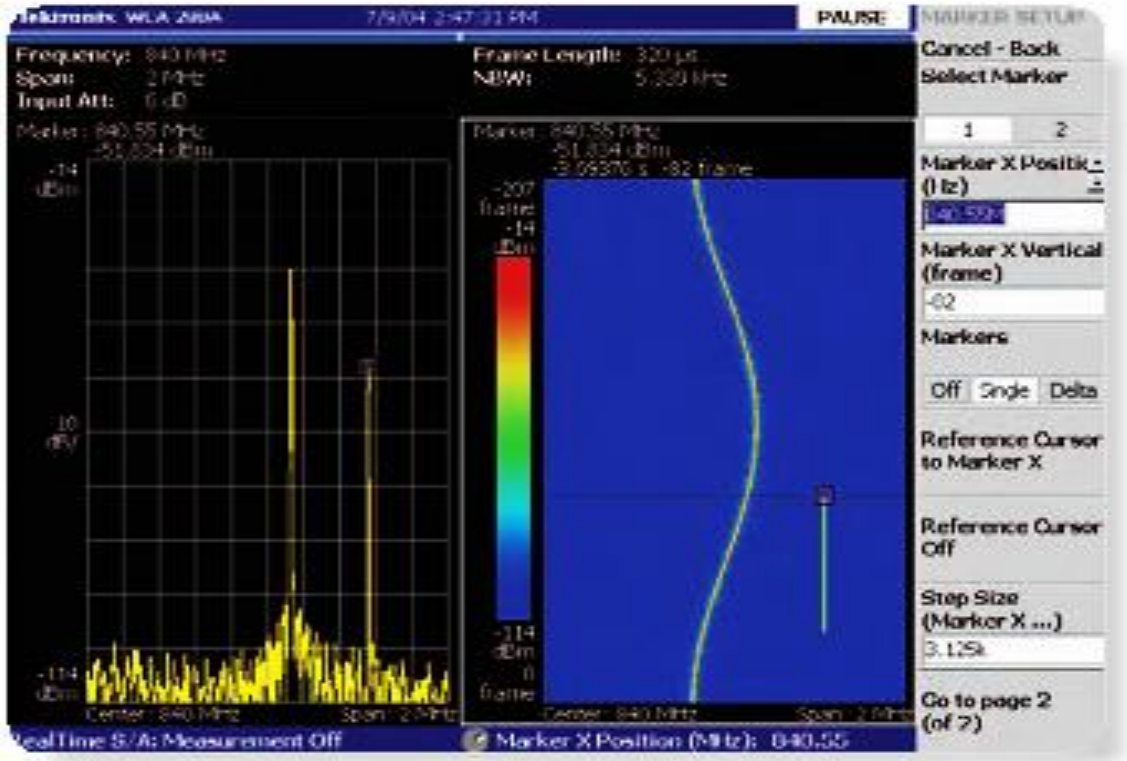


Рис. 1-11 Синхронные представления: зависимость мощности от частоты (слева) и спектрограмма (справа)

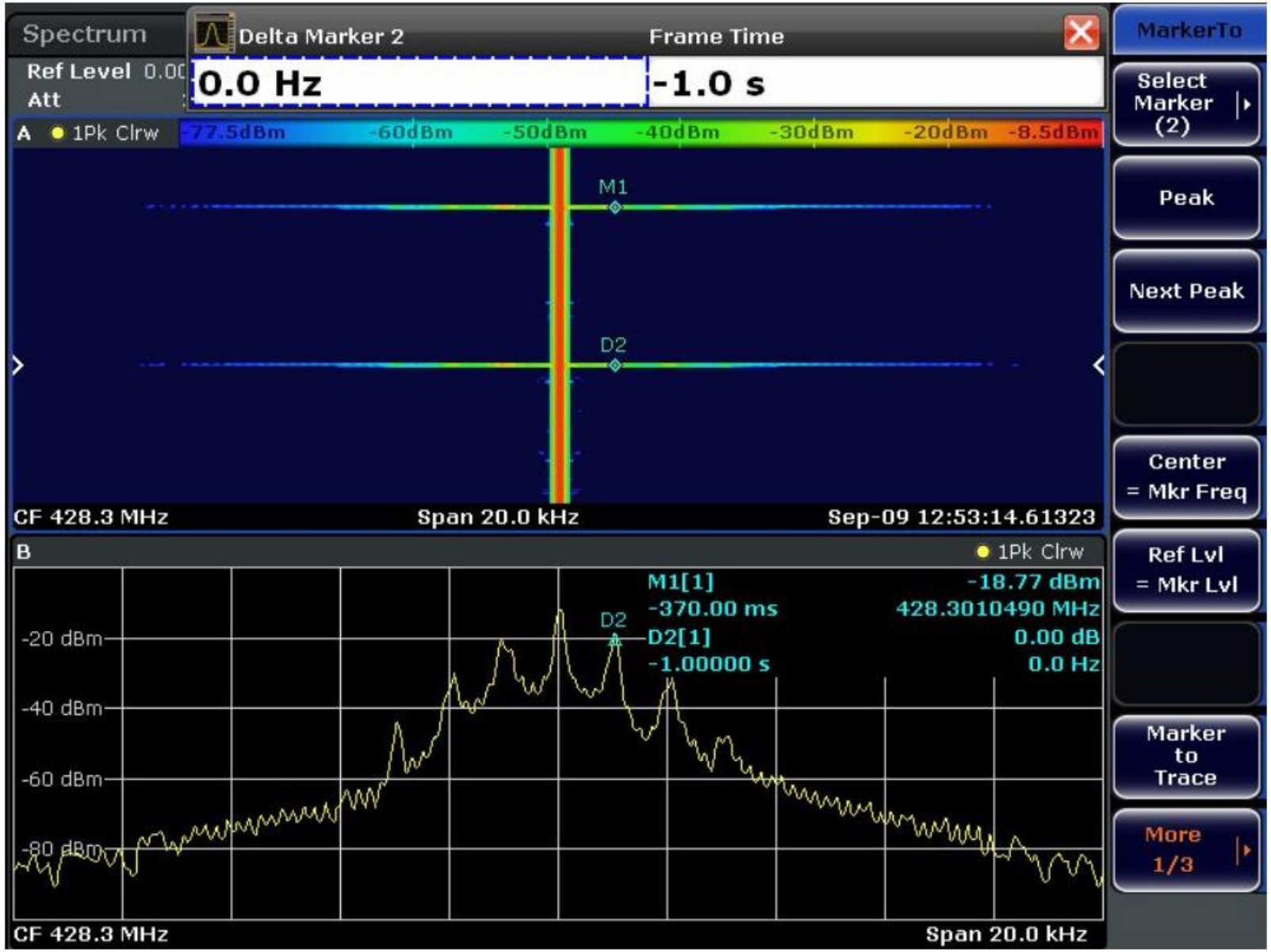


Рисунок 16 – Временное измерение в режиме экрана, разделенного на спектрограмму и спектр в реальном масштабе времени

Вывод текущего спектра в координатах «частота-время - уровень»..
Перестройка по частоте – ступенчатое переключение полосы анализа БПФ .
График временной спектрограммы называют «водопад» (Waterfall) Третья координата - цветовая шкала уровней.

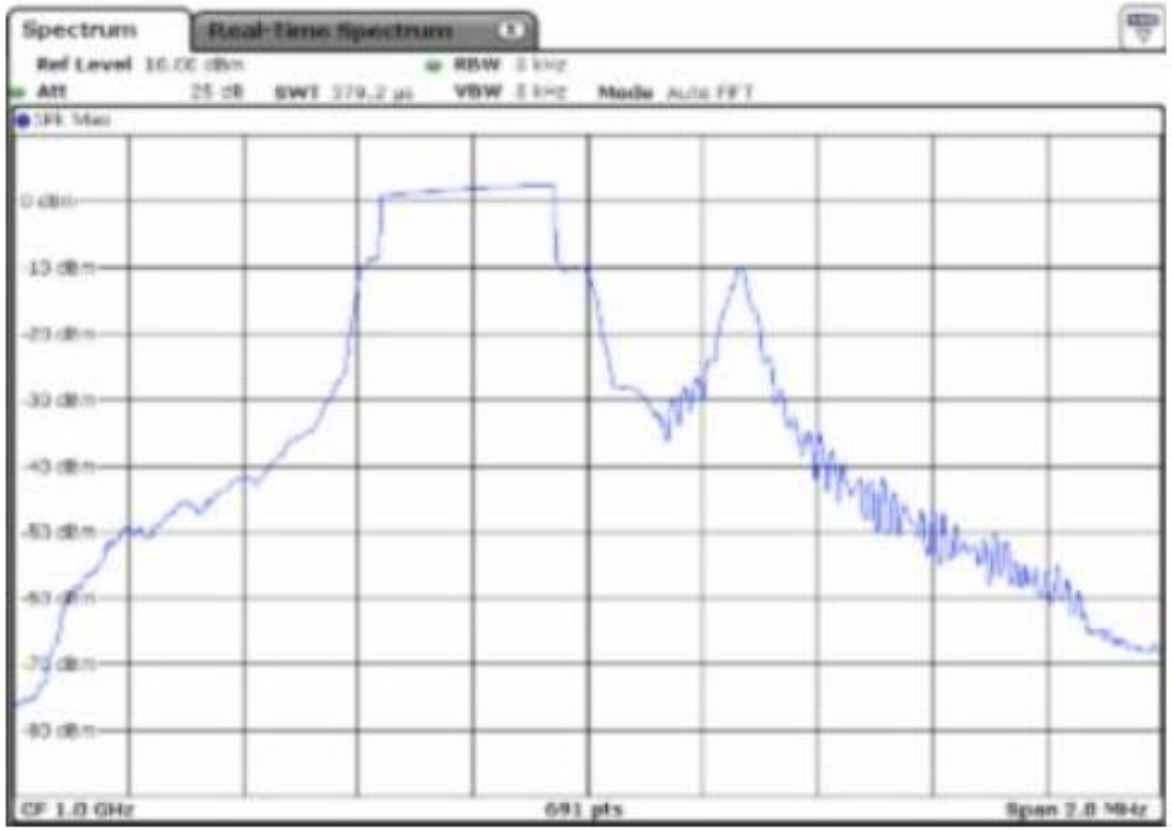
Возможный набор цветовых схем:

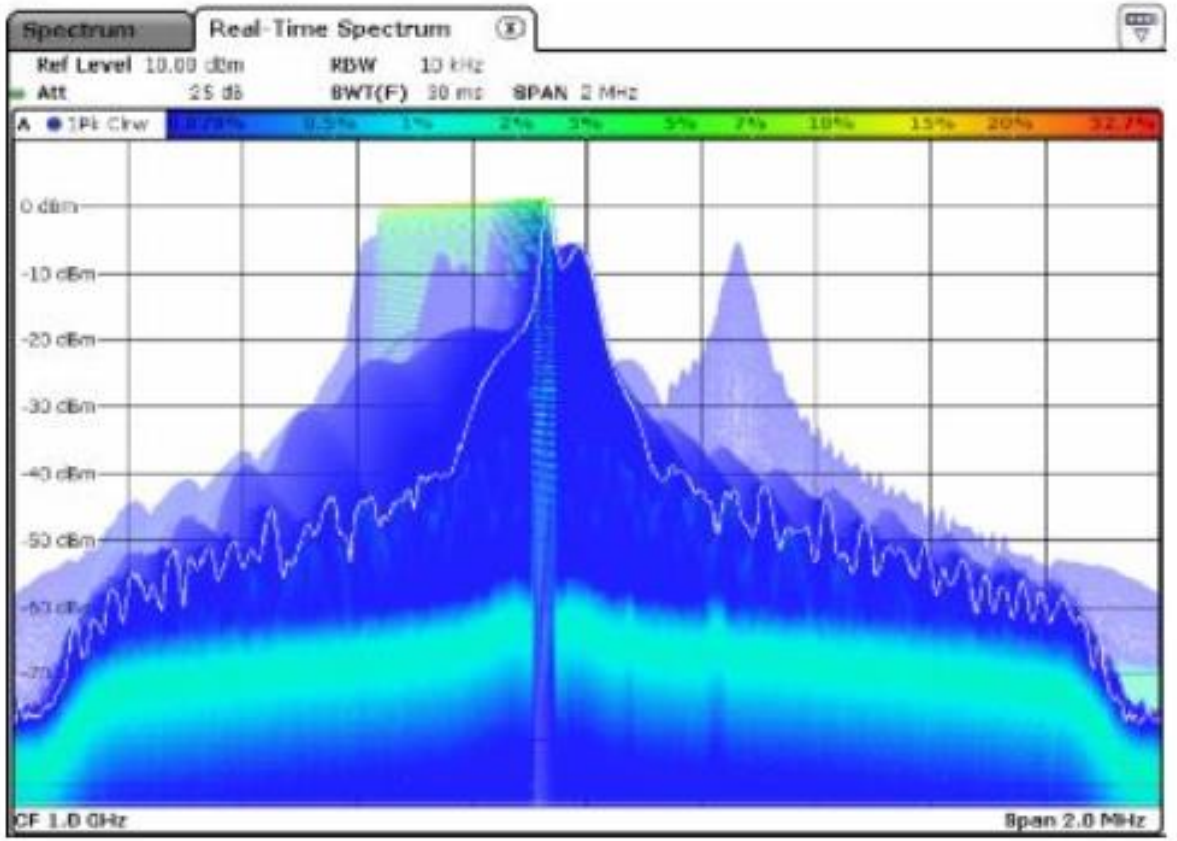
"Hot" (теплая) отображает результаты во всем диапазоне от синего цвета (низкие уровни) до красного цвета (высокие уровни).

"Cold" (холодная) отображает результаты в том же диапазоне, но с обратными значениями.

"**Radar**" отображает результаты от черного до полного диапазона зеленых оттенков, от темно- до светло-зеленого.

"Grayscale" отображает результаты в виде оттенков серого. Темные цвета соответствуют низким уровням, светлые – высоким.





Другой способ вывода: дисплей в режиме «послесвечения» (Digital Phosphor) . На дисплее справа – наложение спектрограмм в различные моменты времени (накопление совпадающих точек) отражается цветом – от холодного в теплому в зависимости от числа совпадающих пикселей. На графике наблюдаются особенности изменения сигнала со временем, тогда как кривая зафиксированных максимальных значений (слева) такой информации не дает.

Сравнение спектрограмм обычного АС и анализатора спектра реального времени Tektronix RSA 6100. Режим DPX – Digital Phosphor Display

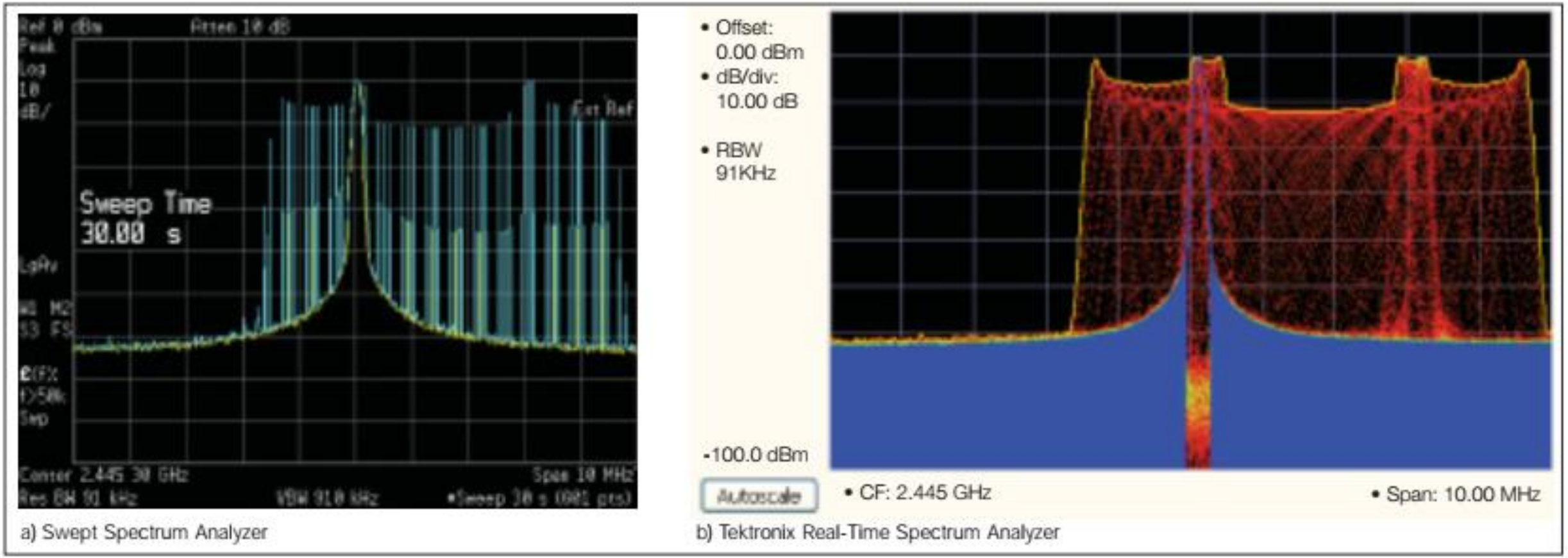
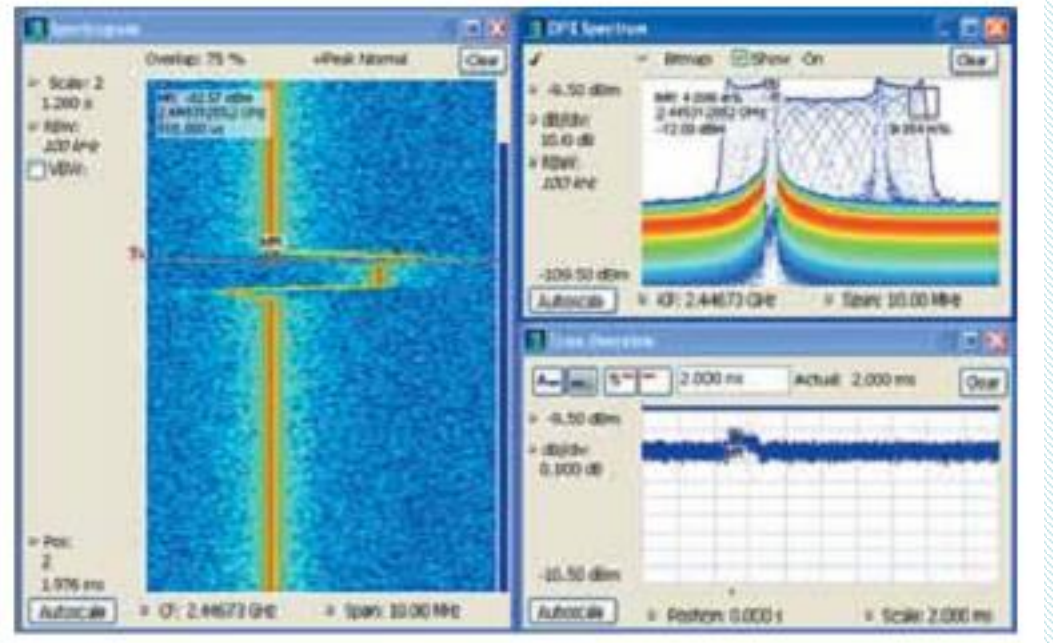
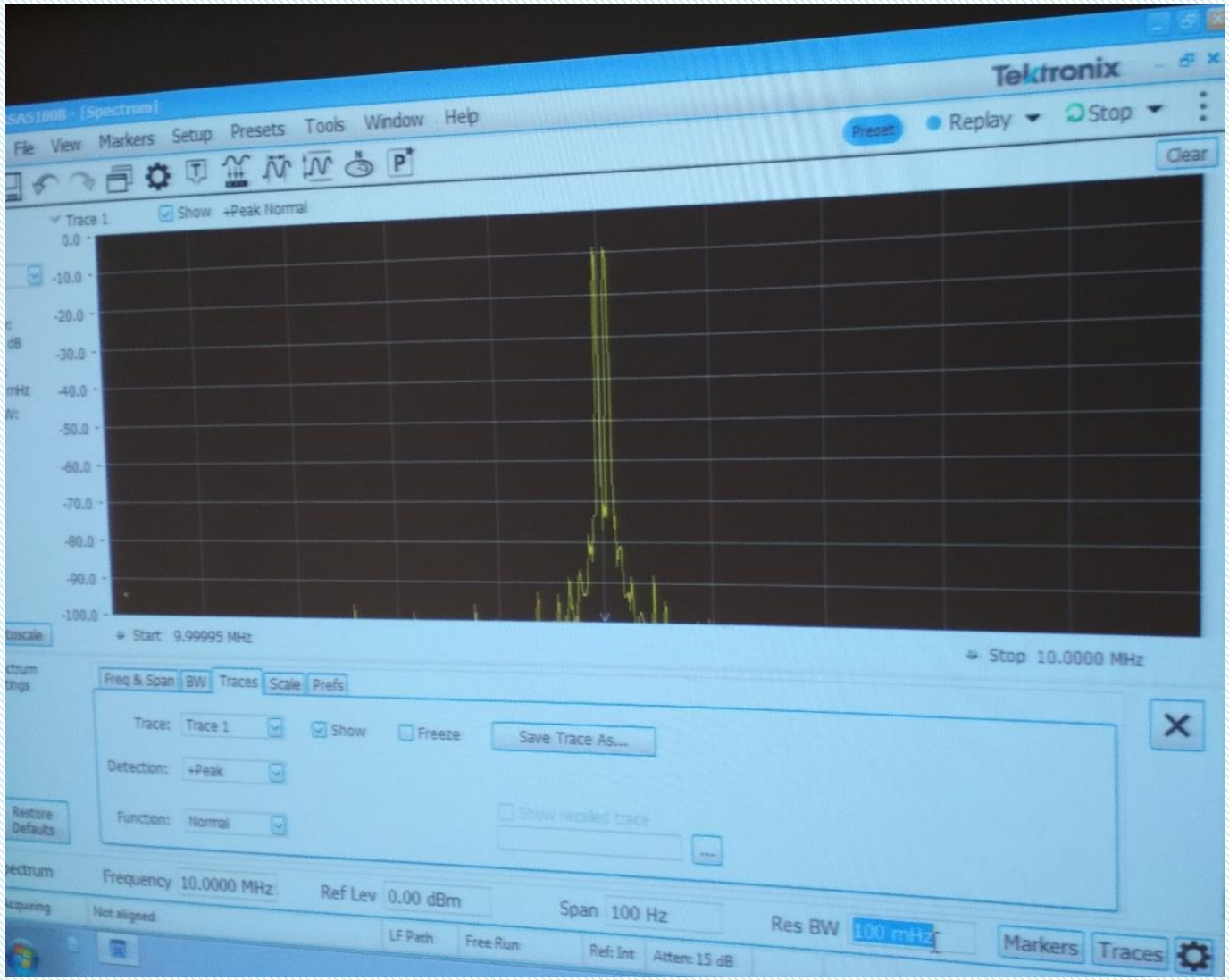


Figure 2-20 a, b. Comparison (a), Swept Spectrum Analyzer MaxHold trace after 120 seconds and (b), Tektronix Real-Time Spectrum Analyzer with DPX bitmap MaxHold trace after 20 seconds.

Анализатор спектра реального времени Tektronix RSA 5126





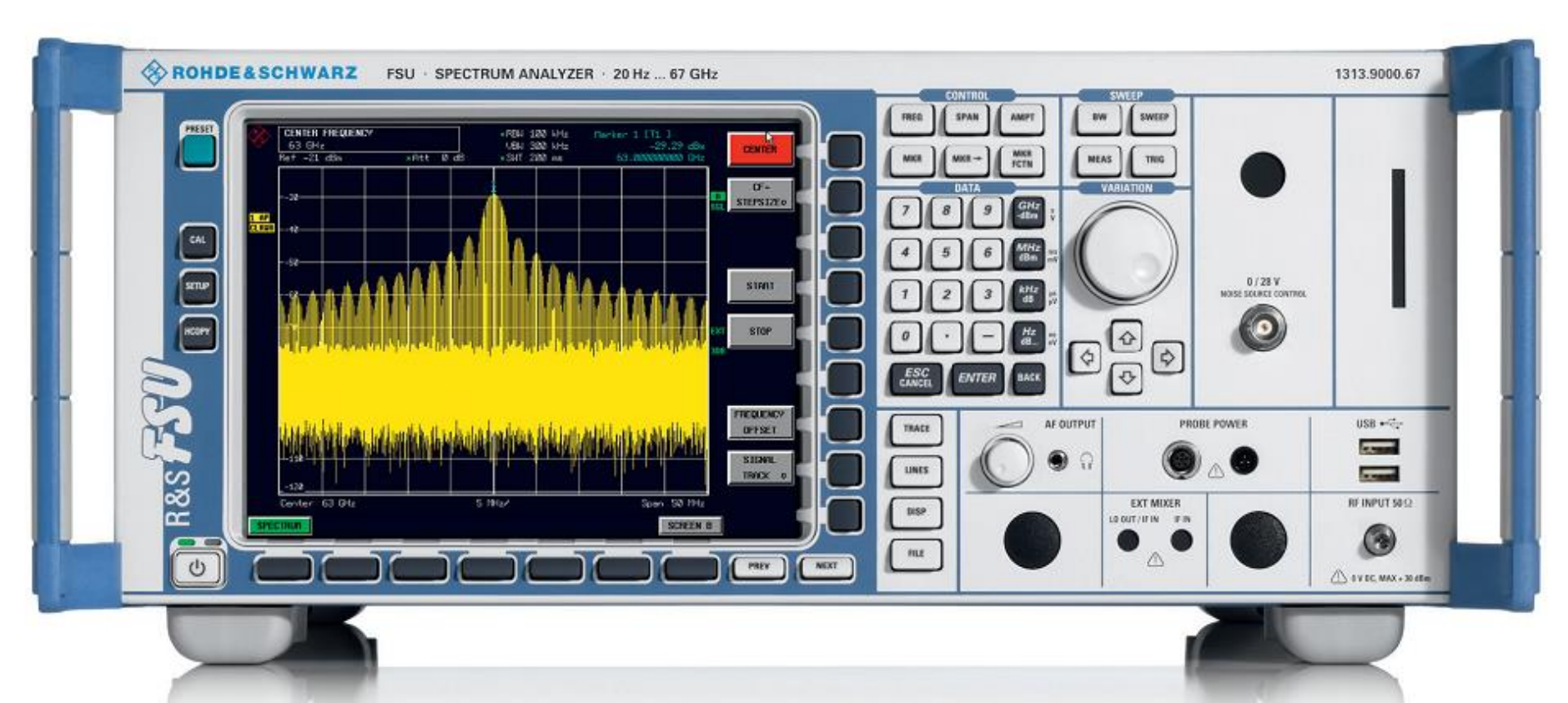


Базовые модели анализаторов спектра R&S

Family concept



Анализатор спектра R&S®FSU



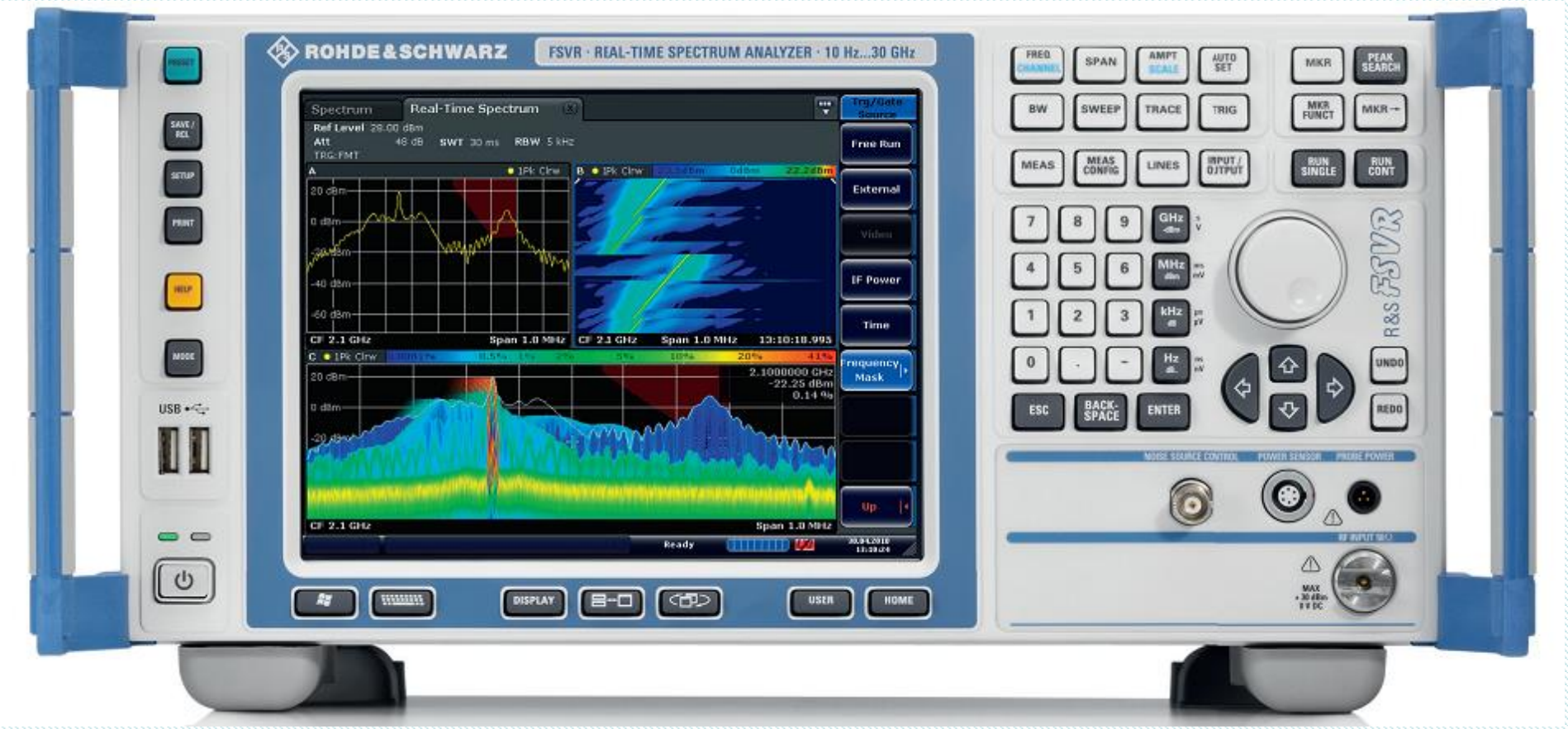
Frequency range from 20 Hz to 3.6/8/26.5/43/46/50/67 GHz
Low phase noise of –128 dBc (1 Hz), typ. –133 dBc (1 Hz) at 10 kHz carrier offset
DANL of –158 dBm (1 Hz)
Third-order intercept (TOI) of typ. +25 dBm
Resolution bandwidth from 1 Hz to 50 MHz

R&S®FSMR Measuring Receiver



Frequency range up to 3/26.5/43/50 GHz High level linearity: 0.005 dB deviation per 10 dB.
Wide level measurement range from +30 dBm to –130 dBm Connection of R&S®NRP power sensors for precise power measurements
Modulation analyzer for AM/FM/φM Audio analyzer with total harmonic distortion (THD) and SINAD measurement

R&S®FSVR Real-Time Spectrum Analyzer



Frequency range from 10 Hz to 7/13.6/30/40 GHz. Spectrum with persistence function

- Spectrogram display
- Display of power versus time

Full-featured signal and spectrum analyzer for GSM/EDGE, WCDMA/HSPA+, LTE, WiMAX™, WLAN, analog and digital modulation, noise figure and phase noise measurements

R&S®ZVH , R&S®FSH3/FSH18 Cable and Antenna Analyzer,





Анализатор сигналов и спектра R&SR&S®FPS



Диапазон частот до 4/7/13,6/30/40 ГГц, Полоса частот для анализа сигналов до 160 МГц
Погрешность измерения уровня 0,4 дБ на частотах до 7 ГГц
Фазовый шум –110 дБн (1 Гц) при отстройке 10 кГц
Измерительные приложения для стандартов GSM / EDGE ,WCDMA/HSPA+, LTE, WLAN, векторный анализ сигналов

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

