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 1

**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)*

# Введение

**Санкт-Петербург**
**2025 г.**

# *“Измерения на СВЧ "*

Дисциплина читается:

**для магистров** ФРТ по направлениям подготовки :

- 11.04.01 «Радиотехника»,
- 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

(1 курс 1 семестр магистерской подготовки, 24 часов лекций, 24 часов лабораторных работ)

**для специалистов** ФРТ по направлениям подготовки :

- 11.05.01 –«Радиоэлектронные системы и комплексы» по специализации «Антенные системы и устройства» (4 курс, 8 семестр, 18 часов лекций, 36 часов практических занятий,16 часов лабораторных занятий ).

Является основой для подготовки:

- аспирантов по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи» (18 час лекции и лаборатория);
- слушателей института непрерывного образования (ИНО СПб ЛЭТИ) («Радиоэлектронные измерения в диапазоне СВЧ», 36 час лекции и лаборатория )

Ведущие преподаватели:

- доцент каф. ТОР, к.т.н., Данилин Александр Алексеевич
- ст. преподаватель каф. ТОР Воскресенский Дмитрий Михайлович

# Список лабораторных работ:

1. ***Исследование частотных характеристик фильтров СВЧ***
2. ***Скалярный измеритель АЧХ СВЧ устройств***
3. ***Исследование балансного СВЧ-смесителя***
4. ***Измерение параметров транзисторного усилителя СВЧ***
5. ***Исследование электрически управляемых СВЧ-аттенюаторов на PIN диодах***
6. ***Измерение параметров ферритовых СВЧ-устройств***
7. ***Исследование генератора СВЧ, управляемого напряжением***
8. ***Измерение параметров диэлектриков на СВЧ***
9. ***Автоматический анализатор параметров СВЧ цепей Agilent E5062A***
10. ***Калибровка анализатора цепей СВЧ UVNA-63***

Лаборатория СВЧ измерений - 1 корпус , 3 этаж , а. 1334

# Основная литература-1




1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб.пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с




2. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ:Учеб.пособие для вузов.- М.:Радиотехника, 2008.-184с
( Шифр библиотеки ЛЭТИ З 842/ Д18 )




3. Воскресенский Д.,М., Данилин А.А., Сосновский В.А. Измерения на СВЧ:лаб. Практикум /Под. ред. А.А.Данилина.- Спб.: Изд.СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.- 112с.

# Основная литература-2




4. Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике/Учеб пособие. – СПб.: Издательство Лань, 2017. - 408с.




5. Лавренко Ю.Е., Грачев С.В. Устройства СВЧ: конспект лекций - Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. -92с




6. Дансмор Д.П. Измерения параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей – М.: Техносфера, 2018.-736с.

# Основная литература-3


7. Хибель М. Основы векторного анализа цепей –М.: Издательство МЭИ, 2009.- 500с
8. Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И. Микроволновая электроника: Учебник/ Под ред. А.Д. Григорьева. - Спб.: Издательство «Лань», 2016. – 496с
9. Нефедов Е.Н. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие для студентов ВУЗов, -М.: Издательский центр «Академия», 2009. - 384с
10. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная база./ Под. ред. А.М. Кудрявцева. – М.:Радиотехника, 2006.-208 с.
11. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные компоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: Техносфера, 2006 – 216с
12. Астайкин А.И., Помазков А.П., Щербак Ю.П. Метрология и радиоизмерения. Учебное пособие. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010.-405 с.

# Дополнительная литература-1

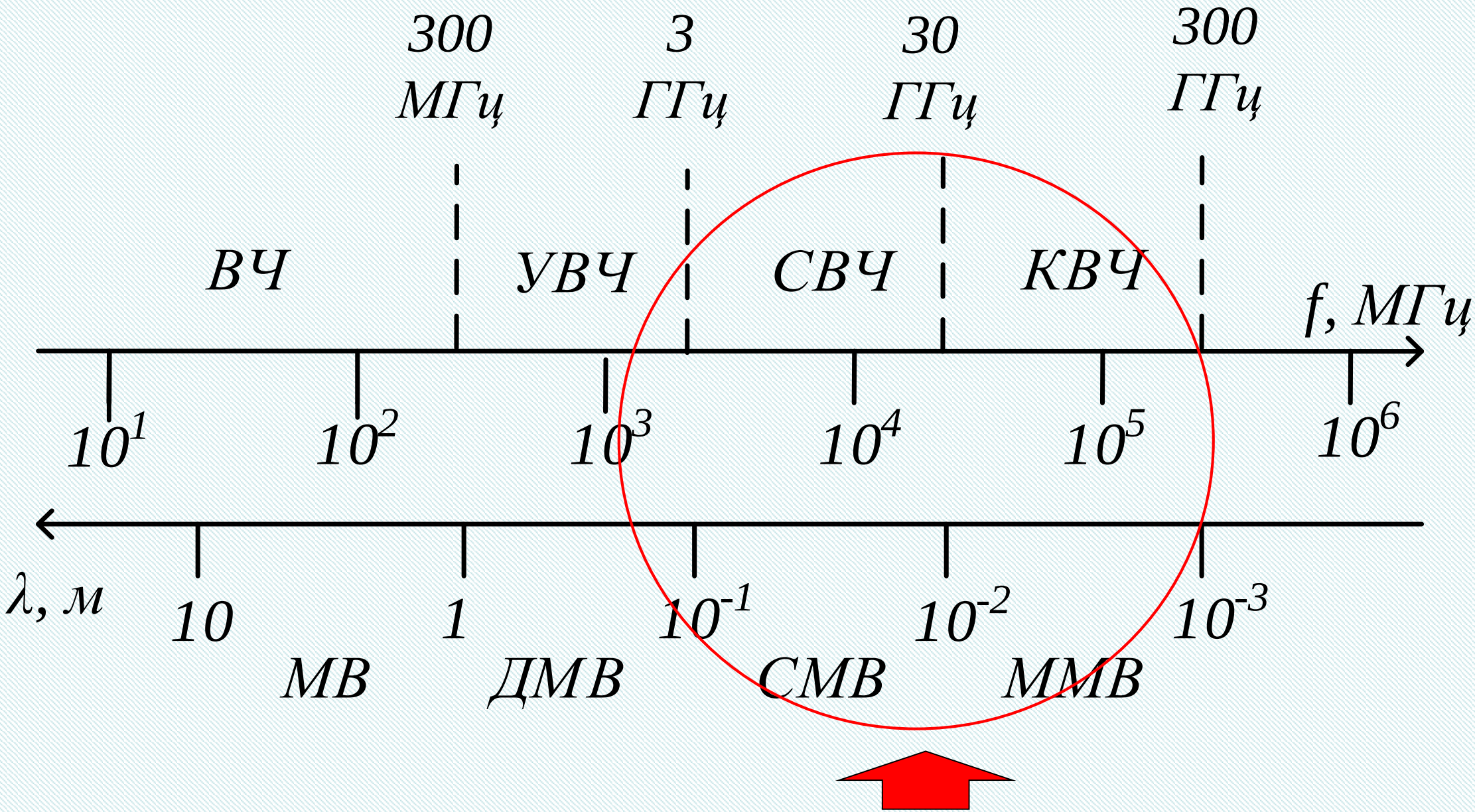

1. Андронов Е.В., Глазов Г.Н. Теоретический аппарат измерений на СВЧ: Т. 1. Методы измерений на СВЧ/ - Томск: 2010.-804с.
2. Астайкин А.И., Троцюк К.В., Ионова С.П., Профе В.Б. Теория и техника СВЧ. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. - 446 с.
3. Шаров Г.А. Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств. – М.: Горячая линия-Телеком, 2023.- 472с.
4. Векторные анализаторы  цепей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. /В.А.Богуш, А.В.Гусинский , Г.А.Шаров и др.-М.: Горячая линия-Телеком, 2010.-656 с.
5. Дингес С.И., Кочемасов В.И. Устройства преобразования частот. /Под ред. В.Н.Кочемасова  - М.: Горячая линия-телеком, 2023.- 432с.
6. Ченакин А.В., Горевой А.В. Практическое посроение синтезаторов частот СВЧ-диапазона.- М.: Горячая линия-телеком, 2023.- 280с.

## Дополнительная литература-2


7. Измерения в электронике. Справочник/Под ред. В.А. Кузнецова. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Стариков В.Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий. - М.: Сов.Радио, 1972.
9. Билько М.И. Измерение мощности на СВЧ. - М.: Сов.Радио, 1976.-168с.
10. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн/ И.Ф.Бурак, А.В.Гусинский, Г.А.Шаров и др.- М.: Горячая линия-Телеком, 2018.-328с.
11. Силаев М.А. Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. - М.: Сов.Радио, 1970.
12. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. - М.: Радио и связь. 1987.-432с.
13. Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазона волн. - М.: Радио и связь, 1986.
14. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова , 1988

# Особенности радиоэлектроники СВЧ

***Техника СВЧ*** – раздел радиоэлектроники, использующий область частот, для которых длина волны *соизмерима* с размерами используемых объектов: (устройств, приборов, линий передачи и пр.) Это частоты от 300МГц (длина волны 1м) до 300 ГГц (длина волны 1мм).



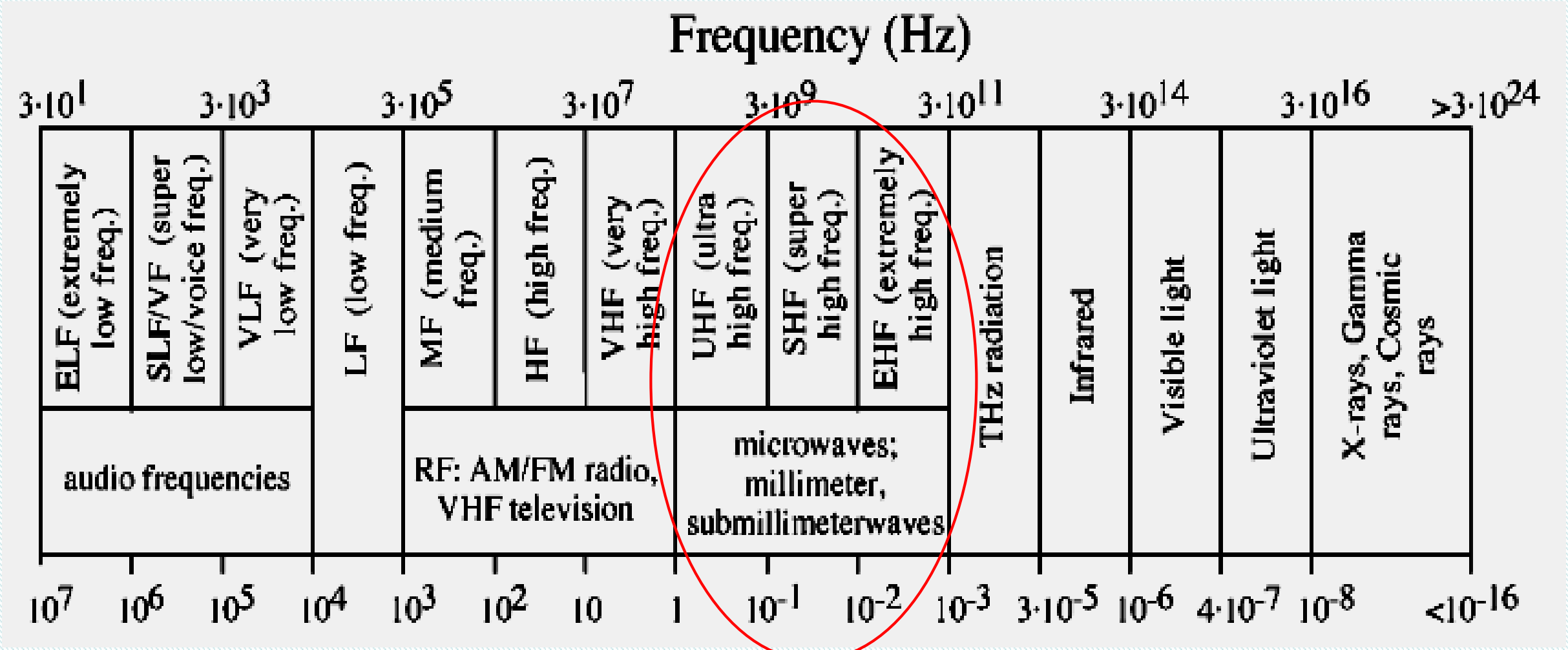

СВЧ и КВЧ –диапазоны

| Частотный диапазон, ГГц | Обозначение |
|---|---|
| 0.3 ..1.0 | UHF -band *ultra high frequency* |
| 1.0 …2.0 | L-band *Long* |
| 2.0 …4.0 | S-band *Short* |
| 4.0 …8.0 | C-band *Compromise* |
| 8.0 …12.4 | X-band |
| 12.4 …18.0 | Ku-band *under K* |
| 18.0 …26.5 | K-band *нем. kurz - «короткий»* |
| 26.5 … 40.0 | Ka-band *above K* |
| 40.0 … 75.0 | V-band |
| 75.0… 110.0 | W-band |

# Международные и отечественные обозначения диапазонов ВЧ и СВЧ

**метровые** волны - очень высокие частоты (**ОВЧ**) - от 30 до 300 МГц,
**дециметровые** волны и ультравысокие частоты (**УВЧ**) - от 300 до 3000 МГц,
**сантиметровые** волны и сверхвысокие частоты (**СВЧ**) - от 3 до 30 ГГц,
**миллиметровые** волны и крайне высокие частоты **(КВЧ**) - от 30 до 300 ГГц,
**децимиллиметровые** волны и гипервысокие частоты (**ГВЧ**) - от 300 до 3000 ГГц

# Области использования электромагнитных волн




СВЧ –диапазон

# Преимущества СВЧ-диапазона

- На СВЧ  высокая  информационная емкость канала связи при том же отношении сигнал-шум,
- С увеличением частоты возрастает направленность антенн, так как она зависит от отношений диаметра антенны к длине волны.
- Атмосфера имеет малое затухание диапазоне СВЧ;
- Минимум шумов атмосферного, космического и искусственного происхождения в диапазоне 1-10 ГГц;
- Ряд веществ эффективно поглощает СВЧизлучения – СВЧ нагрев, сушка  и плавка

# Области техники, где используется СВЧ-радиоэлектроника

- Радиолокация – первая исторически и до сих пор наиболее важная область применения колебаний СВЧ.
- Радиорелейная связь, обеспечивающая передачу телефонных, телевизионных каналов и профессиональной информации
- Кабельная связь
- Космическая связь, то есть передача больших объемов информации через спутники связи
- Радионавигация.
- Радиоастрономия
- Радиоразведка и радиоконтроль.
- • Экспериментальная физика (нагрев и диагностика плазмы, молекулярная спектроскопия газов, жидкостей и твердых тел.
- Медицина и биология

# *Методы анализа и проектирования устройств СВЧ*

- *прикладная электродинамика, ТЭД* (классическая электродинамика, численные методы расчета и моделирования, электродинамика антенных устройств)
- методы *цепей СВЧ* (декомпозиция до малых блоков, связанных линиями передачи, расчет параметров отдельных блоков, матричное объединение всех блоков, синтез СВЧ устройств)
- методы *измерительной СВЧ техники* – измерение параметров отдельных блоков для последующего расчета матрицы всего устройства, окончательный контроль параметров всего устройства

# Особенности радиоизмерений на СВЧ -1

1. Проблемы при подключении измерительной аппаратуры к иссл. устройству. Использование концепции *измерительного тракта*.
2. Возможность излучения из отверстий и щелей. Сложность измерений полей внутри устройств.
3. Требование согласования в соединительных линиях передачи.
4. Неоднозначность отсчета напряжения и тока в волноводах;
5. Необходимость измерения новых параметров (матрицы рассеяния, КСВ, коэффициента отражения и пр.)
6. Сложность генерации тестовых сигналов большого уровня в широком диапазоне частот

# Особенности радиоизмерений на СВЧ -2

7.Сложности усиления измерительных сигналов => приходится работать с малыми сигналами в присутствии шумов и помех

8.Ограниченный выбор невзаимных устройств, необходимых для согласования в измерительном тракте => требуется учитывать взаимодействие источников сигналов и нагрузок

9.Частотные ограничения традиционных средств измерения (ЭЛО, ЭСЧ, АС и пр.)

***Следствие*-> *многообразие* принципов, методов и средств измерений в диапазоне СВЧ, требуется теоретический анализ методов измерений СВЧ**

# Виды радиоизмерений в диапазоне СВЧ

1. Измерения внешних параметров устройств СВЧ (элементов матрицы рассеяния)
2. Исследование высокодобротных резонансных структур СВЧ диапазона
3. Измерение параметров различных материалов в широком диапазоне частот.
4. Исследование формы сигналов СВЧ диапазона => стробоскопические или – реже – скоростные осциллографы;
5. Анализ спектров на СВЧ - спектроанализаторы последовательного типа;
6. Измерение частоты СВЧ сигналов резонансным способом или методом дискретного счета с преобразованием частоты
7. Измерение фазового сдвига и ФЧХ СВЧ устройств - фазометры СВЧ с преобразованием частоты или фазовые детекторы СВЧ;
8. Измерение средней и импульсной мощности СВЧ сигналов - широкополосные ваттметры с терморезисторными, термоэлектрическими и диодными датчиками;

# Классификация радиоизмерительных приборов

ГОСТ 15094-86 -> обозначение прибора включает:

- ***подгруппу***: буквы русского алфавита, определяют характер измерений и вид измеряемых величин;
- ***вид:*** цифры (от 1 до 9), обозначающие тип измерительного прибора;
- ***номер:*** (через дефис) - порядковый номер модели прибора

***Модернизированный*** прибор - добавляется русская буква в алфавитном порядке (например, *В7-65А*); конструктивное отличие - дополнительная цифра через дробь (например, *В7-65/1*); многофункциональные приборы - дополнительная буква "К" (например, *СК6-13*).

# Основные подгруппы СВЧ приборов по ГОСТ 15094-86

| П/гр | Наименование подгруппы |
|---|---|
| **Г** | Генераторы измерительные |
| **Д** | Аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений |
| **М** | Приборы для измерения мощности |
| **П** | Приборы для измерения напряженности поля и радиопомех |
| **Р** | Приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными |
| **С** | Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра |
| **Ф** | Приборы для измерения фазового сдвига и группового времени запаздывания |
| **Х** | Приборы для наблюдения и исследования **характеристик** радиоустройств |
| **Ч** | Приборы для измерения частоты и времени |
| **Э** | Измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов |

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**

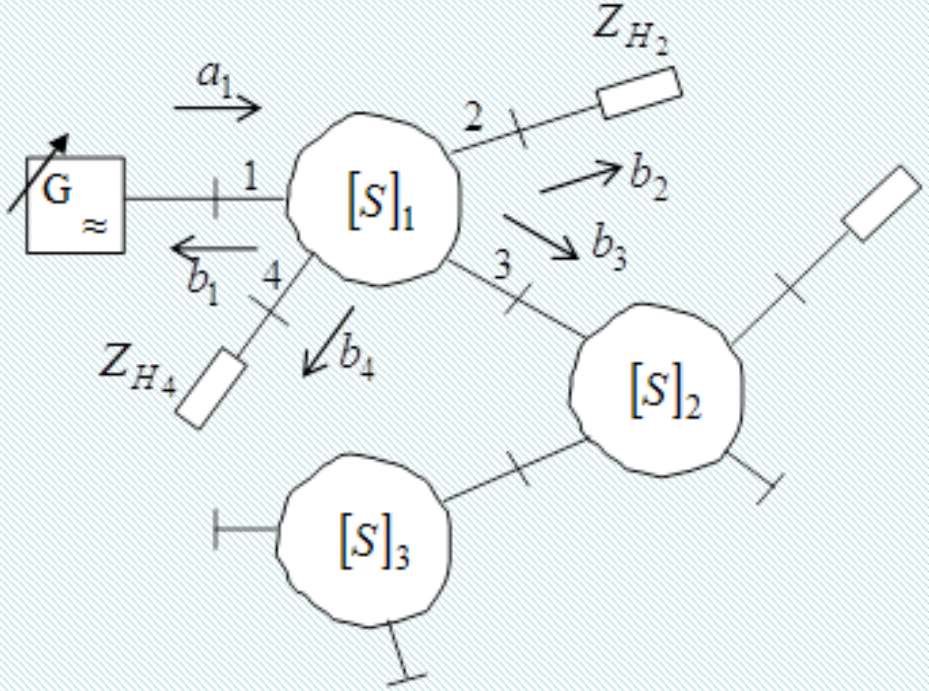
***А.А. Данилин***

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

# ПАРАМЕТРЫ РАССЕЯНИЯ СВЧ УСТРОЙСТВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

**Санкт-Петербург**
**2025 г.**

# Волновые матрицы СВЧ устройств




2N-полюсник (N-портовый узел)

$$\begin{cases} b_1 = s_{11}a_1 + s_{12}a_2 + \ldots + s_{1N}a_N \\ b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2 + \ldots + s_{2N}a_N \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ b_N = s_{N1}a_1 + s_{N2}a_2 + \ldots + s_{NN}a_N \end{cases}$$

Для характеристики свойств СВЧ устройств матрицей рассеяния используются *гармонические* сигналы!! Матричные элементы связывают *КОМПЛЕКСНЫЕ АМПЛИТУДЫ*!!! падающих и отраженных волн. Параметры рассеяния (коэффициенты рассеяния) были упомянуты Кэмбеллом и Фостером в 1920 г применительно к телефонным цепям; затем были использованы в задачах микроволновой техники и микроволновых линий передачи, в теории цепей СВЧ

# Волновые матрицы СВЧ устройств-2

$$(S_{11}) \quad (one-port)$$

*Однопортовый* узел: матрица рассеяния содержит один элемент («СВЧ нагрузка»)

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \quad (two-port)$$

*Двухпортовый* узел («четырехполюсник») 2x2= 4 элемента

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \quad (three-port)$$

СВЧ тройник («шестиполюсник»): матрица содержит 3 x 3=9 элементов

**Многополюсник с N портами имеет матрицу с (N x N)= $N^2$ элементов**

# Нормировка волновых матриц рассеяния

Амплитуды *нормированных* суммарных напряжений и токов в линиях передачи: **U=a+b**; **I=a-b**;

Нормировка амплитуд волн :

$$P_{пад} = \frac{1}{2}|a|^2, P_{отр} = \frac{1}{2}|b|^2,$$

Размерность амплитуды волны:

$$B/\sqrt{Ом} = \sqrt{Вт}$$

***Параметры соединительных линий :***

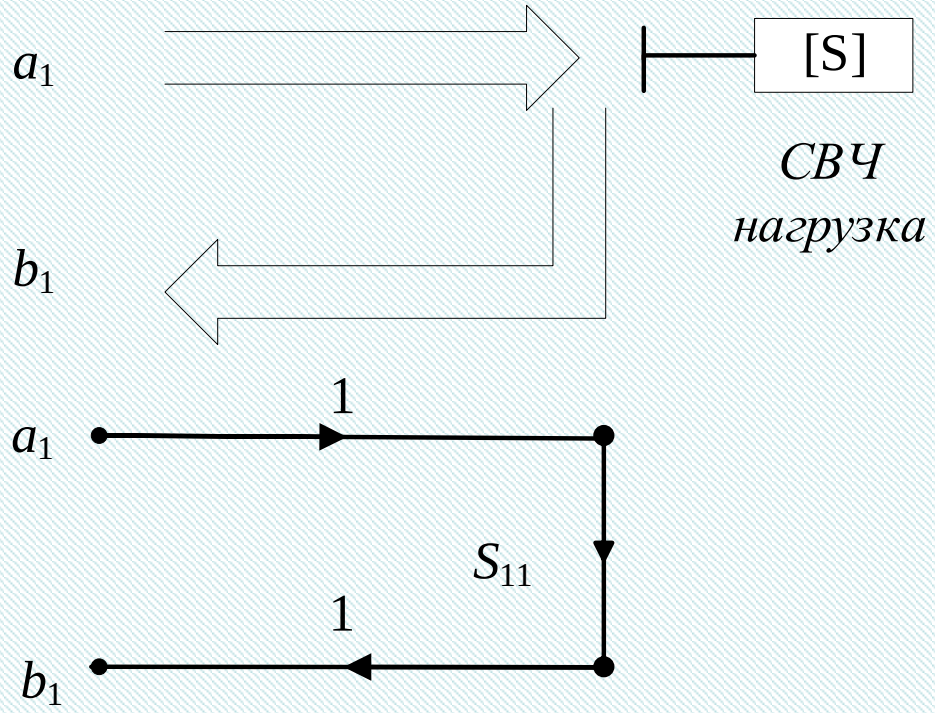
Волновое сопротивление - отношение напряжения к току для бегущей волны:

$$Z_0 = \frac{U}{I}$$

Электрическая длина линии передачи:

$$\theta = k_z \cdot L = \frac{2\pi}{\Lambda} L$$

# *Матрица рассеяния 1-портового узла («двухполюсника» или СВЧ нагрузки)*




$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \rho_н$$

**Коэффициент отражения нагрузки.**

***Нормированное сопротивление (проводимость ) нагрузки***

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

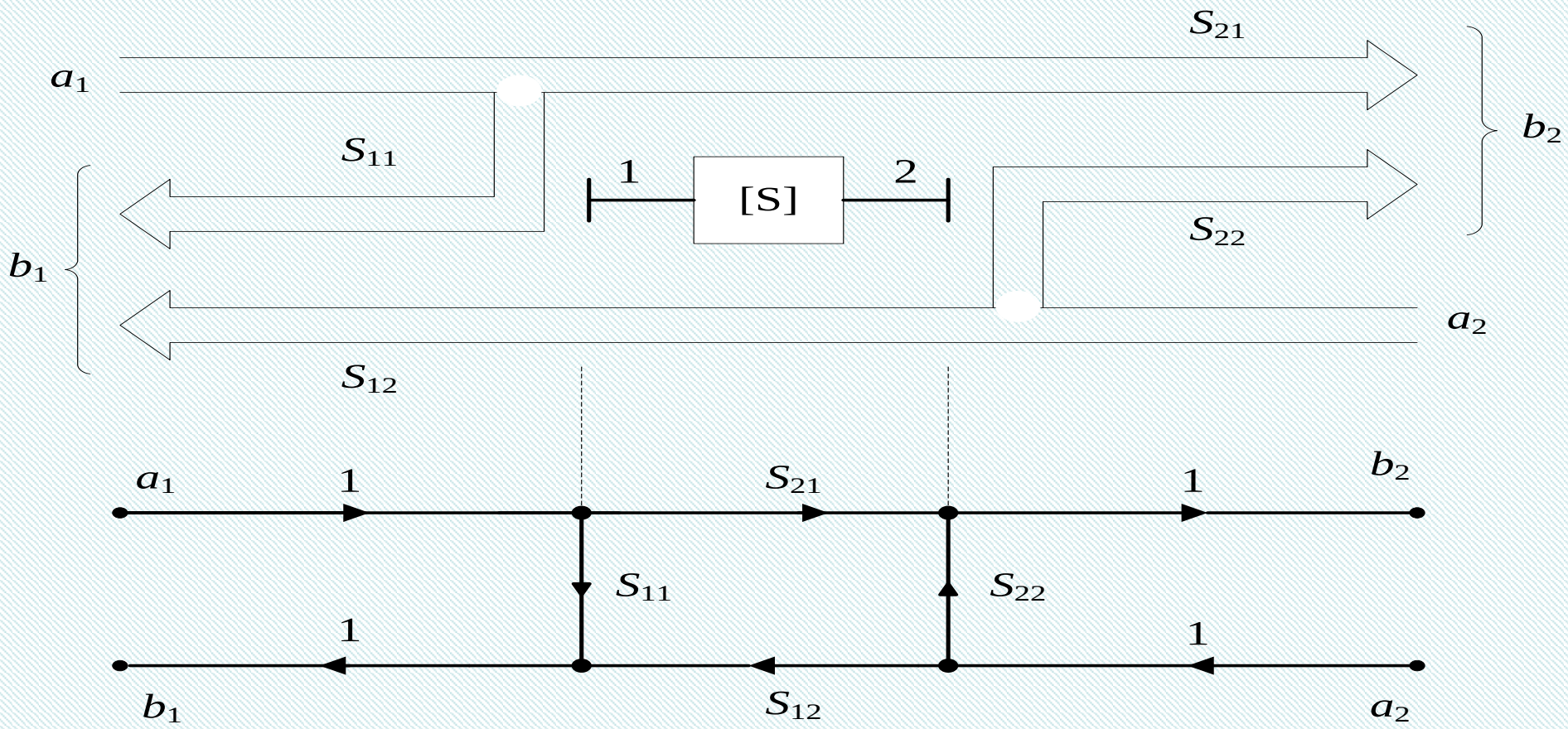
Рабочие параметры: ***КСВН*** (**VSWR —** [Voltage Standing Wave Ratio] ) – отн. ед [1…∞], дБ [0…∞]

$$КСВН = \frac{1}{КБВ} = \frac{1+|\rho_н|}{1-|\rho_н|}$$

Обратные потери (Return Loss)

$$RL = -20\lg(|\rho_н|)$$

# Матрица рассеяния 2х-портового узла




Рабочий параметр – ***ослабление*** $A, дБ = -20\lg|S_{21}| = 10\lg(\frac{P_1}{P_2})$

или ***вносимые потери***

# Физический смысл матрицы рассеяния 4х-полюсника

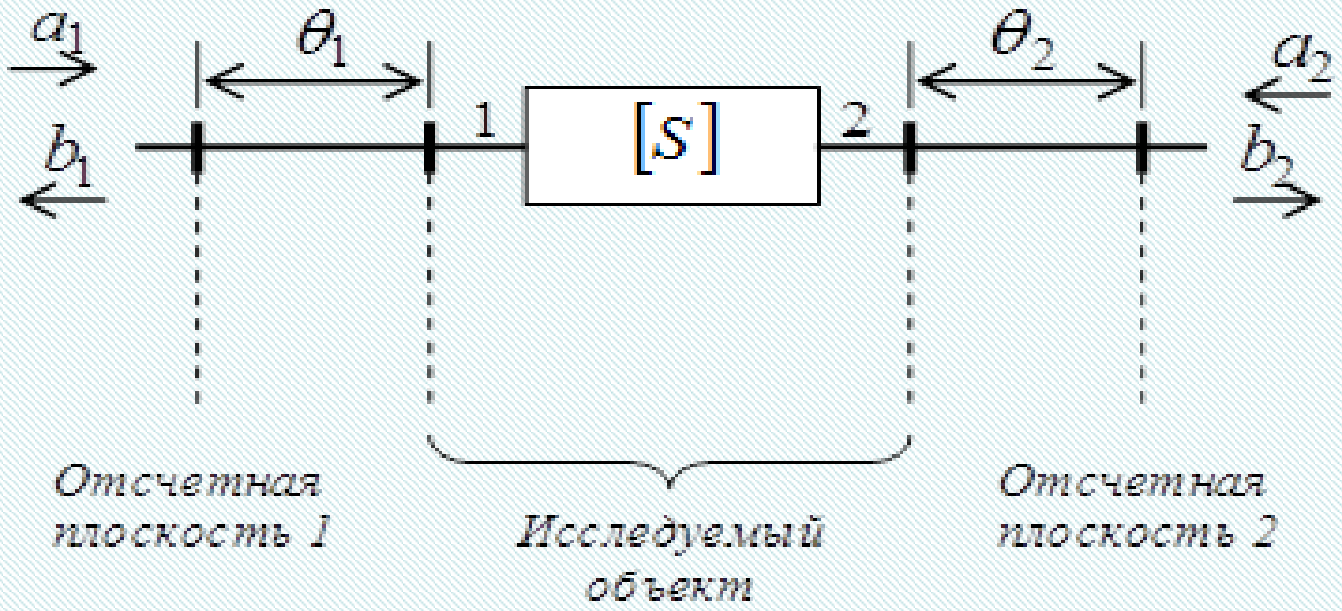
$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \Rightarrow S_{11} = \left.\frac{b_1}{a_1}\right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left.\frac{b_2}{a_2}\right|_{a_1=0}$$

$$S_{21} = \left.\frac{b_2}{a_1}\right|_{a_2=0} \quad S_{12} = \left.\frac{b_1}{a_2}\right|_{a_1=0} \Rightarrow$$

Для определения коэффициентов требуется согласование во **всех** портах (включая генератор).

***Метод измерения*** коэффициентов матрицы рассеяния (по определению): подаем падающую волну известной амплитуды в один (активный) порт и определяем комплексные амплитуды отраженных (рассеянных) волн во всех пассивных портах (***метод разделения волн***). Требуется обеспечить *нулевые* падающие волны на всех портах, кроме активного (согласование портов).

# Перенос отсчетных плоскостей матрицы рассеяния




Измерение амплитуд волн непосредственно на портах затруднительно. Это выполняют в отсчетных плоскостях линий передачи, отстоящих от портов на известные расстояния (электрические длины $\theta_1$ и $\theta_2$)

$$S_{ii} = \left(S_{ii}\right)_{изм} \cdot \exp(i \cdot 2\theta_i) \qquad S_{ij} = \left(S_{ji}\right)_{изм} \cdot \exp(i \cdot (\theta_i + \theta_j))$$

$$\theta_i = k_i L_i \quad , i = 1,2 \ldots N$$

# Преимущества волновых матриц по сравнению с матрицами Z,Y

- *Простой* физический смысл элементов матрицы.
- Относительно *легко* реализуются согласованные нагрузки при измерении коэффициентов отражения и передачи (для матриц Z и Y требуется обеспечивать КЗ и ХХ, в активных элементах они часто могут вызвать самовозбуждение и неустойчивость);
- Модуль коэффициентов *не меняется* при сдвиге отсчетной плоскости в подводящих линиях передачи;
- При изменении направления передачи матрица *не меняется*, надо только перенумеровать коэффициенты. Теряется понятия «вход-выход», вместо их – общее понятие «порт»
- Условия *геометрической симметрии* узла учитываются проще
- Использование направленных графов делает анализ СВЧ схем простым и наглядным

***Недостаток*** *матриц рассеяния* – сложность разделения падающих и отраженных волн

# Свойства матрицы рассеяния N- портового узла («2N-полюсника»)

Для N-портового СВЧ узла надо измерить $N^2$ комплексных чисел ($2N^2$ вещественных параметров). Когда можно *сократить* это число?

1.Свойство **взаимности** многополюсника записывается как равенство матрицы рассеяния и транспонированной $[S]=[S]^t$ (или Sij = Sji ). Это сокращает число измеряемых вещественных параметров с $2N^2$ до N(N+1) чисел;

2. Для N – портового устройства **без потерь** (реактивность) свойство эрмитового сопряжения матрицы дает связь модулей и аргументов

$$[S^t]^* \cdot [S] = [E] \Rightarrow \sum_{n=1}^{N} |S_{ni}|^2 = 1 \quad , \text{i} = 1 \ldots \text{N}.$$

$$\Rightarrow \sum_{n=1}^{N} (S_{ni} \cdot S_{nj}^*) = 0 \quad , \text{i} = 1 \ldots \text{N}, \text{j} = 1 \ldots \text{N}, \text{i} \neq \text{j}.$$

# Свойства матрицы рассеяния N- портового узла («2N-полюсника»)-2

Свойство реактивности N- портового взаимного узла *связывает модули и фазы* и сокращает число измеряемых комплексных параметров до значения:

$$\frac{(N+1)\cdot N}{2}$$

3. ***Симметрия*** устройства относительно центра (оси) узла дает равенство коэффициентов отражения в диагонали матрицы

$$S_{ii} = S_{jj}$$ , i =1…N, j=1…N, i ≠ j.

# Свойства матрицы 2-х портового узла («4х-полюсника»)-1

Всего в матрице четырехполюсника СВЧ 4 комплексных переменных (8 измеряемых параметров).

•В случае ***взаимных*** устройств коэффициенты передачи равны S12 = S21 и число измеряемых параметров сокращается до 6.

•Для устройств ***без потерь*** (реактивные цепи) матрица рассеяния представляет собой эрмитово-сопряженную матрицу .

$$[S^t]^* \cdot [S] = [E]$$

t- значок транспонирования, * - символ комплексного сопряжения, [E] – единичная матрица.

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1, \quad |S_{22}|^2 + |S_{12}|^2 = 1, \quad S_{11}^* \cdot S_{12} + S_{21}^* \cdot S_{22} = 0$$

# Свойства матрицы рассеяния 2-х портового узла («4х-полюсника»)-2

Эрмитово сопряжение матрицы ***взаимного реактивного*** 4х полюсника дает равенства модулей диагональных и недиагональных элементов:

$$|S_{11}| = |S_{22}|, \quad |S_{21}| = |S_{12}|,$$

Связь аргументов этих элементов:

$$\arg(S_{11}) + \arg(S_{22}) = \arg(S_{21}) + \arg(S_{12}) \pm \pi$$

*ИТОГ: Независимые параметры реактивного взаимного 4-х полюсника:*

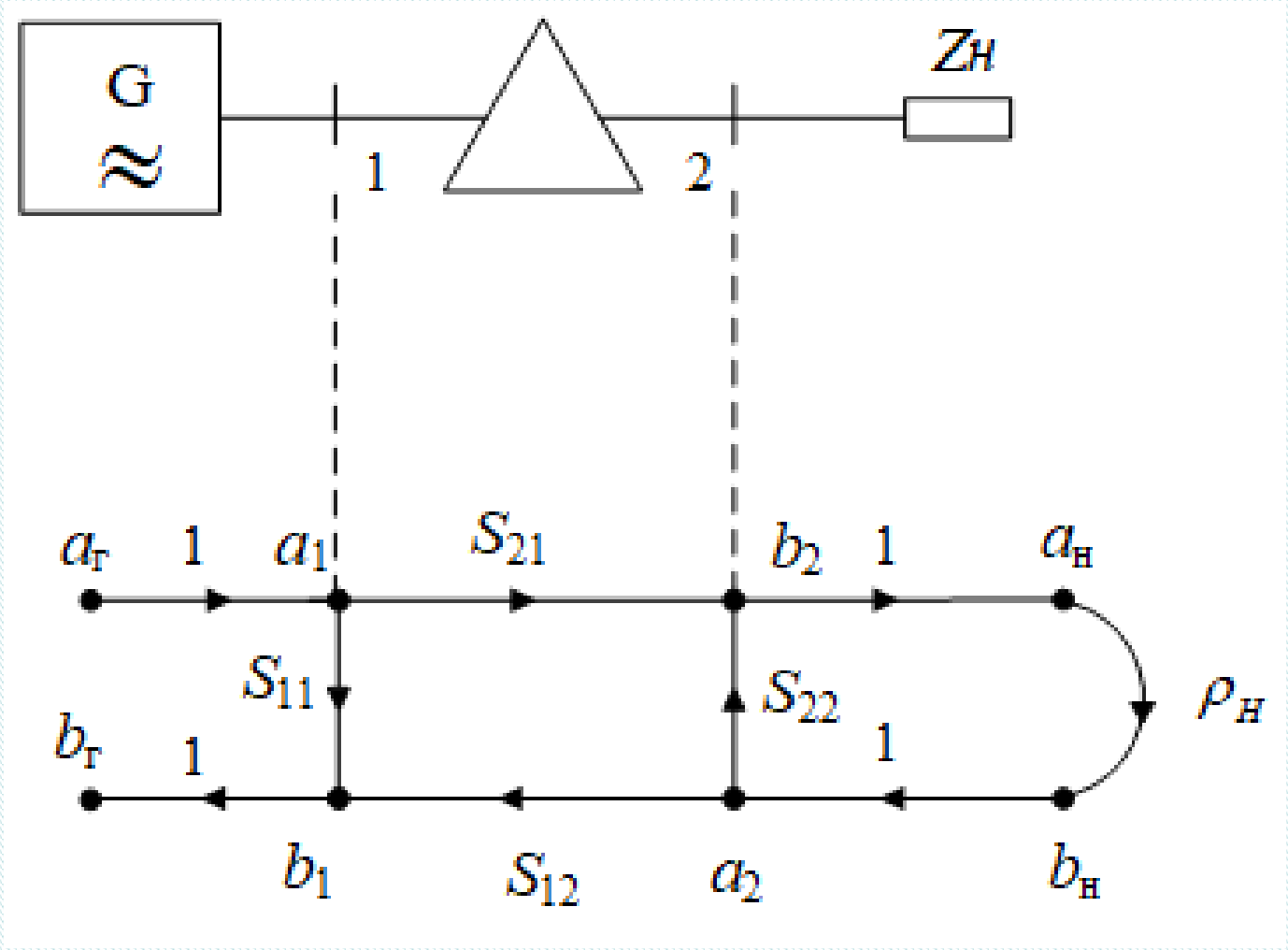
$$|S_{11}|, \quad \arg(S_{11}), \arg(S_{21}).$$

# Анализ СВЧ устройств с помощью направленных графов (потоковые графы)-1

***Направленный (ориентированный) сигнальный граф*** – это топологическое изображение зависимости между амплитудами волн на портах СВЧ устройств.

***Узлы -*** комплексные амплитуды падающих и отраженных волн.

Связь между амплитудами отражается ***ветвями***, соединяющими эти узлы (Значение ветви - элемент матрицы рассеяния).



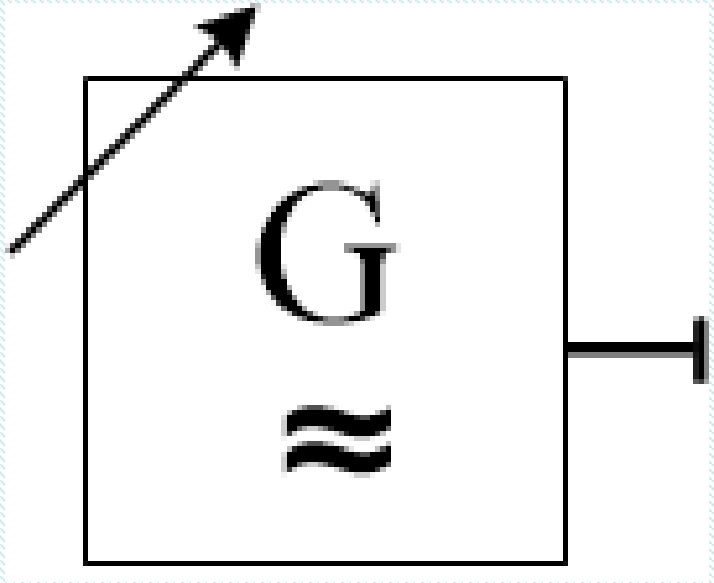
Узел может быть ***истоком (генератором)*** – из них ветви могут только исходить, и ***стоком (нагрузкой)*** – к ним ветви могут только подходить.

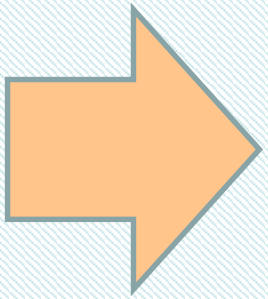
***Граф*** – это графический аналог системы линейных уравнений (СЛАУ) относительно амплитуд волн. Решение его –это поиск амплитуд волн в интересующих портах.

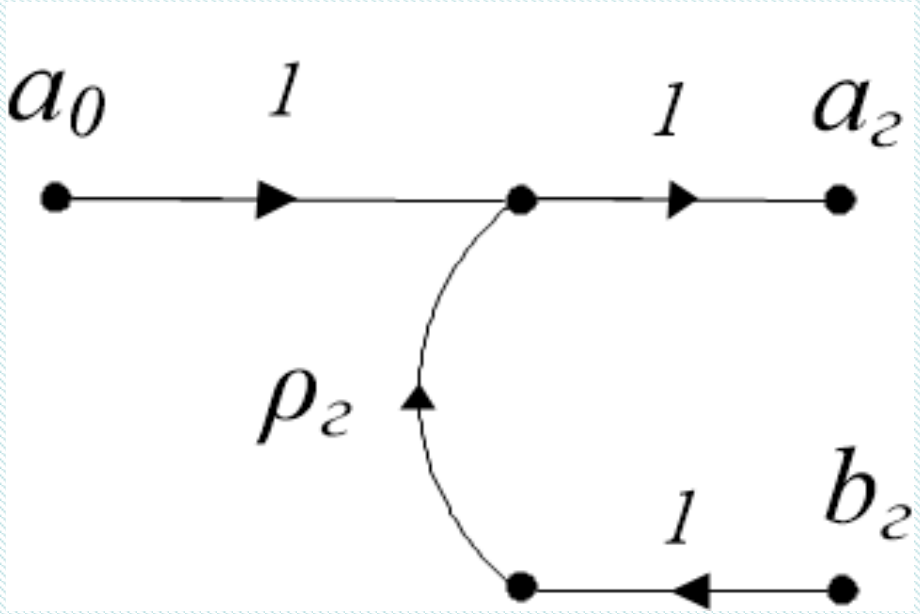
***Преимущества*** метода графов по сравнению с методом Гаусса для решения СЛАУ:

- Можно находить не все , а только необходимые переменные;
- Наглядность графического представления соотношений сигналов в устройстве
- Простота аналитических формул результата анализа.
- Легкость получения приближенных упрощенных формул для параметров измерительных трактов.

# *Направленные графы элементарных блоков измерительного тракта*

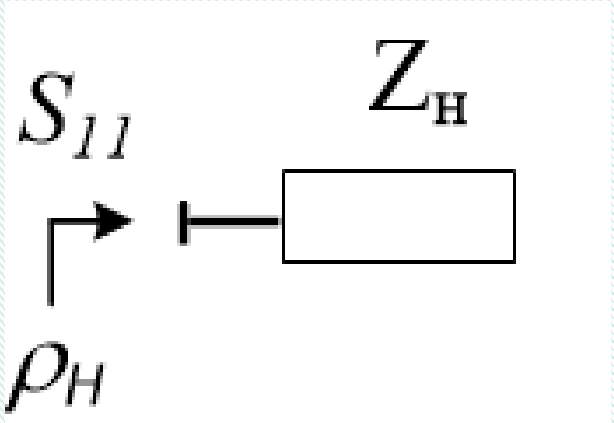


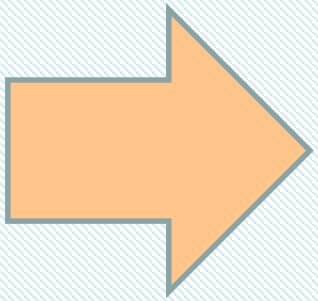



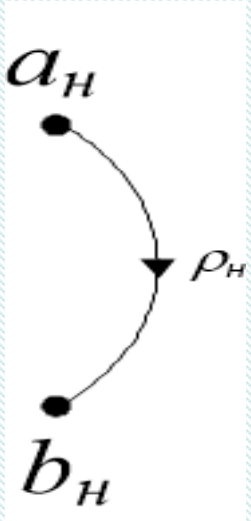



Граф реального источника сигнала – **рассогласованный генератор**

# Однопортовый узел (СВЧ нагрузка)






$$Z_н = \frac{1}{Y_н} = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}$$



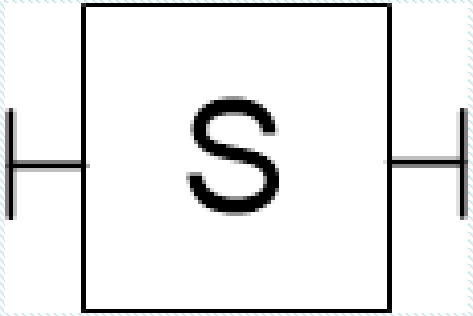
Нормированное сопротивление нагрузки (полное сопротивление нагрузки)

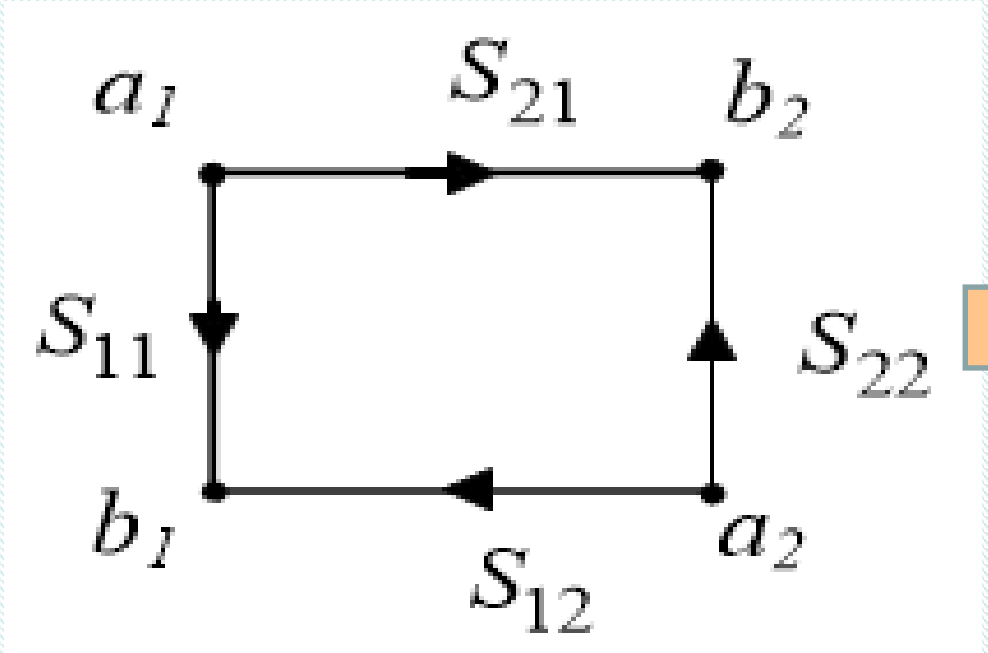
$$КСВН = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} = \frac{1}{КБВ}$$



Коэффициент стоячей волны – мера согласования нагрузок

# Двухпортовый узел (четырехполюсник)



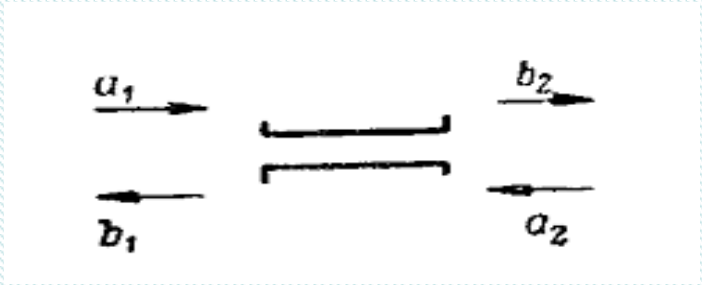



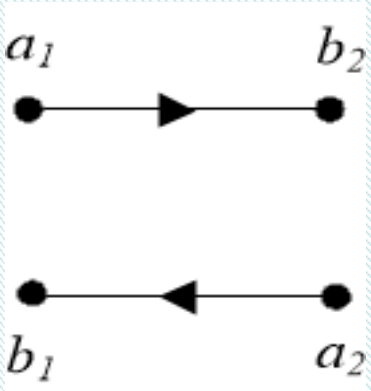

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$
$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

# Отрезок линии передачи

Линия передачи с электрической длиной $\Theta = \beta \cdot L = k_z \cdot L$

L – физическая длина линии, β – фазовая постоянная,
$k_z$ – постоянная распространения



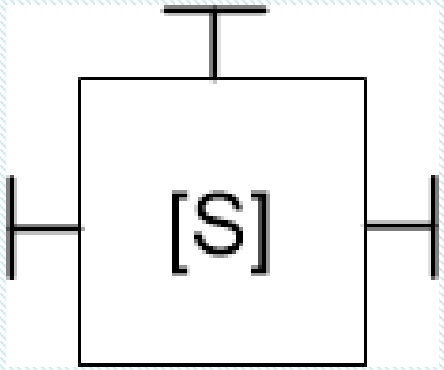



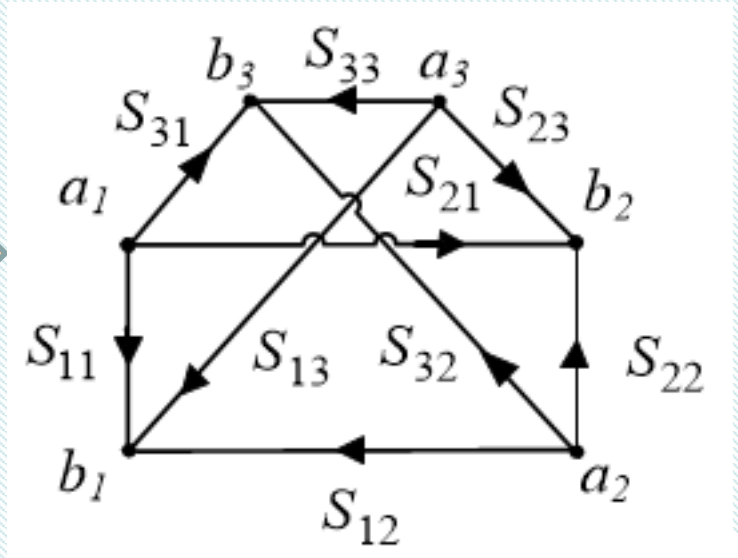

$$\begin{bmatrix} 0 & e^{-i\Theta} \\ e^{-i\Theta} & 0 \end{bmatrix}$$

Для линии с потерями
электрическая длина равна:

$$\Theta = (\beta - i\alpha) \cdot L$$

# Трехпортовый узел (шестиполюсник)



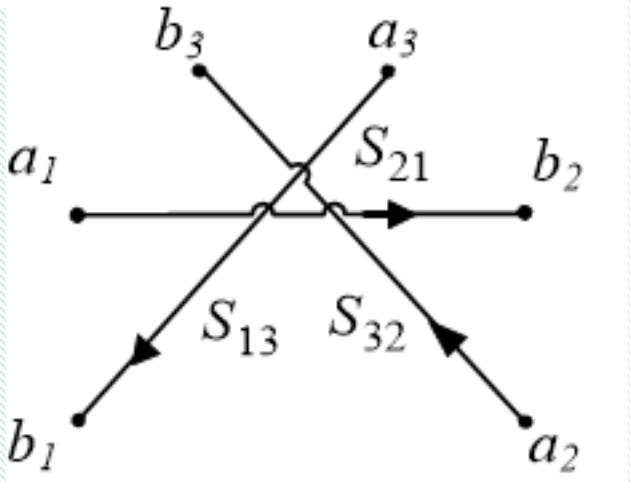




$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3$$

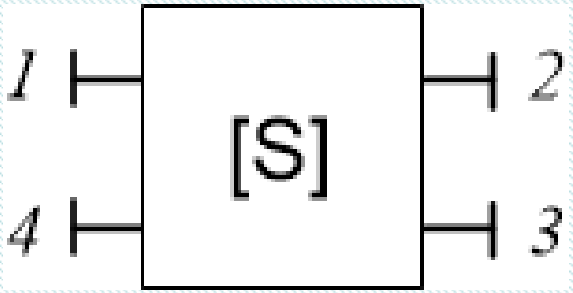
$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3$$

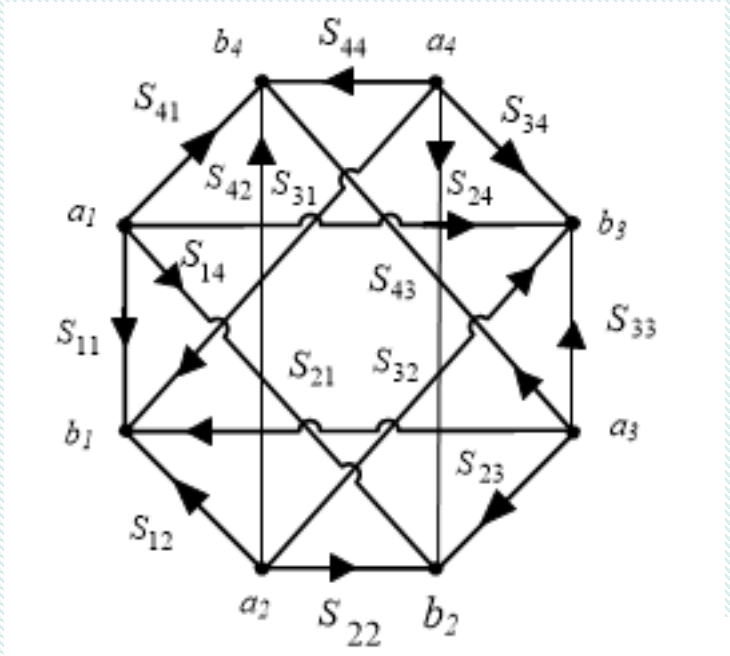
$$b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3$$

Граф циркулятора:



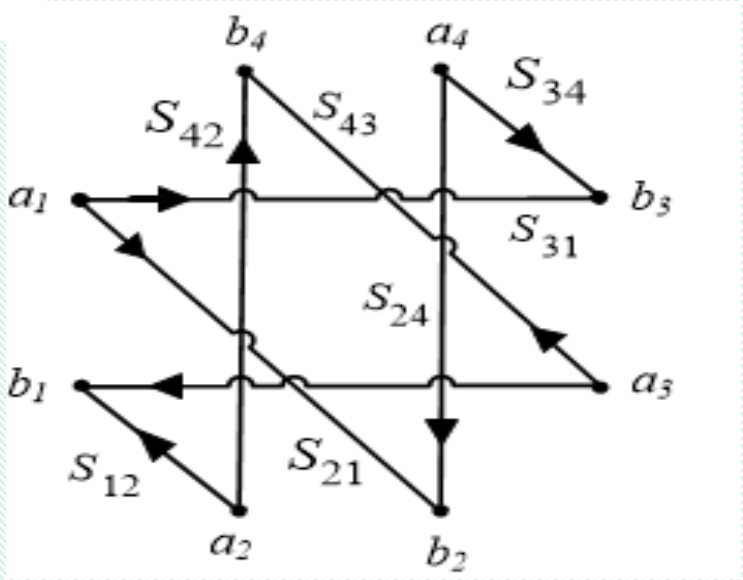
# Четырехпортовый узел (восьмиполюсник)



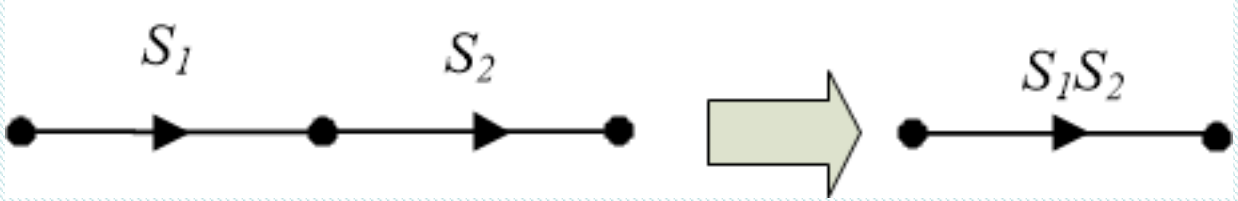

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 + S_{14}a_4$$
$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 + S_{24}a_4$$
$$b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3 + S_{34}a_4$$
$$b_4 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3 + S_{44}a_4$$

Граф идеального согласованного направленого ответвителя:

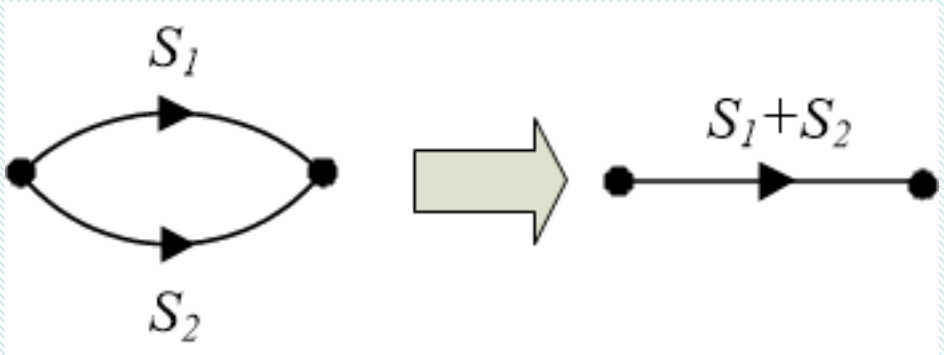


# *Упрощение графа путем исключения узлов*

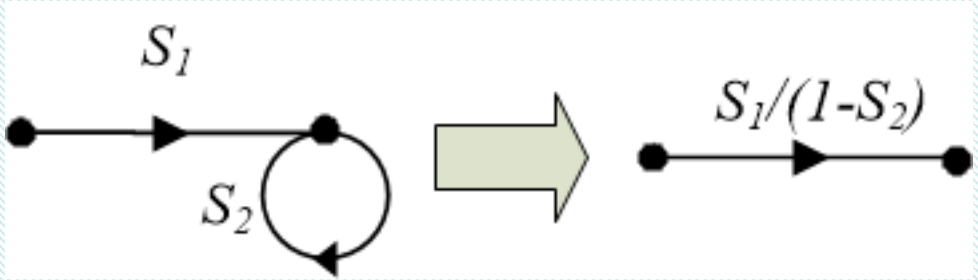
Последовательное
соединение двух ветвей




Параллельное
соединение двух ветвей

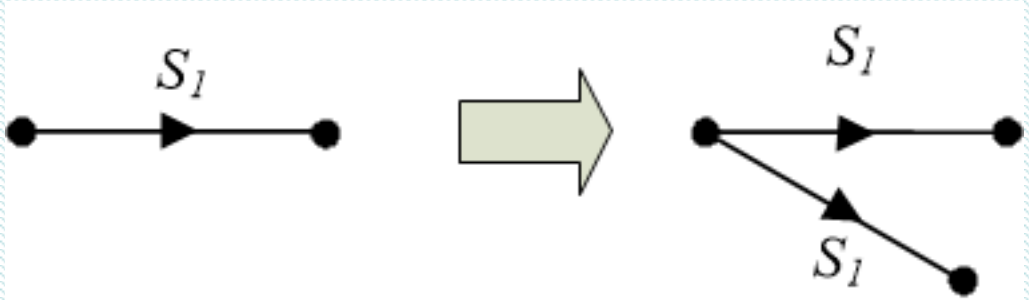



Исключение
прикасающегося контура

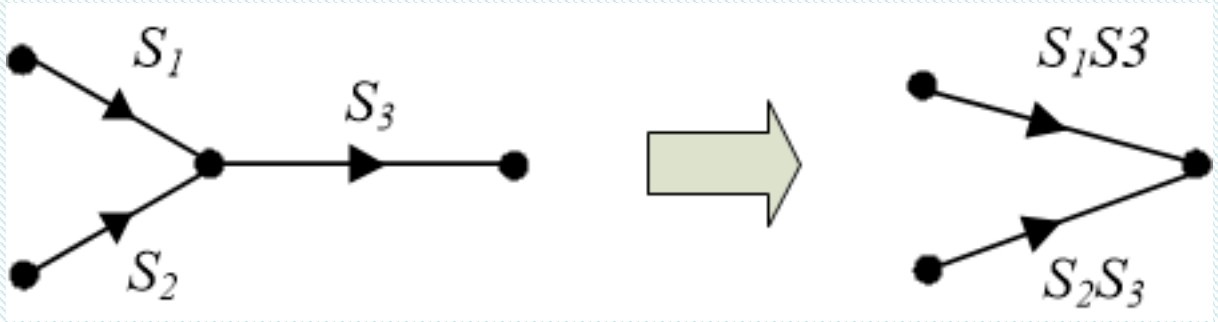


# *Упрощение графа путем исключения узлов*

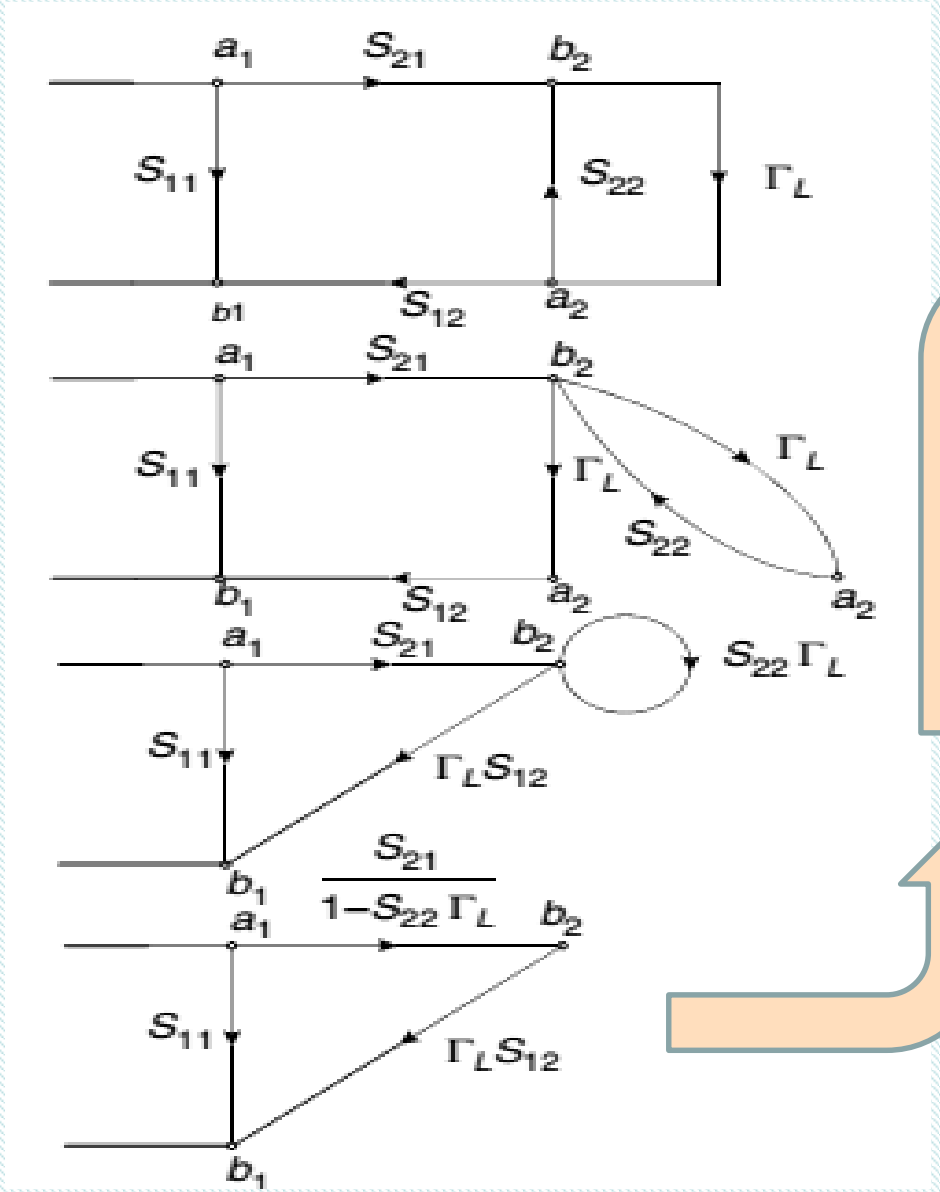
Расщепление узла на два

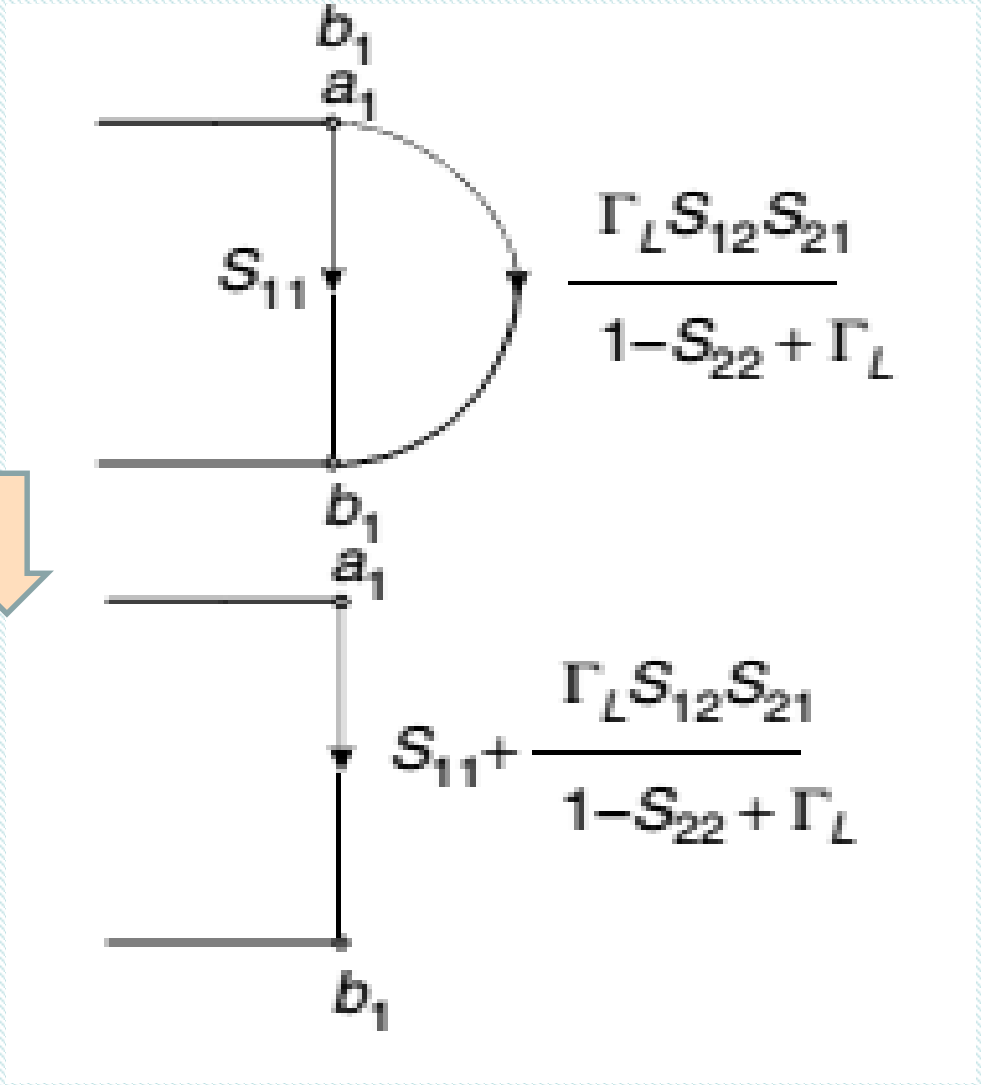



Исключение узла



# Пример упрощения графа «исключением узлов»



# *Правило «некасающегося контура»-1*

***Путь*** $P_i$ - совокупность ветвей, проходимых в одном направлении. Путь, у которого начальный и конечный узлы совпадают, называют ***контуром*** 1 порядка $L^{(1)}$ или ***петлей***. Его значение – *произведение* передач (*петлевой множитель*) входящих в него ветвей.

Контуром **2-го порядка $L^{(2)}$** называют совокупность двух контуров 1-го порядка, у которых *нет общих узлов*. Передача контура второго порядка равна *произведению* передач контуров, входящих в него.

Контура более **высоких порядков $L^{(n)}$** - совокупность n контуров первого порядка, передача равна произведению передач входящих в него контуров *первого* порядка.

# *Правило некасающегося контура-2*

$$S_{ba} = \frac{\sum_i \left\{ P_i \cdot \left[ 1 + \sum_n (-1)^n \sum_{j,r} L_{j,r}^{(n)} \right] \right\}}{1 + \sum_n (-1)^n \sum_j L_j^{(n)}}$$

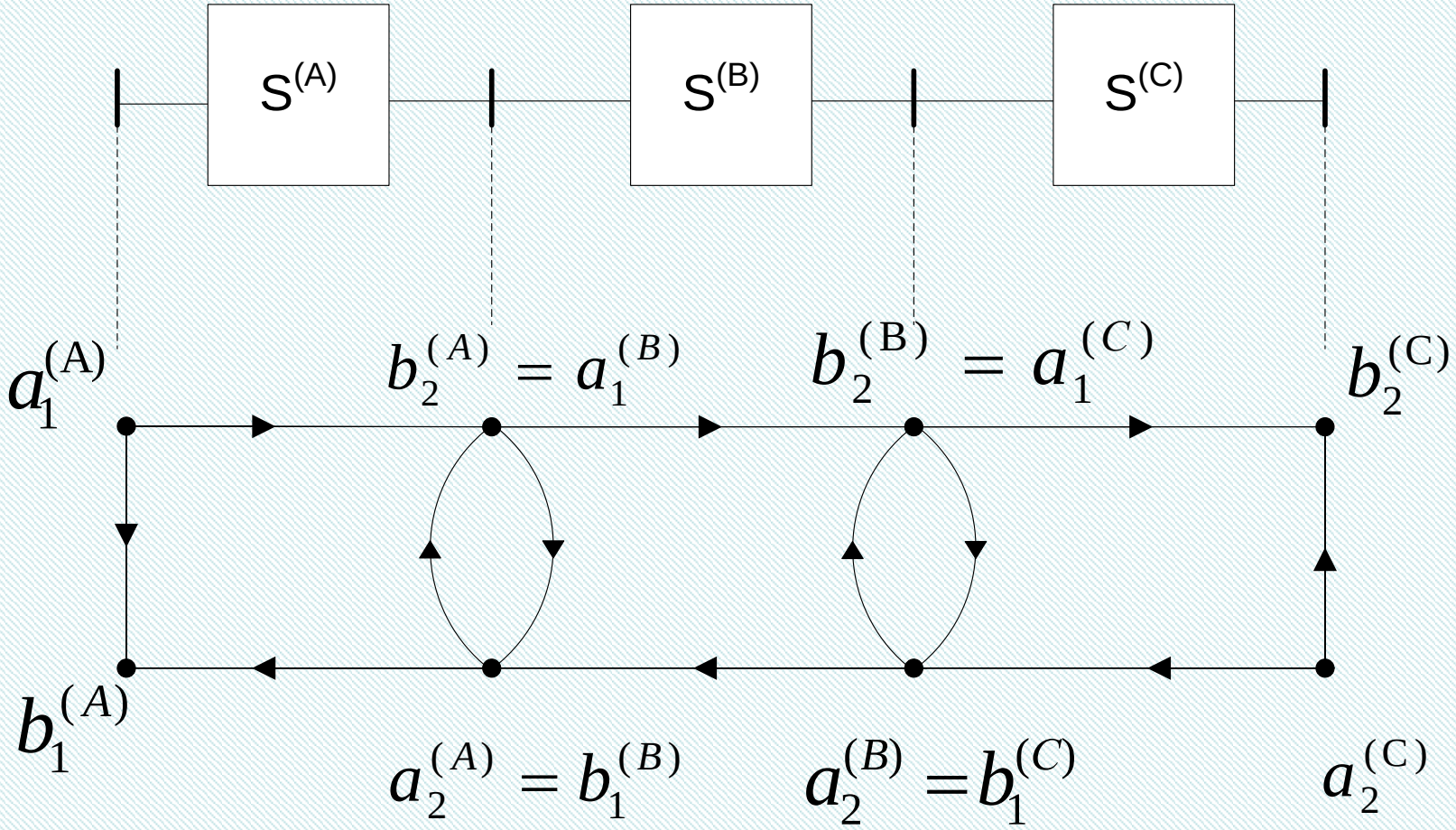
Расчет элемента $S_{ba}$ _коэффициента передачи из порта **a** в порт **b** общей матрицы рассеяния. **Знаменатель** формулы – *определитель* системы D. Он одинаков для всех коэффициентов общей матрицы и включает контура **всех** порядков общего графа СВЧ устройства.

# *Правило некасающегося контура-3*

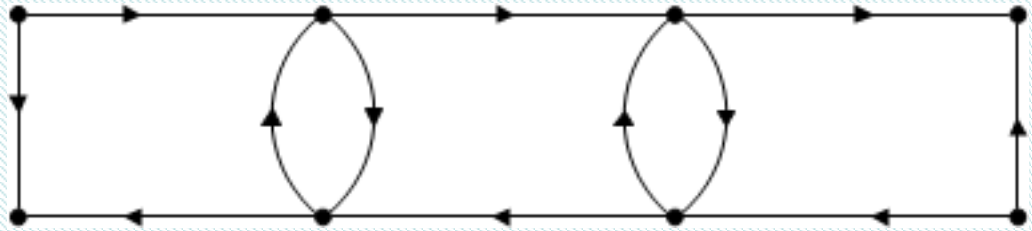
$$S_{ba} = \frac{\sum_i \left\{ P_i \cdot \left[ 1 + \sum_n (-1)^n \sum_{j,r} L_{j,r}^{(n)} \right] \right\}}{1 + \sum_n (-1)^n \sum_j L_j^{(n)}}$$

**Числитель** формулы включает все пути $P_i$ из узла **a** в узел **b,** домноженные на суммы контуров всех порядков общего графа СВЧ блока, которые ***НЕ КАСАЮТСЯ ДАННОГО ПУТИ*** Pi.

# *Пример: каскадное соединение трех узлов и его направленный граф*



$$L_1^{(1)} = S_{22}^{(A)} \cdot S_{11}^{(B)}$$



$$L_2^{(1)} = S_{22}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)}$$

$$L_3^{(1)} = S_{22}^{(A)} \cdot S_{21}^{(B)} \cdot S_{12}^{(B)} S_{11}^{(C)}$$

3 контура первого порядка в графе
Контур второго порядка - один

$$L_1^{(2)} = S_{22}^{(A)} \cdot S_{11}^{(B)} \cdot S_{22}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)}$$

Определитель системы (знаменатель в формуле)

$$D = 1 - S_{22}^{(A)} \cdot S_{11}^{(B)} - S_{22}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)} - S_{22}^{(A)} \cdot S_{21}^{(B)} \cdot S_{12}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)} + S_{22}^{(A)} \cdot S_{11}^{(B)} \cdot S_{22}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)}$$

# Расчет матрицы соединения трех четырехполюсников-2

Расчет коэффициента передачи каскадно-включенных блоков

$$\hat{S}_{21} = \frac{b_2^{(C)}}{a_1^{(A)}}$$

Путь от входного до выходного порта один

$$P_1 = S_{21}^{(A)} \cdot S_{21}^{(B)} \cdot S_{21}^{(C)}$$

$$\hat{S}_{21} = \frac{b_2^{(C)}}{a_1^{(A)}} = \frac{S_{21}^{(A)} \cdot S_{21}^{(B)} \cdot S_{21}^{(C)}}{D}$$

Расчет коэффициента отражения первого порта – пути три

$$P_1 = S_{11}^{(A)} \quad P_2 = S_{21}^{(A)} \cdot S_{11}^{(B)} \cdot S_{12}^{(A)} \quad P_3 = S_{21}^{(A)} \cdot S_{21}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)} \cdot S_{12}^{(B)} \cdot S_{12}^{(A)}$$

$$\hat{S}_{11} = \frac{b_1^{(A)}}{a_1^{(A)}} = S_{11}^{(A)} + \frac{S_{21}^{(A)} \cdot S_{11}^{(B)} \cdot S_{12}^{(A)} (1 - S_{22}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)}) + S_{21}^{(A)} \cdot S_{21}^{(B)} \cdot S_{11}^{(C)} \cdot S_{12}^{(B)} \cdot S_{12}^{(A)}}{D}$$

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)*

# Измерительный тракт СВЧ

Санкт-Петербург
2025 г.

# Измерительный тракт СВЧ (ИТ)

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ СВЧ - совокупность средств измерений и линий передачи, с помощью которых тестовые сигналы направляются к объекту измерения, регулируются по амплитуде и фазе и отводятся от устройства на измерительные приборы:

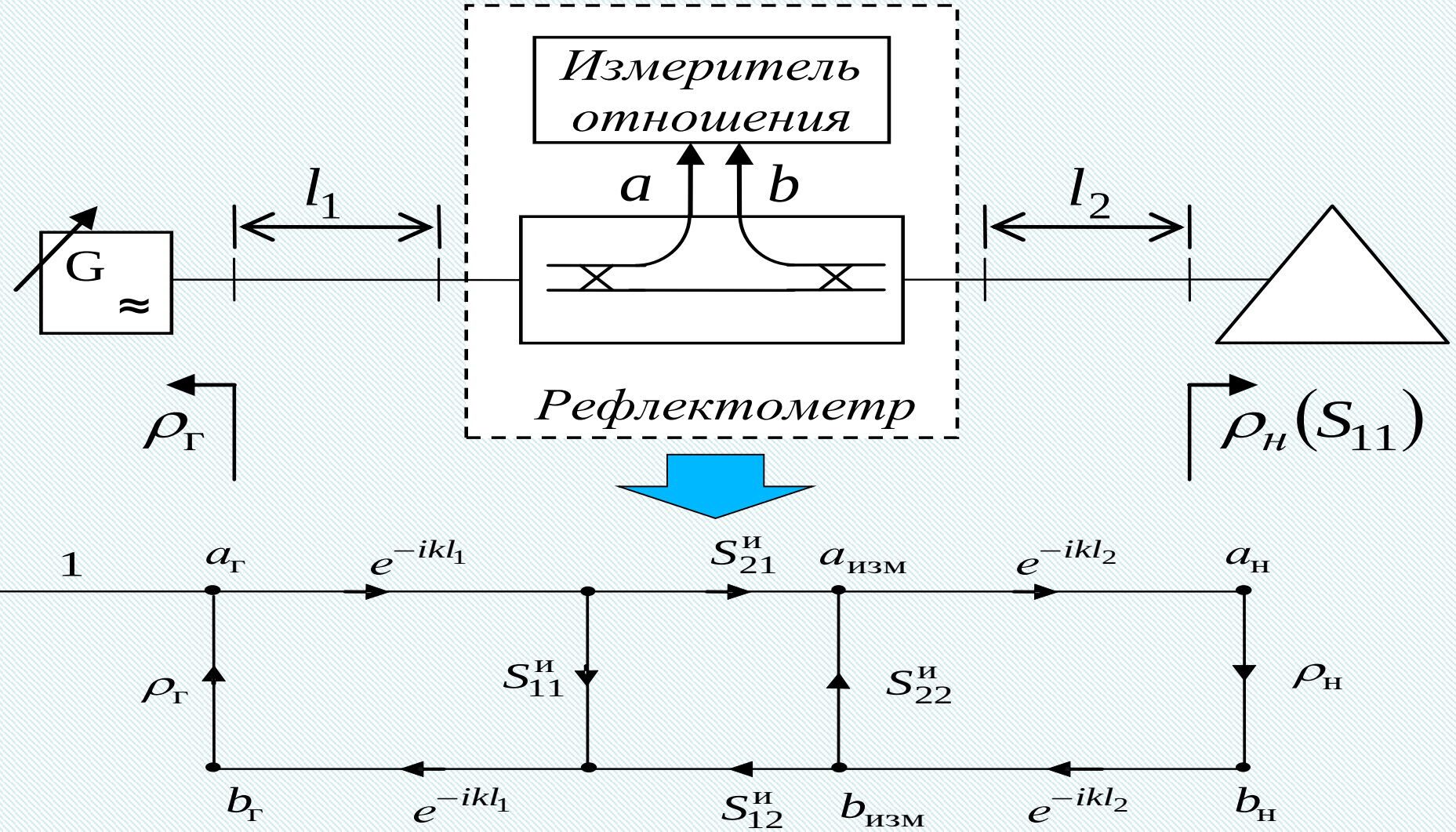
- Соединительные линии с коннекторами (разъемами)
- Измерительные преобразователи СВЧ сигналов
- Генераторы измерительных сигналов
- Переходы между линиями передачи
- Развязывающие устройства (вентили, циркуляторы)
- Регуляторы уровня сигналов (аттенюаторы)
- Фазовращатели – компенсаторы фазовых сдвигов

## Особенности *измерительного* тракта:

- Носит временный характер; тракт создается, как правило, только для проведения измерений.
- Взаимозаменяемость отдельных его элементов; легкая сборка и разборка в процессе измерений.
- Стандартизация присоединительных размеров линий и конструкций соединителей (разъемов), допускающих многократную состыковку и расстыковку
- Метрологическая аттестация отдельных элементов и узлов тракта.

Используют преимущественно *коаксиальный* и *волноводный* измерительные тракты. Полосковые линии используются в составе элементов тракта, но для соединений между элементами непригодны – нет надежных разъемов. Поэтому используют коаксиально-полосковые и волноводно-полосковые переходы

# Измерительный тракт для коэффициентов отражения ($S_{ii}$)



*Первый* метод измерения S11 - фиксировать коэффициент отражения по отношению $b_{изм}$ и $a_{изм}$ в точке расположения рефлектометра :

$$\rho_{изм} = \frac{b_{изм} \cdot \exp(ikl_2)}{a_{изм} \cdot \exp(-ikl_2)} = \rho_н \cdot \exp(-2ikl_2)$$

*Отличие результата измерения* от искомого коэффициента отражения – в сдвиге аргумента на угол, соответствующий удвоенной электрической длине линии передачи $l_2$ (сдвиг отсчетной плоскости). Систематическая погрешность, устраняется калибровкой по фазе.

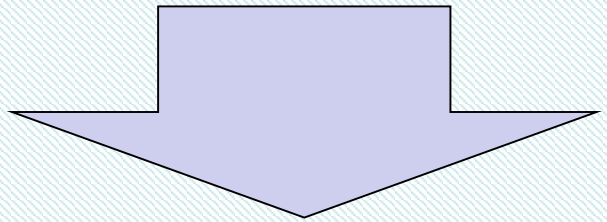
***Второй*** (более простой) вариант измерения коэффициента отражения часто применяют в панорамных измерителях СВЧ – стабилизация амплитуды падающей волны $a_0$ и измерение коэффициента отражения по амплитуде $b_{изм}$ (можно использовать один направленный ответвитель ):

$$\frac{b_{изм}}{a_0} = \frac{\rho_н \cdot S_{21}^u \exp(-ik(l_1 + 2l_2))}{(1 - \rho_н \cdot S_{22}^u \cdot \exp(-2ik(l_2)) - \rho_г \cdot S_{11}^u \exp(-2ik(l_1) + \ldots} \ldots$$

$$\ldots \frac{}{+\rho_н \cdot \rho_г \cdot S_{11}^u S_{22}^u \exp(-2ik(l_1 + l_2) - \rho_н \cdot \rho_г S_{21}^u S_{12}^u \cdot \exp(-2ik(l_1 + l_2)} \ldots$$

$$\ldots \neq \frac{b_н}{a_н} = \rho_н .$$

Даже для *идеального* рефлектометра ($S_{11}=S_{22}=0$, $S_{21}=S_{12}=1$) остается *погрешность рассогласования* генератора и нагрузки



$$\frac{b_{изм}}{a_0} = \frac{\rho_н \cdot \exp(-ik(l_1 + 2l_2))}{(1 - \rho_н \cdot \rho_г \cdot \exp(-2ik(l_1 + l_2))} \neq \frac{b_н}{a_н} = \rho_н .$$

Оценка максимального и минимального значения погрешности при 360-градусной вариации фазового множителя в знаменателе:

$$\delta = |\rho_н| \left( 1 - \frac{1}{1 \pm |\rho_г \rho_н|} \right)$$

Пример: при хорошем КСВН генератора =1.5 $(\rho_г \approx 0.2)$

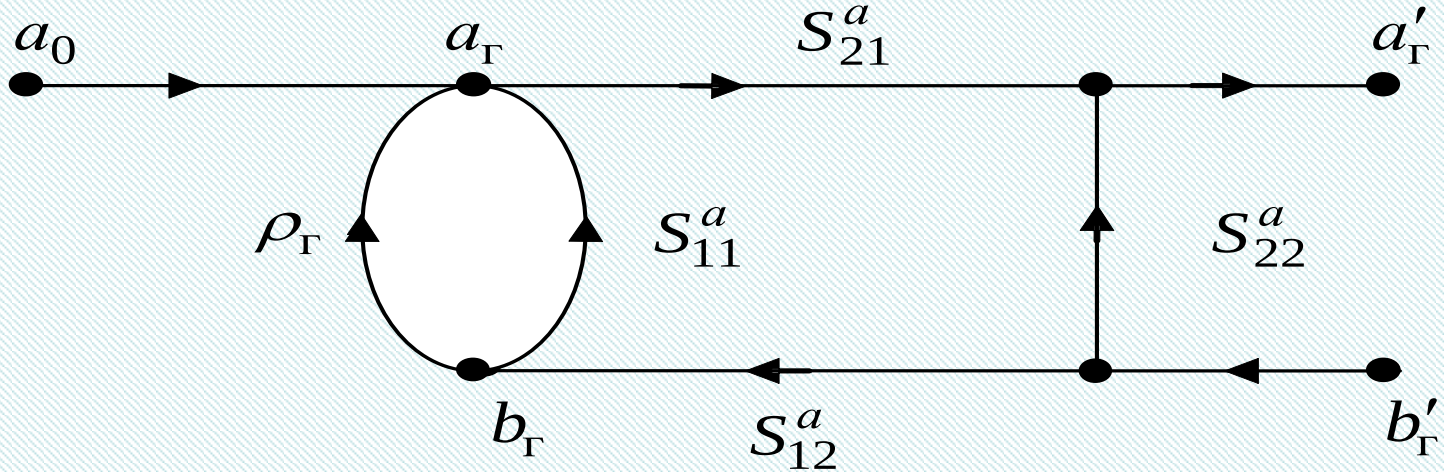
и несильно отражающей нагрузке с КСВН=3 $(\rho_н \approx 0.5)$

погрешность рассогласования может лежать в пределах ±5%..

Как уменьшить погрешность рассогласования генератора?

Устраняется развязывающими устройствами – *аттенюатором* или *вентилем,* включенными между генератором и нагрузкой .

Коэффициент отражения со стороны измерительного тракта:

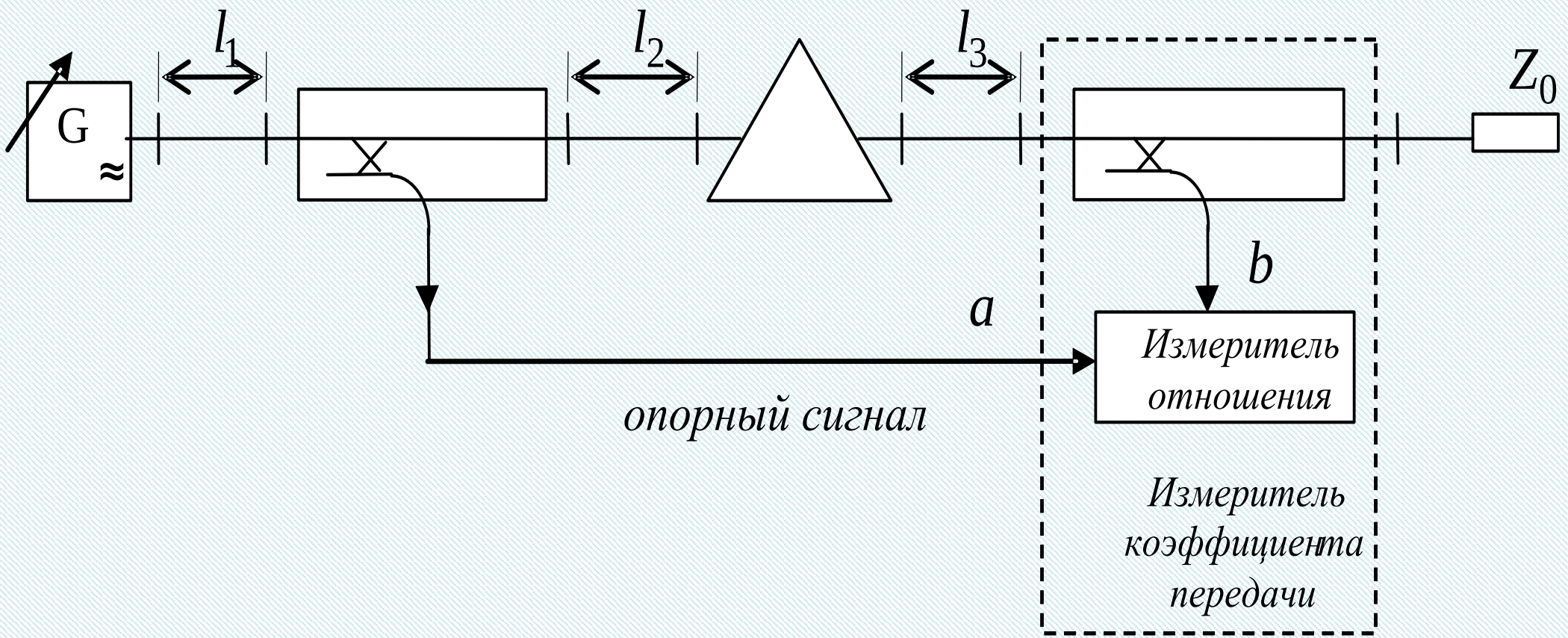



$$\rho'_г = \frac{a'_г}{b'_г} = \frac{S_{21}^a \cdot S_{12}^a \cdot \rho_г}{1 - \rho_г S_{11}^a} \approx (S_{21}^a \cdot S_{12}^a) \cdot \rho_г$$

Для аттенюатора 20 дБ (|S21|=0,1) амплитуда сигнала генератора уменьшается в 10 раз, а коэффициент отражения от генератора снижается в 100 раз.

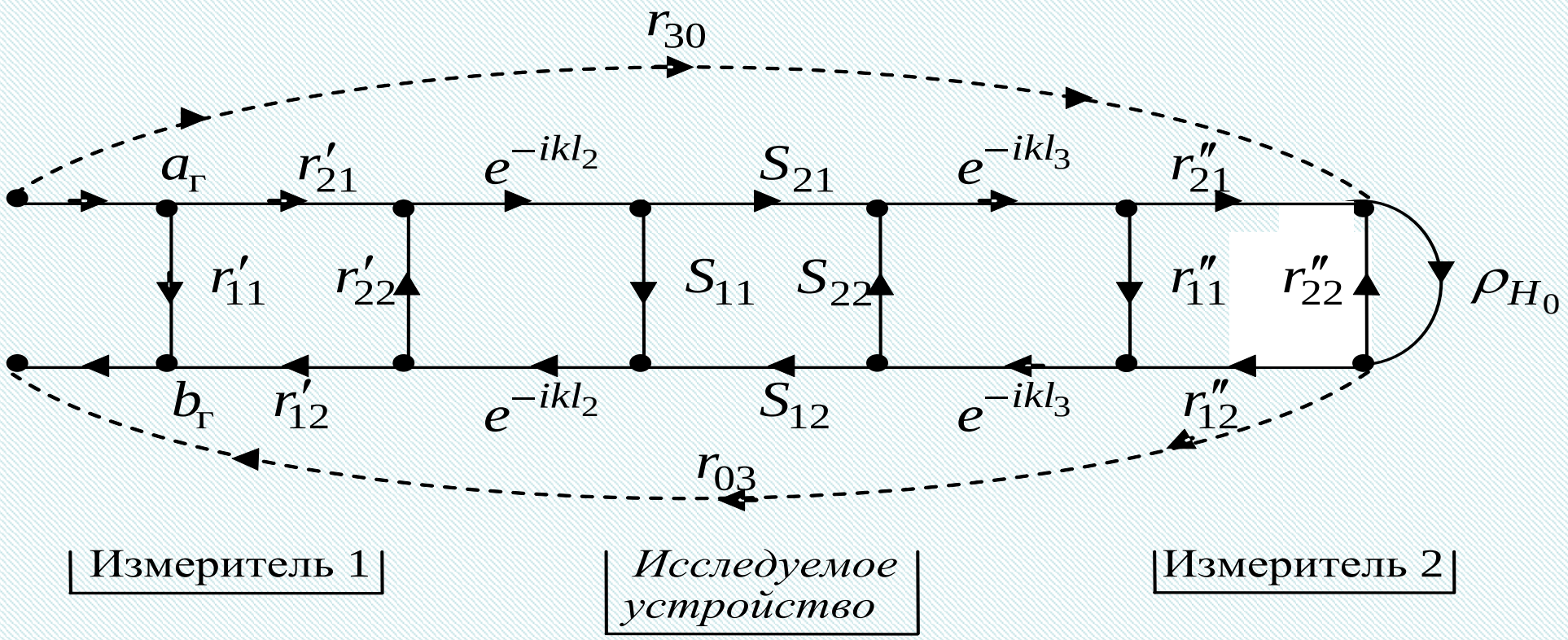
Для вентиля |S21| >> |S12| коэффициент отражения снижается примерно в 1/S12 раз.

# Измерительный тракт для коэффициентов передачи ($S_{ij}$)




Измерительный тракт на выходе исследуемого узла включает отрезок линии передачи $l_3$ , направленный ответвитель проходящей волны, согласованную нагрузку. и измеритель отношения амплитуд проходящей и падающей волн.

# Граф измерительного тракта для определения коэффициентов передачи




Свойства реальных измерителей амплитуд падающей и проходящей волн заданы матрицами [r’] и [r’’’]. Неидеальная *развязка* измерителей отражена ветвями $r_{03}$ и $r_{30}$.


Элементы измерительного тракта СВЧ
Линии передачи
Коаксиальные
Волноводные
Разъемы
Фланцы
СВЧ нагрузки
Согласован-ные
Плунжеры
Слайдеры
Двухпортовые элементы
Переходы
Аттенюаторы, фазовращатели, вентили
Фильтры , усилители
Трех- и четырехпорто вые элементы
Делители, сумматоры, циркуляторы
Направленные ответвители, мосты

# Классификация линий передачи СВЧ диапазона

ГОСТ 18238-72

Линии передачи сверхвысоких частот.
Термины и определения

•Линии с Т (ТЕМ)-волной: коаксиальная, двухпроводная, симметричная полосковая и пр.

•Волноводы: прямоугольный, круглый, эллиптический и пр.

Диэлектрические волноводы, волоконно-оптические линии

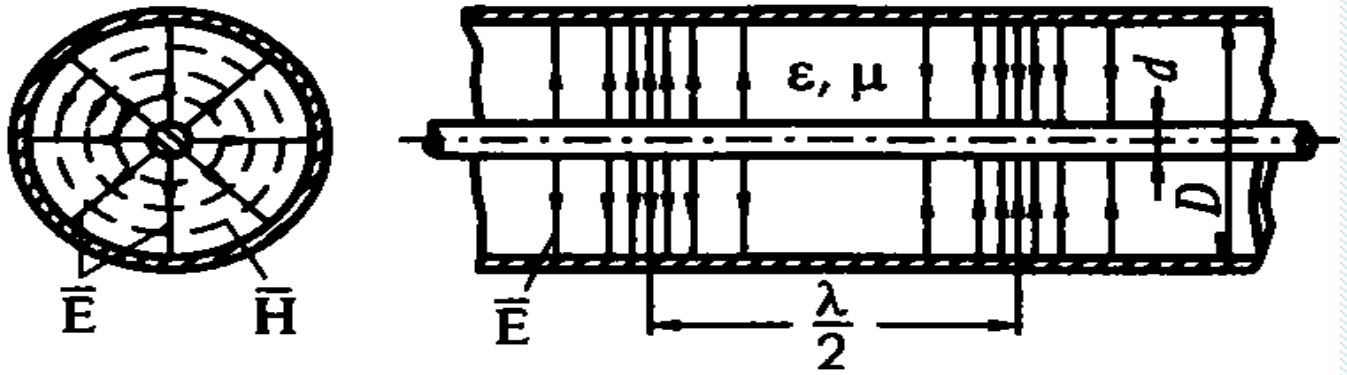
•Микрополосковые линии на подложке: несимметричная, щелевая, копланарная и пр.


Линии передачи СВЧ
Проволочные ЛП
Коаксиальные ЛП
Волноводы закрытого типа
Двухпроводная ЛП
Многопроводные ЛП
Коаксиальные кабели
Симметричные коаксиальные ЛП
Жесткие коаксиальные ЛП
Прямоугольные
Круглые и эллиптические
П- и Н-волноводы
Полосковые ЛП
Симметричные ПЛ
Полосковые ЛП (несимметричные ПЛ)
Микрополосковые ЛП
Щелевая ЛП, копланарный волновод и пр.
Волноводы открытого типа
Диэлектрические волноводы
Волоконно-оптические волноводы

# *Параметры линий передачи*:

- Тип волны, частотный диапазон, в котором существует волна *основного* типа.
- Волновое сопротивление.
- Дисперсионная зависимость. $v_ф = v_ф(f)$
- Затухание (потери на единицу длины из-за потерь в металле и диэлектрике) дБ/м, Нп/м.
- Максимальная передаваемая мощность (по тепловому пробою).
- Пробивное напряжение (электрическая прочность) и максимальная передаваемая мощность по электрическому пробою. Модовая структура (для многомодовых линий передачи)

# Коаксиальная линия



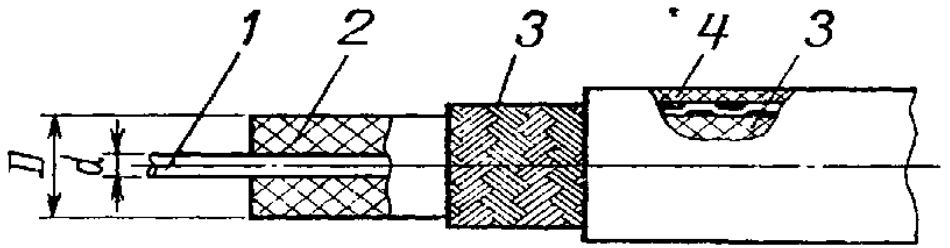




Рис. 52. Схема устройства радиочастотного кабеля со сплошной изоляцией.

*1* — центральный проводник; *2* — изоляция; *3* — оплетка (наружный проводник); *4* — защитная диэлектрическая оболочка.

$$L_l = \mu_a /(2\pi)\ln(D/d)\ ,\ \text{Гн/м};$$

$$C_l = \frac{2\pi\varepsilon_a}{\ln(D/d)}\ ,\ \text{Ф/м}.$$

$$Z_в = 60\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{D}{d}\right) = 138\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\lg\left(\frac{D}{d}\right),\ \text{Ом}.$$

Волновое сопротивление коаксиальной линии с Т-волной

# *Высшие типы волн коаксиальной линии*

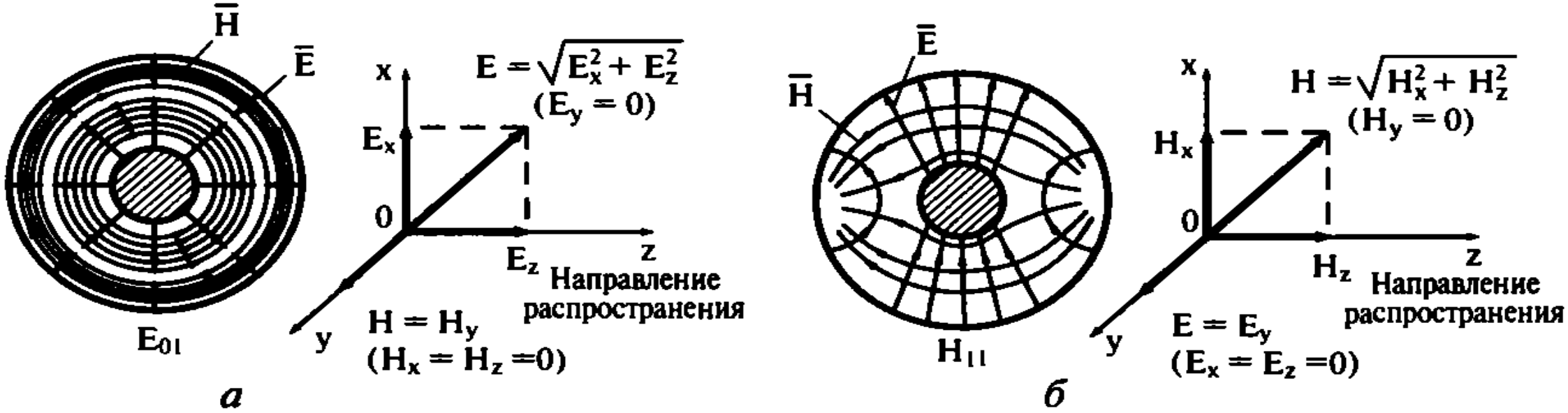


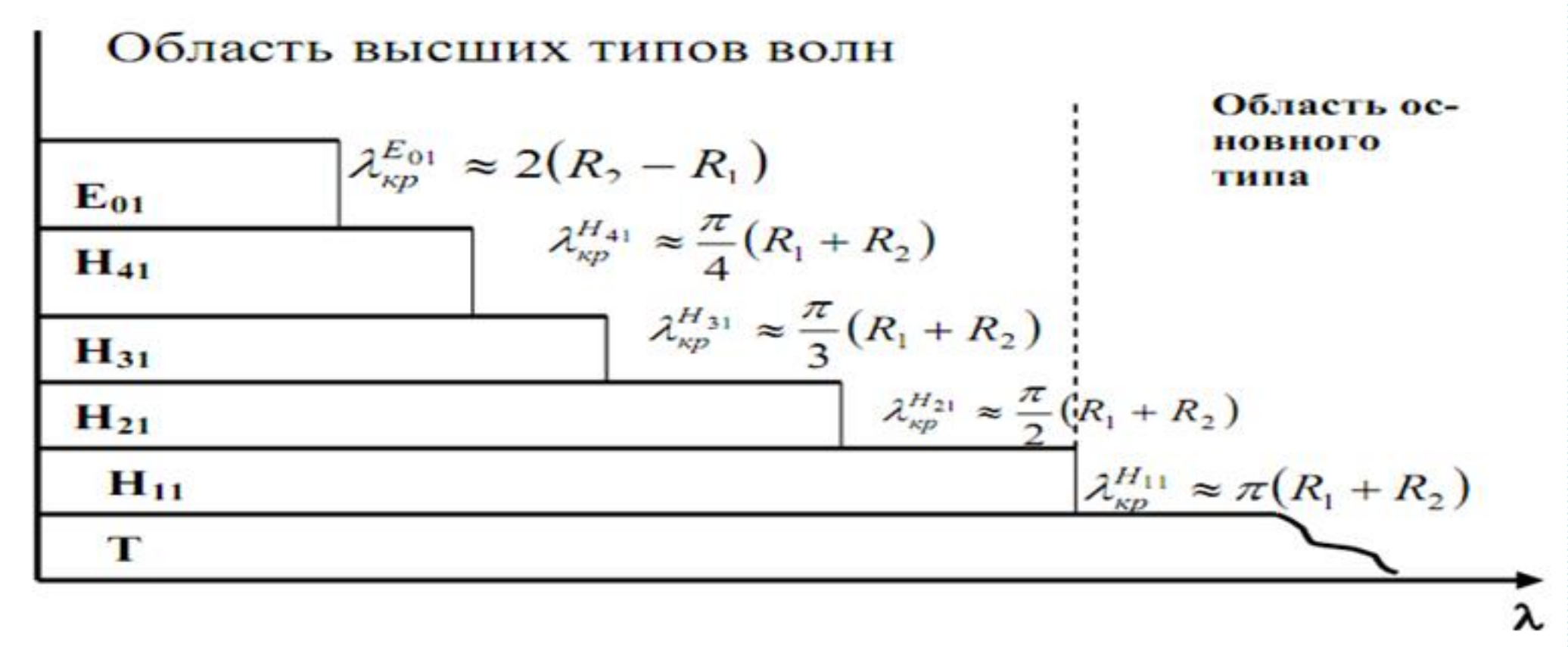

**Рис. 1.3.** Электрическое и магнитное поля в поперечном сечении коаксиальной линии и векторное изображение электрической волны типа $E_{01}$ (*а*) и магнитной волны типа $H_{11}$ (*б*)

Условие одномодовости коаксиального тракта по критической частоте волны типа $H_{11}$

$$f < f_{кр}^{(H_{11})} = \frac{190{,}8}{\sqrt{\varepsilon}(D,\text{мм} + d,\text{мм})},\ ГГц$$

# Предельные частоты 50-омных линий с воздушным заполнением

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Внутренний диаметр наружного проводника линии, мм | 7,0 | 3,5 | 2,92 | 2,4 | 1,85 | 1,0 |
| Верхняя частота применения, ГГц | 18 | 33 | 40 | 50 | 65 | 110 |
| Теоретическая предельная частота, ГГц | 19,4 | 38,8 | 46,5 | 56,5 | 73,3 | 135,7 |



# Стандартные коаксиальные кабели

| Тип кабеля | Диаметр, мм | | Рабочий диапазон температур, °С | Соединители | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Наружный | Центрального проводника | | SMC | N | SMA | APC-3,5 OC-2,9 K | SMP | OS-50 | OS-65 APC-2,4 | OS-1.0 |
| **Гибкий кабель** | | | | | | | | | | | |
| RG-55 | 5,5 | 0,81 | -40. +80 | | + | + | | | | | |
| RG-58 | 4,95 | 0,95 | -40 . +80 | | + | + | | | | | |
| RG-142 | 4,95 | 1 | -55. +250 | | + | + | | | | | |
| RG-174 | 2,5 | 0,51 | -40. +80 | + | + | + | | | | | |
| RG-179 | 2,5 | 0,3 | -55...+150 | + | | + | | | | | |
| RG-188 | 2,8 | 0,51 | -55 .+250 | + | + | + | | | | | |
| RG-316 | 2,6 | 0,51 | -55 +250 | + | + | + | | | | | |
| **Полужесткий кабель** | | | | | | | | | | | |
| 0,141» (RG-402) | 3,58 | 0,91 | -40. +125 | | + | + | | | | | |
| 0,085» (RG-405) | 2,2 | 0,51 | | | + | + | + | + | + | | |
| 0,118» | 3,0 | 0,51 | | | | | + | | | | |
| 0,096» | 2,44 | 0,51 | | | | | | | + | | |
| 0,047» | 1,2 | 0,3 | | | | | | + | | + | + |

Отечественные коаксиальные кабели по ГОСТ 11326.0-78 обозначают РК XX-X-XX. Две первые буквы - сокращенно «радиочастотный коаксиальный», далее - волновое сопротивление (50 или 75), внешний диаметр по изоляции в мм, затем - через дефис – первой цифрой кодируется тип изоляции (1- полиэтилен, 2 – фторопласт), а второй - номер разработки. Например, РК 50-7-11.

# *Кабели с различными СВЧ соединителями (разъемами)*





# *Коаксиальные соединители (разъемы) СВЧ диапазона*

| Параметры | Соединители | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | SMC | N | SMA | APC-3,5 | 2,9 -мм | | | | 2,4-мм | | 1,85-мм | 1,0- мм |
| | | | | | KMC-SL | OS-2,9 | SMP | K | OS-2,4 | APC-2,4 | OS-65 | RPC-1,0 |
| Предельная частота, ГГц | 10 | 11 | 18 | 34 | 40 | | | 45 | 50 | | 65 | 110 |
| Максимальный КСВН | 1,6 | 1,3 | 1,2 | 1,15 | 1,4 | 1,25 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,25 | 1,3 | 1,28 |
| Потери, дБ (на частотах, ГГц) | 0,25 (4) | 0,15 | $0,03\sqrt{f}$ | 0,09 | 0,25 | $0,04\sqrt{f}$ | $0\ 12\sqrt{f}$ | $0.02\sqrt{f}$ | $0,05\sqrt{f}$ | | | $0,07\sqrt{f}$ |
| Экранное затухание, дБ (на частотах, ГГц) | -60 (3) | -90 (3) | - (90-f) | -90 (16) | -90 | | -80 (3) | -90 | - (120-f ) | | | |
| Допустимое количество соединений и рассоединений | 500 | | | 1000 | 5000 | 500 | | | 500 | | | |

# *Частотные диапазоны миниатюрных коаксиальных разъемов СВЧ*

3 градации радиочастотных соединителей:

- Метрологические
- Инструментальные
- Общего применения

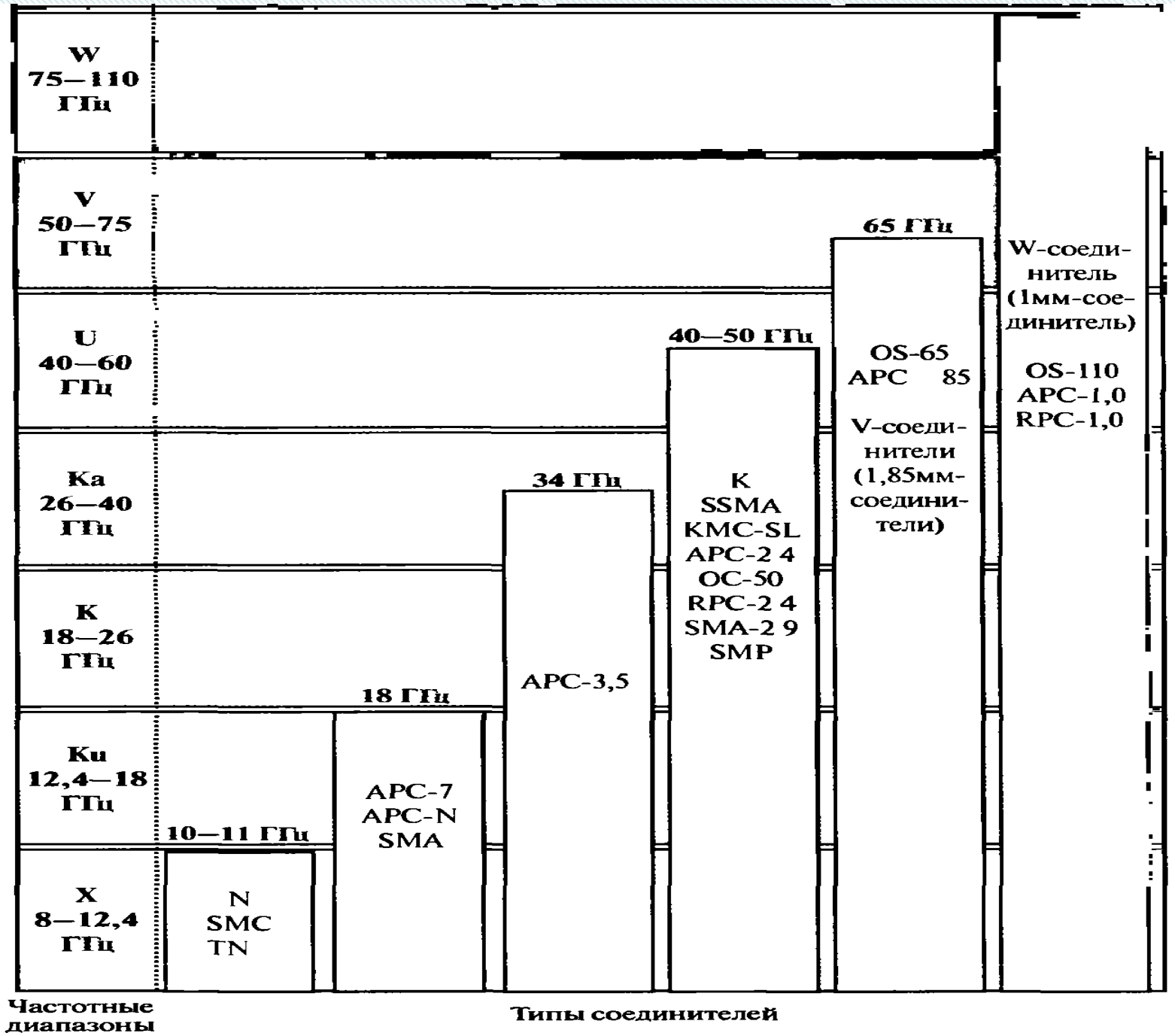


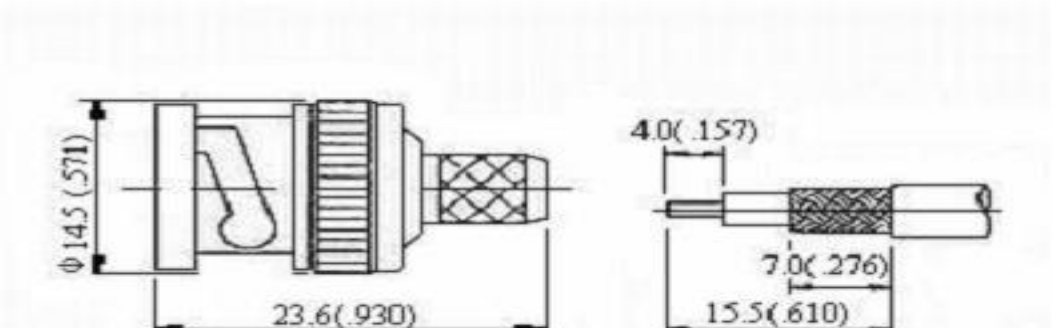
**Таблица.** Параметры соединителей SMA, SMB, SMC, SMA 27, QMA, BMA с волновым сопротивлением 50 Ом

| Параметры соединителей | SMA | SMB | SMC | SMA 27 | QMA | BMA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Диапазон рабочих частот, ГГц (в скобках — оптимальный диапазон) | 0–18 | 0–10 (0–4) | 0–10 (0–4) | 0…26–27 | 0–18 (0–6) | 0–22 (0–18) |
| Максимальный КСВН (в диапазоне частот, ГГц) прямых кабельных соединителей в зависимости от типа кабеля | 1,2–1,5 (0–18) | 1,4–1,6 (0–4) | 1,4–1,5 (0–4) | 1,25 (0–26) | 1,12 (0–6) | 1,2 (0–18) |
| Максимальная величина потерь прямых соединителей, дБ, (в диапазоне частот f, ГГц) | 0,30 (0–18) | 0,3 (0–4) | 0,25 (0–4) | 0,30 (0–18) | 0,25 (0–6) | $0{,}3\sqrt{f}$ |
| Допустимая пропускаемая мощность, Вт (на частоте, ГГц) | 110 (10), 70 (18) | 150 (1) | 150 (1) | 110 (12,4–18) | 150 (2,5) | 300 (3) |
| Рабочее напряжение, В (на уровне моря, в зависимости от типа кабеля) | 335 | 250–335 | 250–335 | 335 | 335–480 | 350 |
| Напряжение пробоя, В (на уровне моря в зависимости от типа кабеля) | Более 750 | 750–1000 | 750–1000 | 1000 | 1000 | 1000–1500 |
| Экранное затухание, дБ, в зависимости от типа кабеля (на частотах f , ГГц) | –60…–(90–f) | –55 (2–3) | –55 (2–3) | –(100–f) | –80 (0–3), –70 (3–6) | –(90 – f) |
| Сопротивление изоляции, МОм, не менее | 5000 | 10000 | 10000 | 5000–10000 | 5000 | 5000 |
| Сопротивление контактов центрального/наружного, мОм | 3,0/2,5 | 5–6/1–2,5 | 5–6/1–2,5 | 3,0/1,5 | 3,0/2,5 | 3/2 |
| Гарантированное количество соединений и рассоединений | 500 | 500 | 500 | 500 | 100 | до 5000 |
| Рекомендуемый момент затягивания гайки вилки, Н•м | 0,80–1,10 | – | 1,10 | 0,80–1,10 | – | – |
| Усилие соединения вилки и розетки, Н | – | 63 макс. | – | – | 25–27 | 13,5–27 |
| Усилие расссоединения вилки и розетки, Н | – | 8,8 мин. | – | – | 20 | 2,0–7 |
| Диапазон рабочих температур, °С | –65…+165 | –60…+165 | –60…+165 | –55…+165 | –40…+85 | –60…+125 |

# *Коаксиальные соединители BNC*

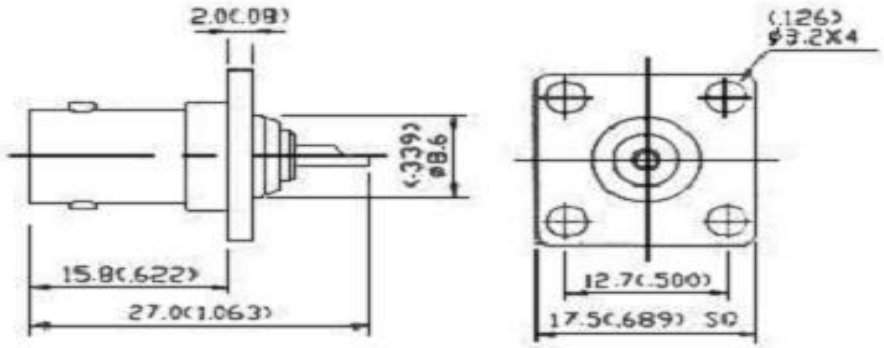




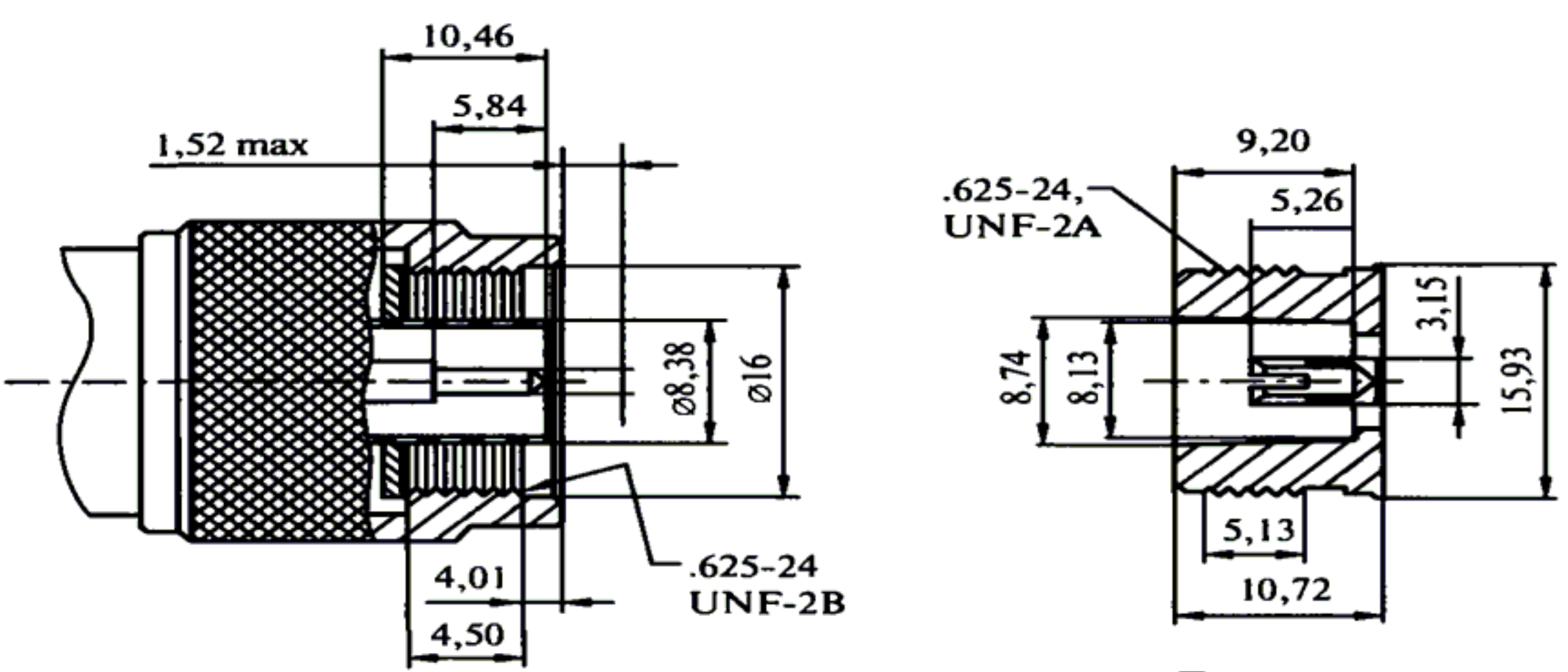




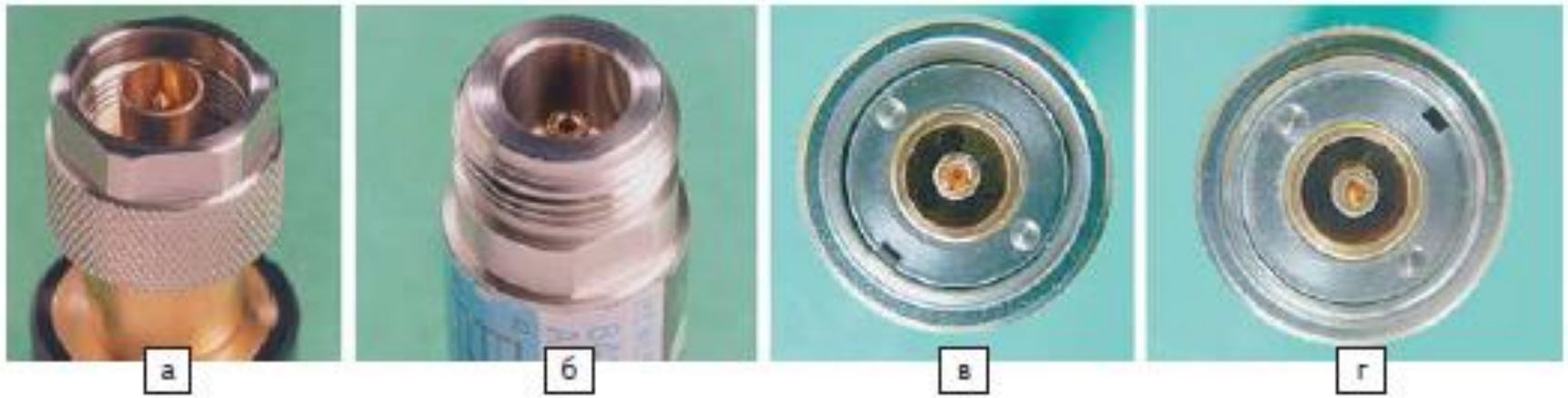



**Соединитель BNC (*Bayonet Neil Cancelman*- Bell Labs,Amphenol, 1940) - высокочастотные коаксиальные разъемы с "байонетным" соединением (1/4 оборота). 50 Ом с заполнением диэлектриком – до 4 Ггц. 75 Ом – с уменьшенным штырем и без диэлектрика – до 2 ГГц. Вариант с резьбой – TNC коннектор . 50 Ом, 11 Ггц (1950г)**

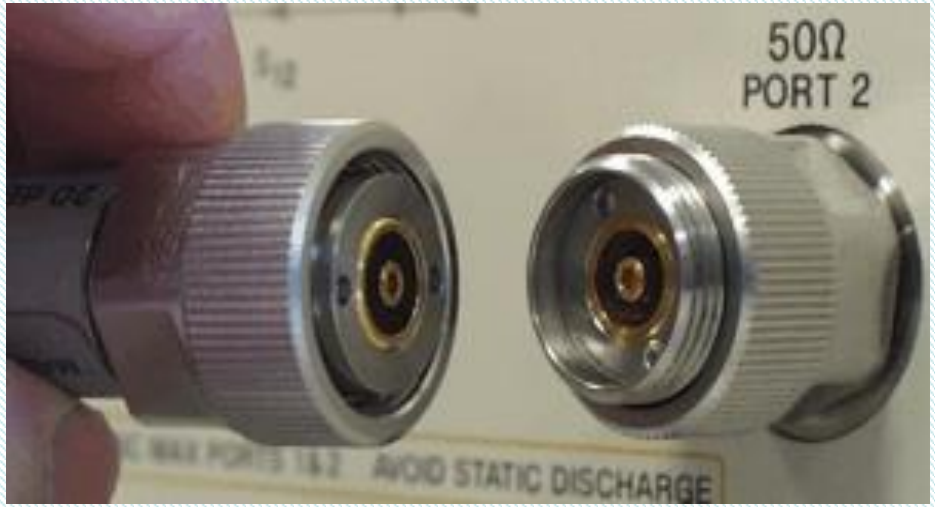


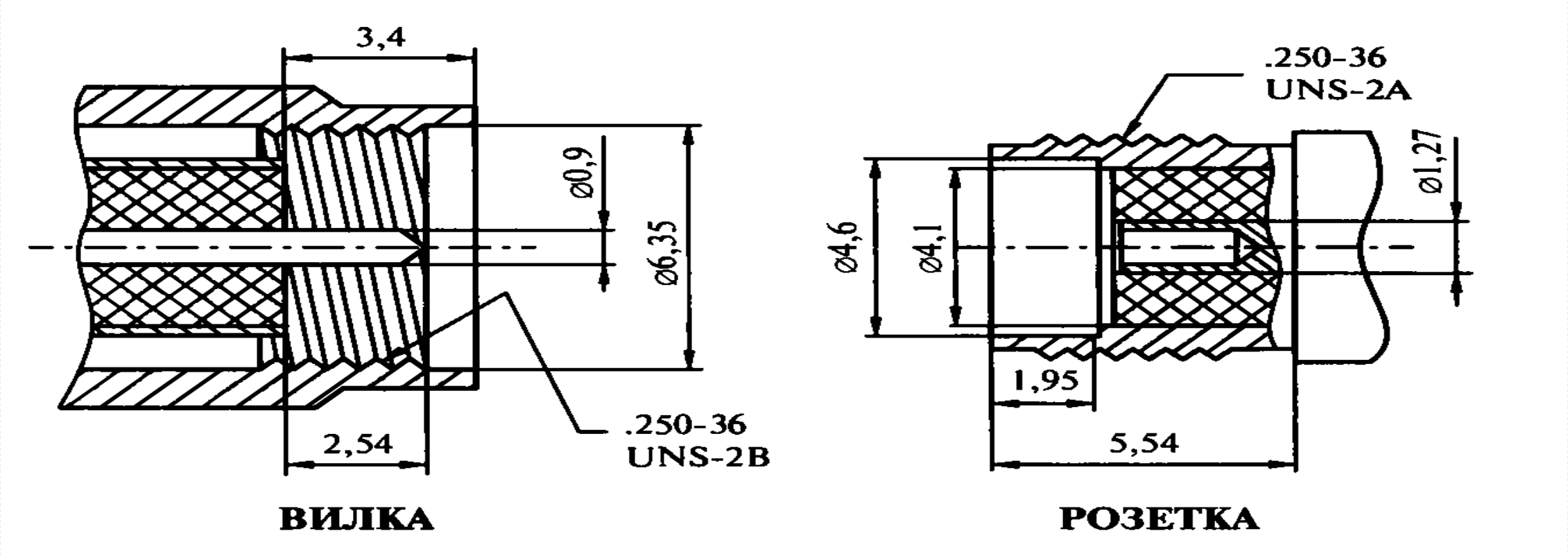

**Соединитель *N*** (Paul Neil, Bell Labs). Коаксиальная линия 7/3,04 мм с фторопластовой изоляцией (теоретическая верхняя частота 11 ГГц). Контакт по внутренним проводникам - «штырь-гнездо», по наружным - резьбовым соединением с дюймовой резьбой 0,625-24UNEF-2A (приблизительно M16X1).




Соединители N общего применения: а) вилка; б) розетка;
Прецизионный 7мм соединитель APC-7 (Amphenol Precision Connector). «бесполый» соединитель (обе части одинаковые!!!!) Максимальная частота применения 22 ГГЦ. Типичный КСВН 1.025 на 18 GHz : в) 7-мм розетка, гнездо с 4 ламелями; г) 7-мм розетка, с 6 ламелями







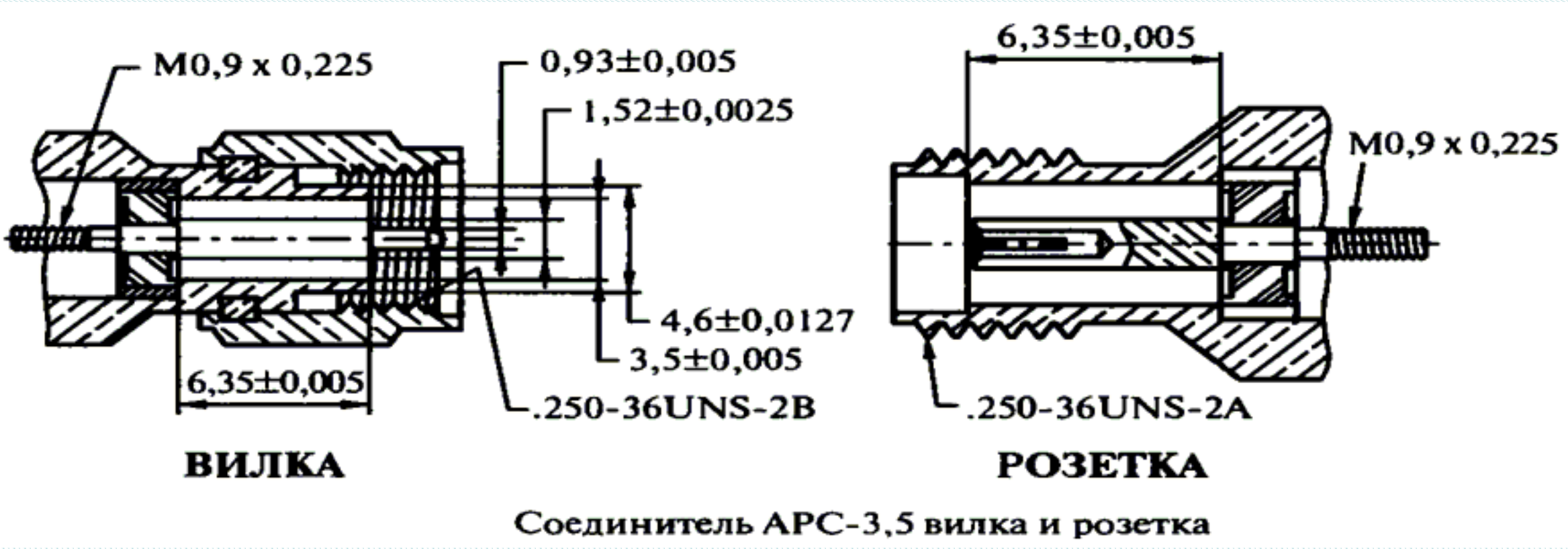

SMA Male



SMA Female

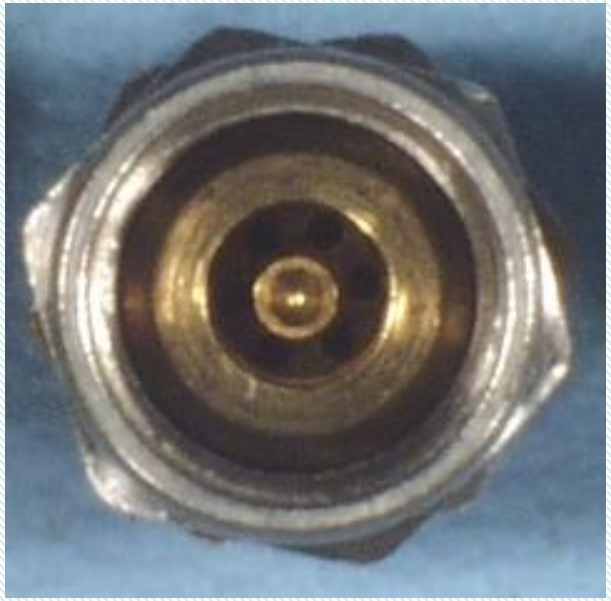


*SMA* (Sub-Miniature Grade A) connector. Размер 4,1/1,27 мм , 50 Ом. Диэлектрик-фторопласт. Контакт по внутреннему проводнику – «штырь-гнездо»,по наружному проводнику —резьбовое соединение. Рассчитан на 500 соединений-разъединений. ~40% рынка разъемов




Соединитель APC-3,5 вилка и розетка

Соединитель *APC-3,5* - 1976 г, фирма Amphenol. Размер коаксиала 3,5/1,52 мм. За основу был принят соединитель SMA с коаксиальной линией размерами 4,1/1,27 мм, заполненной фторопластом. Из нее удалили фторопластовый изолятор, заменив его воздухом. Для сохранения волнового сопротивления 50 Ом размеры линии были уменьшены в 1,2 раза. Это позволило увеличить предельную частоту с 18 ГГц до 34 ГГц.







Соединители «розетка» и «вилка» тракта 1 мм. Центральный проводник соединителя справа имеет диаметр всего в четверть миллиметра

Соединители *КВЧ диапазона*:
2.4 мм (тип K) - до 40 ГГц, 1.85 мм (тип V) – до 67 ГГц и 1 mm – до 110 ГГц

Моменты затягивания гайки для соединителей разных типов

| Соединитель | Вид резьбы | Момент, Н·м | Тарированный ключ для закручивания гайки |
|---|---|---|---|
| 7-мм | 0,625-24UNEF | 1,36 |  |
| 3,5-мм | 0,250-36UNS | 0,90 | |
| 2,92-мм | | 0,56–0,90 | |
| 2,4-мм | M7 0,75 | 0,90 | |
| 1,85-мм | | 0,90 | |
| 1,0-мм | | 0,34 | |
| SMA | 0,250-36UNS | 0,56 | |
| N | 0,625-24UNEF | 1,36 | |

# *Отечественные соединители общего применения*

ГОСТ 20265-83 и ГОСТ 13317-89 - классификация по их присоединительному размеру

Зарубежные соединители соответствуют требованиям военного стандарта MIL-C-39012.

| $Z_0$, Ом | D, мм | d, мм | $f_в$, ГГц | Международное обозначение | Тип соединителя по ГОСТ 13317-89 |
|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 16 | 6,95 | 7,5 | «7/16» | II |
| 75 | 16 | 4,6 | 3 | | VIII |
| 50 | 7 | 3,04 | 18 | N - тип | III |
| 75 | 7 | 2,01 | | N – тип (75 Ом) | III |
| 50 | 3,5 | 1,52 | 26 | SMA | IX |
| 50,75 | 6,35 | | 4 | BNC | V |

## Соответствие отечественных и зарубежных соединителей

| Размеры коаксиальной линии, мм | Типы соединителей | |
|---|---|---|
| | Отечественные | Зарубежные |
| | ГОСТ 20265-83, ГОСТ 13317-89 | MIL-C-39012 |
| 7/3.04 | III (В, Р) | N, APC-7, RPC-7 |
| 4,1/1,27;3,5/1,52 | IX (В, Р) | SMA |
| 3/0,94 | отсутствуют | SMC, SMB |
| 2,92/1,27 | отсутствуют | 2,9-мм соединители (К, SMA 2,9, SMP, GPO и др.) |
| 2,4/1,042 | I (В, Р) | 2,4-мм соединители (APC-2,4, OS-50, RPC-2,4 и др.) |
| 1,85/0,83 | отсутствуют | 1,85-мм соединители (APC-1,85, OS-65, VP, GPPO) |
| 1/0,534 | отсутствуют | 1,0-соединители (APC-1,0, RPC-1,0) |

Отечественные обозначения коаксиальных разъемов -> СР-50-№-ФВ:
СР – соединитель радиочастотный; 50(75) – волновое сопротивление;

№ -номер разъема; иногда указывают тип кабеля, Ф- фторопласт, П- полиэтилен, С-полистирол, К-керамика; В- всеклиматический.

# Прямоугольный волновод

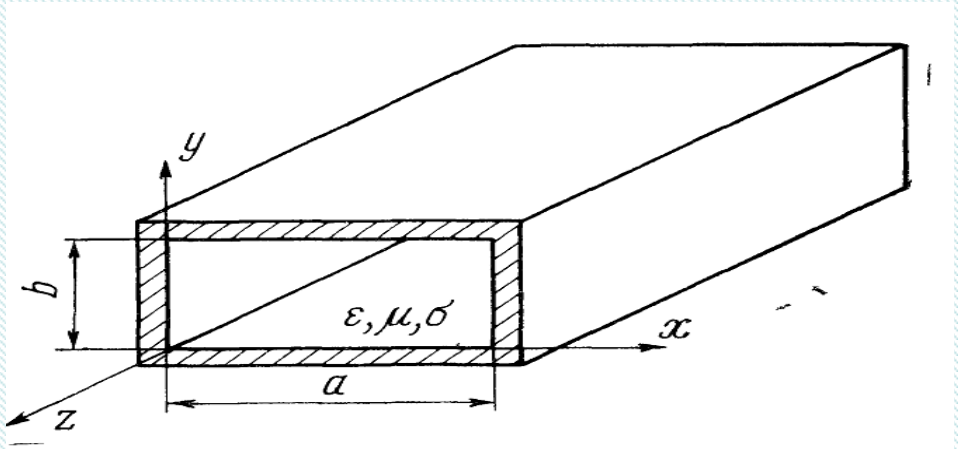
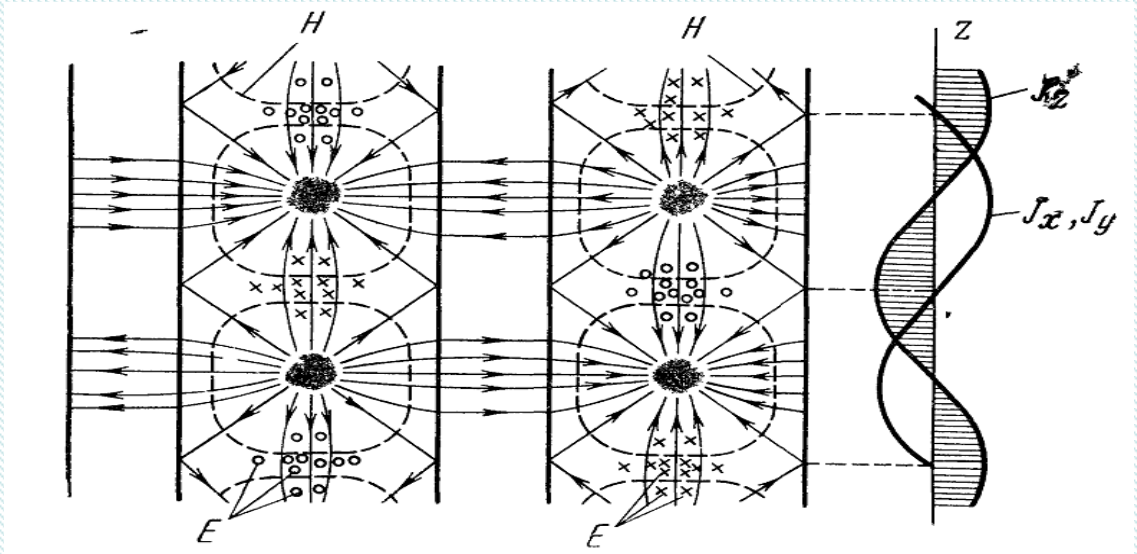
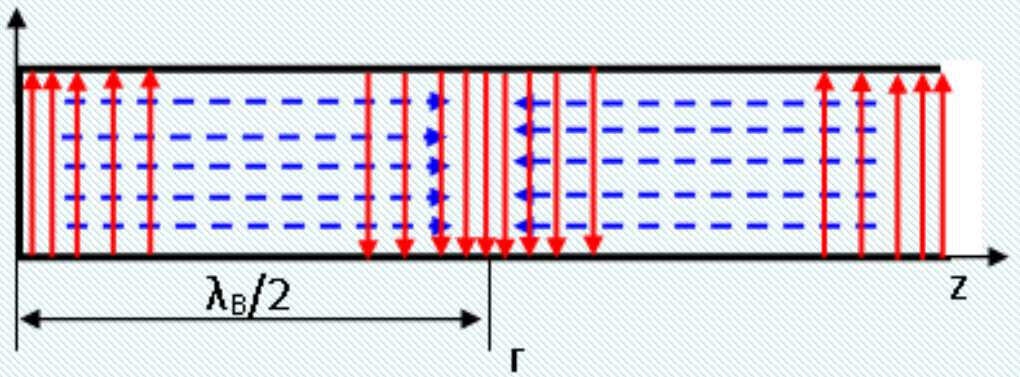
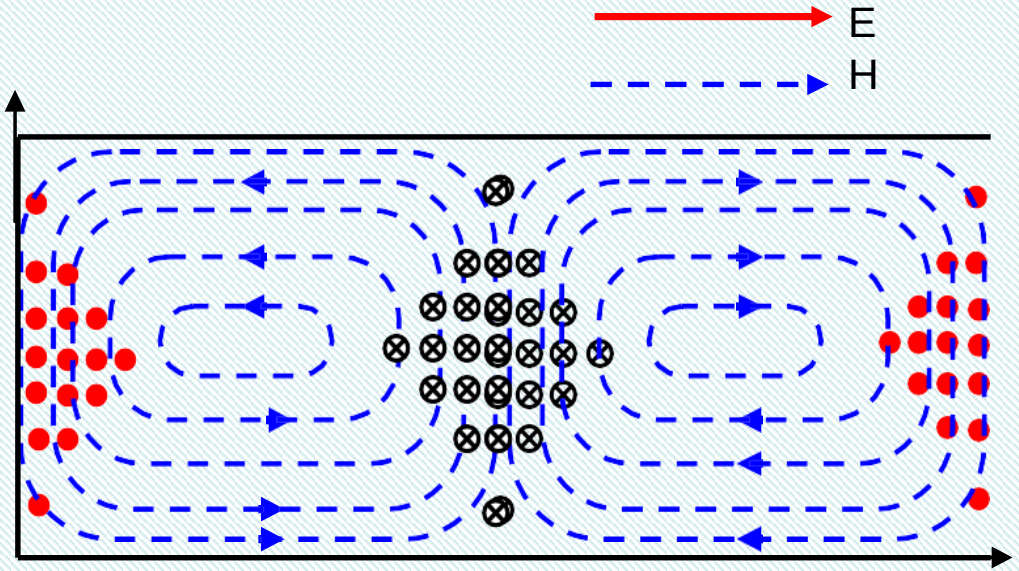



Рис. 3.1. Волновод прямоугольного сечения



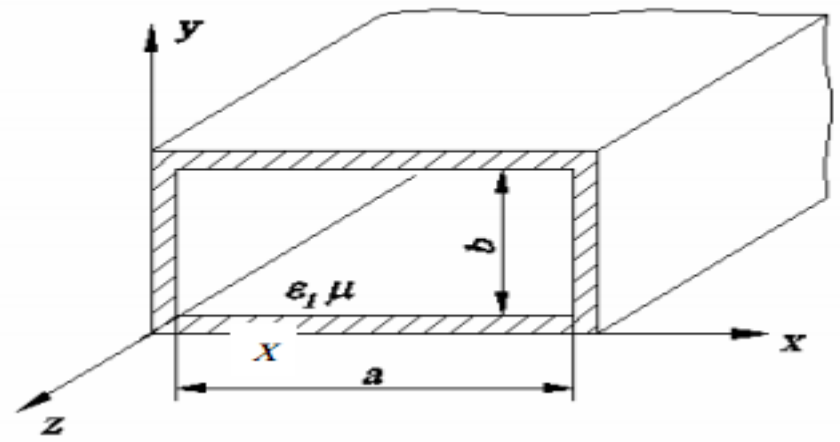

Поверхностные токи волны $H_{10}$




Структура поля основной волны $H_{10}$

# *Постоянная распространения и волновое сопротивление прямоугольного волновода*




$$\gamma = \sqrt{k_{\text{кр}}^2 - k^2} = j\,\frac{\omega}{v}\sqrt{1-(f_{\text{кр}}/f)^2}\ ,$$

$$(k_{\text{кр}})_{m,n} = 2\pi(f_{\text{кр}})_{m,n}\sqrt{\mu\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$\lambda_{кр} = \frac{2ab}{\sqrt{(mb)^2 + (na)^2}}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{кр})^2}}$$

Волновое сопротивление для волны $H_{10}$ .

Характеристическое сопротивление волновода

$$Z_z(H) = \frac{\omega\mu}{\beta} = \frac{n}{\sqrt{1-\left(\omega_{\text{кр}}^2/\omega^2\right)}}\ ,$$

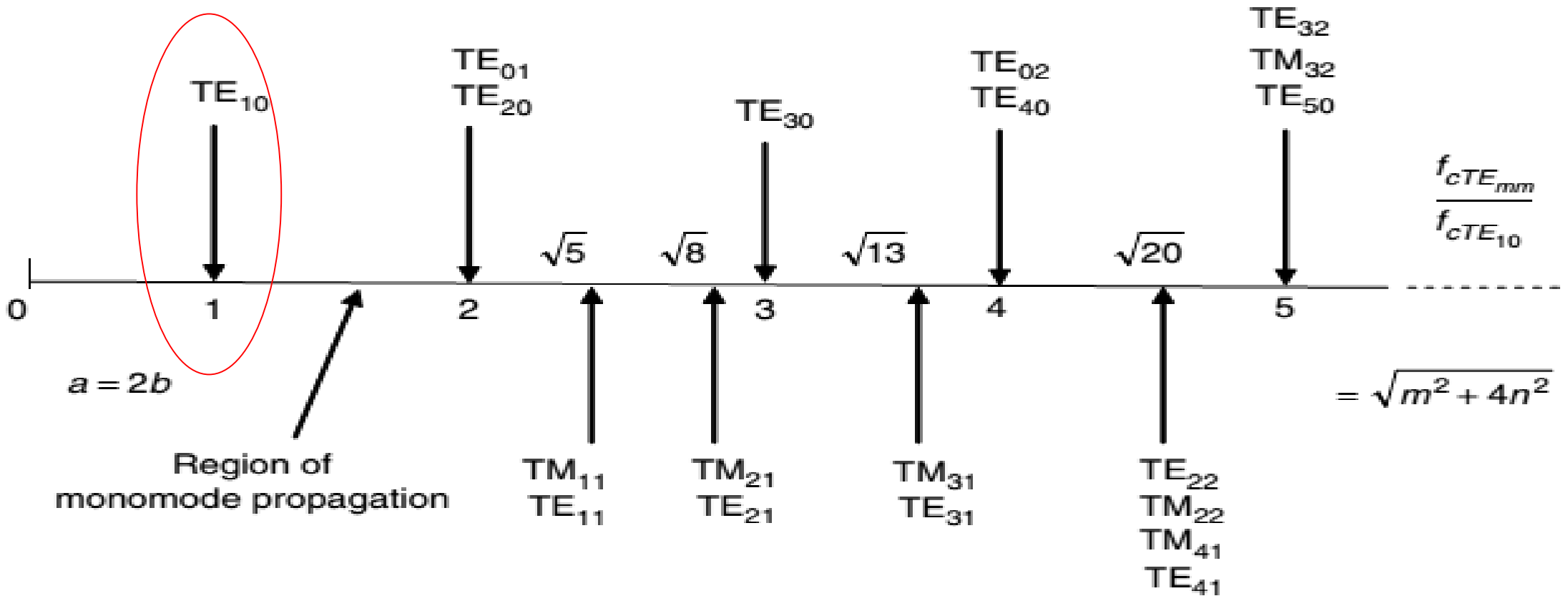
$$Z_z(E) = \beta/\omega\varepsilon = \eta\sqrt{1-\omega_{\text{кр}}^2/\omega^2}\ .$$

$$Z_0(v,i) = Z_z(\pi b/2a)\ ;$$

$$Z_0(W,i) = Z_z\left(\pi^2 b/8a\right);$$

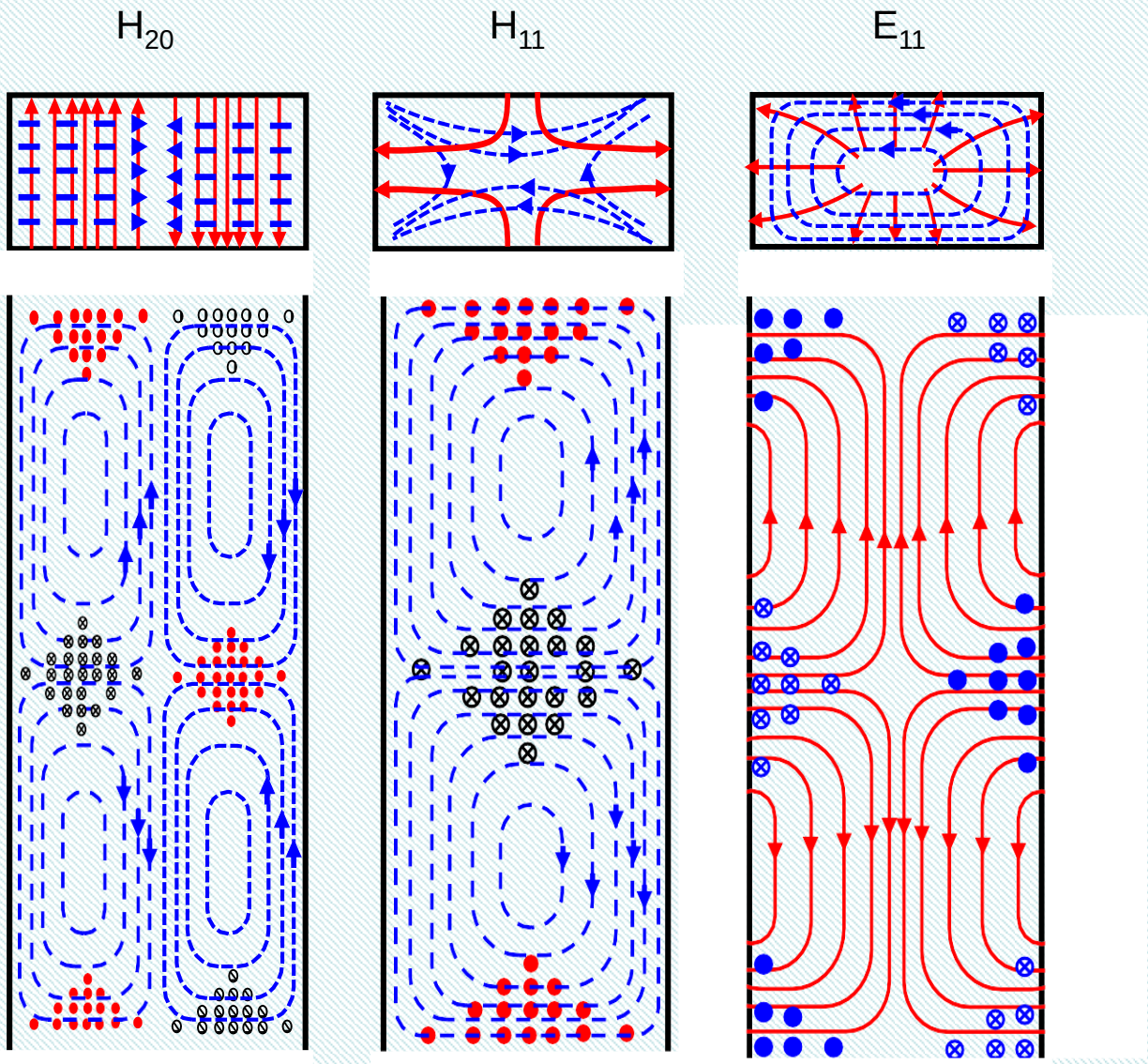
$$Z_0(W,v) = Z_z(2b/a)\ .$$

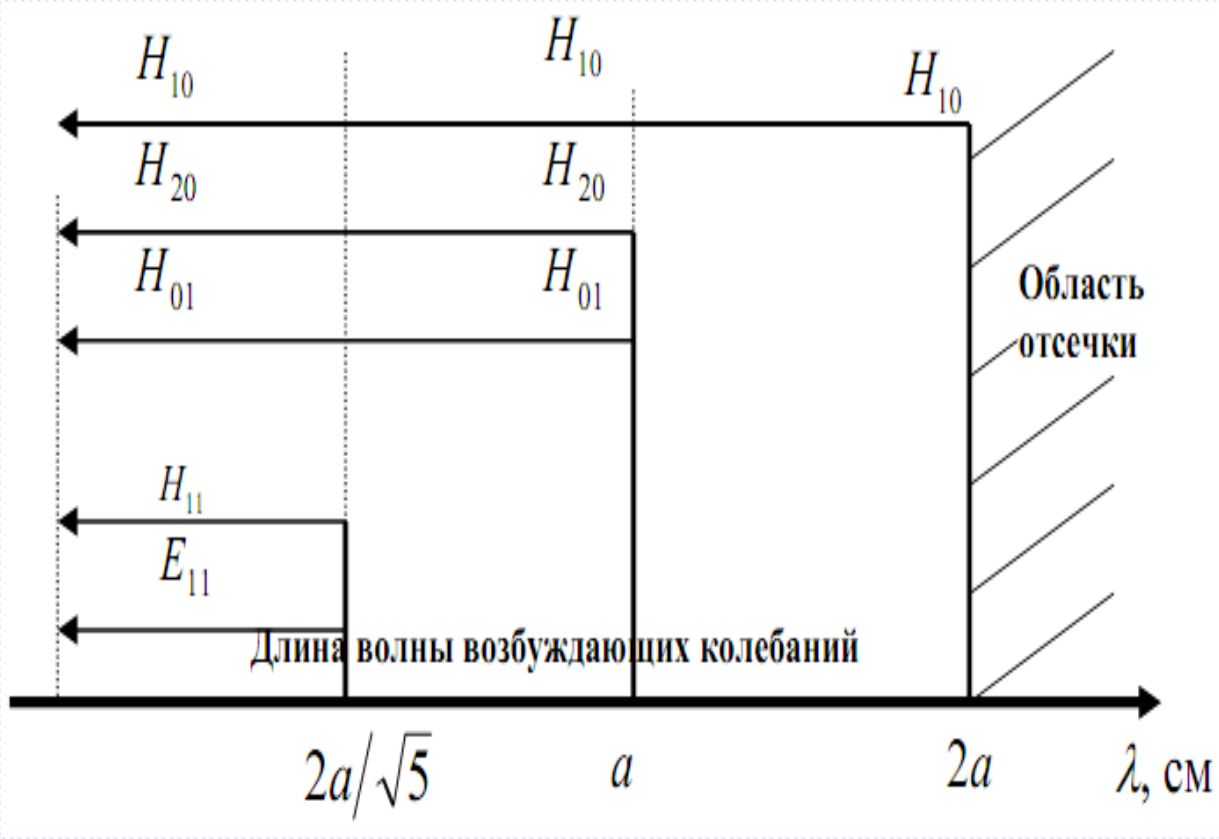
# Частотные диапазоны волн прямоугольного волновода




$$a < \lambda < 2a, \text{ на практике} \Rightarrow 1.11a < \lambda < 1.7a$$

# Высшие типы волн прямоугольного волновода




E

H

| Сечение волновода a x b, мм | Диапазон частот, ГГц | Между-народное обозначение (RCGS) | Стандарт МЭК (IEC) |
|---|---|---|---|
| 72 x 34 | 2.6 – 3.95 (S) | WG-10 | R32 |
| 48 x 24 | 3.94 – 5.99 | WG-12 | R48 |
| 35 x 15 | 5.38 – 8.18 (C) | WG-14 | R70 |
| 28.5x 12.6 | 6.58 – 10.0 | WG-15 | R84 |
| 23 x 10 | 8.2 – 12.5 (X) | WG-16 | R100 |
| 16 x 8 | 12.9-18.0 (Ku) | WG-18 | R140 |

| Сечение $a \times b$, мм | Частота, ГГц | | Длина волны, мм | | $f_{кр}$, ГГц | $\frac{f_{мин}}{f_{кр}}$ | $\frac{f_{макс}}{f_{кр}}$ | $\frac{\lambda_{макс}}{\lambda_{кр}}$ | $\frac{\lambda_{мин}}{\lambda_{кр}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $f_{мин}$ | $f_{макс}$ | $\lambda_{макс}$ | $\lambda_{мин}$ | | | | | |
| 11,0×5,50 | 17,44 | 25,95 | 17,19 | 11,55 | 13,63 | 1,28 | 1,90 | 0,78 | 0,53 |
| 7,2×3,40 | 25,95 | 37,5 | 11,55 | 7,99 | 20,82 | 1,24 | 1,81 | 0,80 | 0,55 |
| 5,2×2,6 | 37,5 | 53,57 | 7,99 | 5,60 | 28,83 | 1,30 | 1,86 | 0,77 | 0,54 |
| 3,6×1,8 | 53,57 | 78,33 | 5,60 | 3,83 | 41,64 | 1,29 | 1,88 | 0,78 | 0,53 |
| 2,4×1,2 | 78,33 | 118,1 | 3,83 | 2,54 | 60,38 | 1,30 | 1,96 | 0,80 | 0,53 |
| 1,6×0,8 | 118,1 | 178,4 | 2,54 | 1,68 | 90,56 | 1,30 | 1,97 | 0,79 | 0,53 |

**Таблица 3.4.2.** ***Потери в стенках прямоугольного волновода с воздушным заполнением***

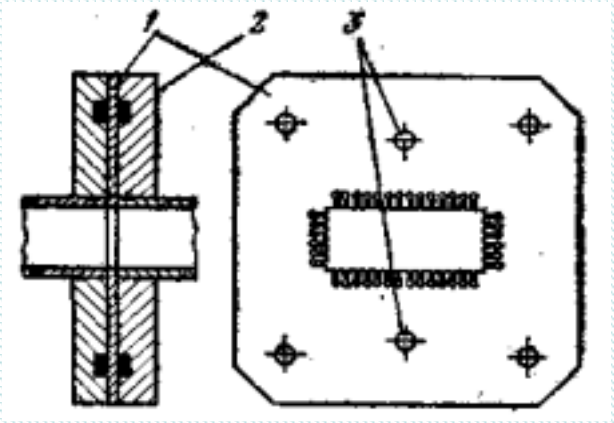
| Сечение волновода $a \times b$, мм | Затухание сигнала $\alpha$, дБ/м, при $\lambda_0 = 1{,}4a$ | | |
|---|---|---|---|
| | серебро | медь | алюминий |
| 11,0×5,50 | 0,352 | 0,359 | 0,458 |
| 7,2×3,40 | 0,690 | 0,704 | 0,889 |
| 5,2×2,6 | 1,081 | 1,103 | 1,410 |
| 3,6×1,8 | 1,877 | 1,913 | 2,447 |
| 2,4×1,2 | 3,449 | 3,519 | 4,496 |
| 1,6×0,8 | 6,335 | 6,464 | 8,263 |

## *Зарубежные стандарты на волноводы*

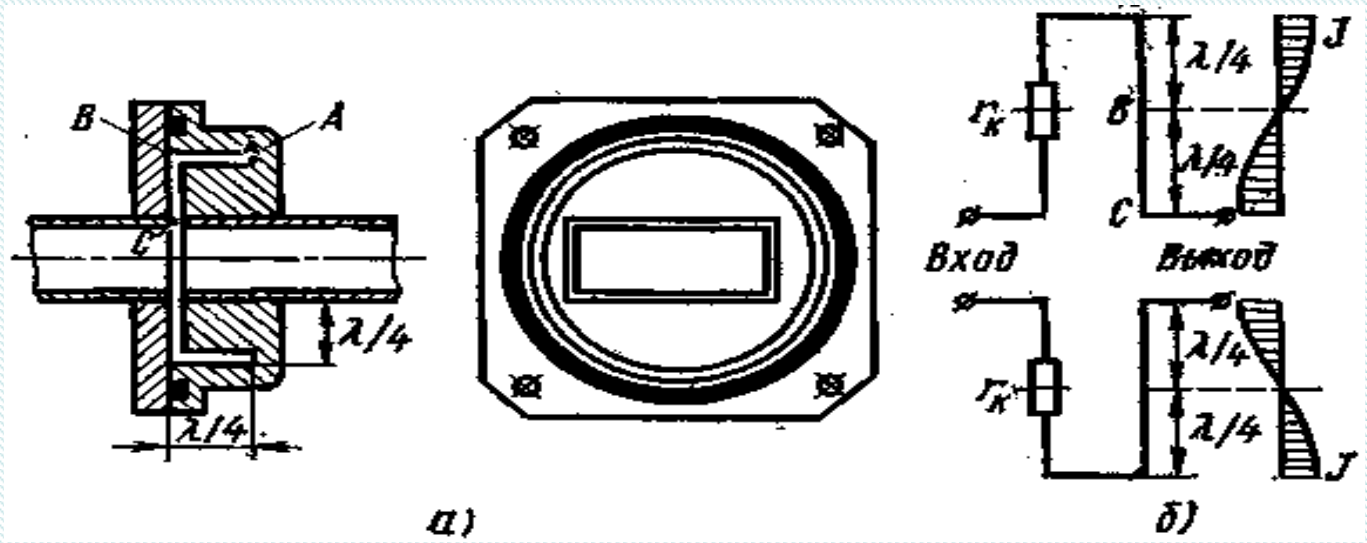
В американском стандарте IEA номер означает ширину волновода в сотых долях дюйма. Например WR 90 – это волновод шириной стенки 23 мм.

| Обозначение | | | Рекомендуемый частотный диапазон | Размеры поперечного сечения | |
|---|---|---|---|---|---|
| 53-IEC | RCSC | IEA | ГГц | мм | дюйм |
| *R*48 | WG 10 | WR 284 | 2,6–3,95 | 72 × 34 | 2,84 × 1,34 |
| – | WG 11A | WR 229 | 3,3–4,9 | 59 × 29 | 2,29 × 1,145 |
| *R*49 | WG 12 | WR 187 | 3,95–5,85 | 48 × 22 | 1,872 × 0,872 |
| – | WG 13 | WR 159 | 4,9–7,05 | 40 × 20 | 1,59 × 0,795 |
| *R*50 | WG 14 | WR 137 | 5,85–8,2 | 35 × 16 | 1,372 × 0,622 |
| *R*84 | WG 15 | WR 112 | 7,05–10 | 29 × 13 | 1,122 × 0,497 |
| *R*100 | WG 16 | WR 90 | 8,12–12,4 | 23 × 10 | 0,9 × 0,4 |
| *R*120 | WG 17 | WR 75 | 10–15 | 19 × 8,5 | 0,75 × 0,375 |
| *R*140 | WG 18 | WR 62 | 12,4–18 | 16 × 7,9 | 0,622 × 0,311 |
| *R*180 | WG 19 | WR 51 | 15–22 | 13 × 5,8 | 0,51 × 0,255 |
| *R*220 | WG 20 | WR 42 | 18–26,5 | 11 × 4,3 | 0,51 × 0,255 |
| *R*260 | WG 21 | WR 34 | 22,0–33,0 | 8,6 × 4,3 | 0,34 × 0,17 |
| *R*320 | WG 22 | WR 28 | 26,5–40,0 | 7,1 × 3,6 | 0,28 × 0,14 |
| *R*400 | WG 23 | WR 22 | 33–50 | 5,7 × 2,9 | 0,224 × 0,112 |
| *R*500 | WG 24 | WR 19 | 40–60 | 4,8 × 2,4 | 0,188 × 0,094 |
| *R*620 | WG 25 | WR 15 | 50–75 | 3,8 × 1,9 | 0,148 × 0,074 |
| *R*740 | WG 26 | WR 12 | 60–90 | 3,1 × 1,6 | 0,122 × 0,061 |
| *R*900 | WG 27 | WR 10 | 75–110 | 2,4 × 1,3 | 0,1 × 0,05 |
| *R*1200 | WG 28 | WR 8 | 90–140 | 2,0 × 1,0 | 0,08 × 0,04 |
| | WG 29 | WR 7 | 110–170 | 1,7 × 0,82 | 0,065 × 0,0325 |
| | WG 30 | WR 5 | 140–220 | 1,3 × 0,65 | 0,051 × 0,0255 |
| | WG 31 | WR 4 | 170–260 | 1,1 × 0,55 | 0,043 × 0,0215 |
| | WG 32 | WR 3 | 220–325 | 0,87 × 0,44 | 0,034 × 0,017 |

# Конструкции волноводных соединителей





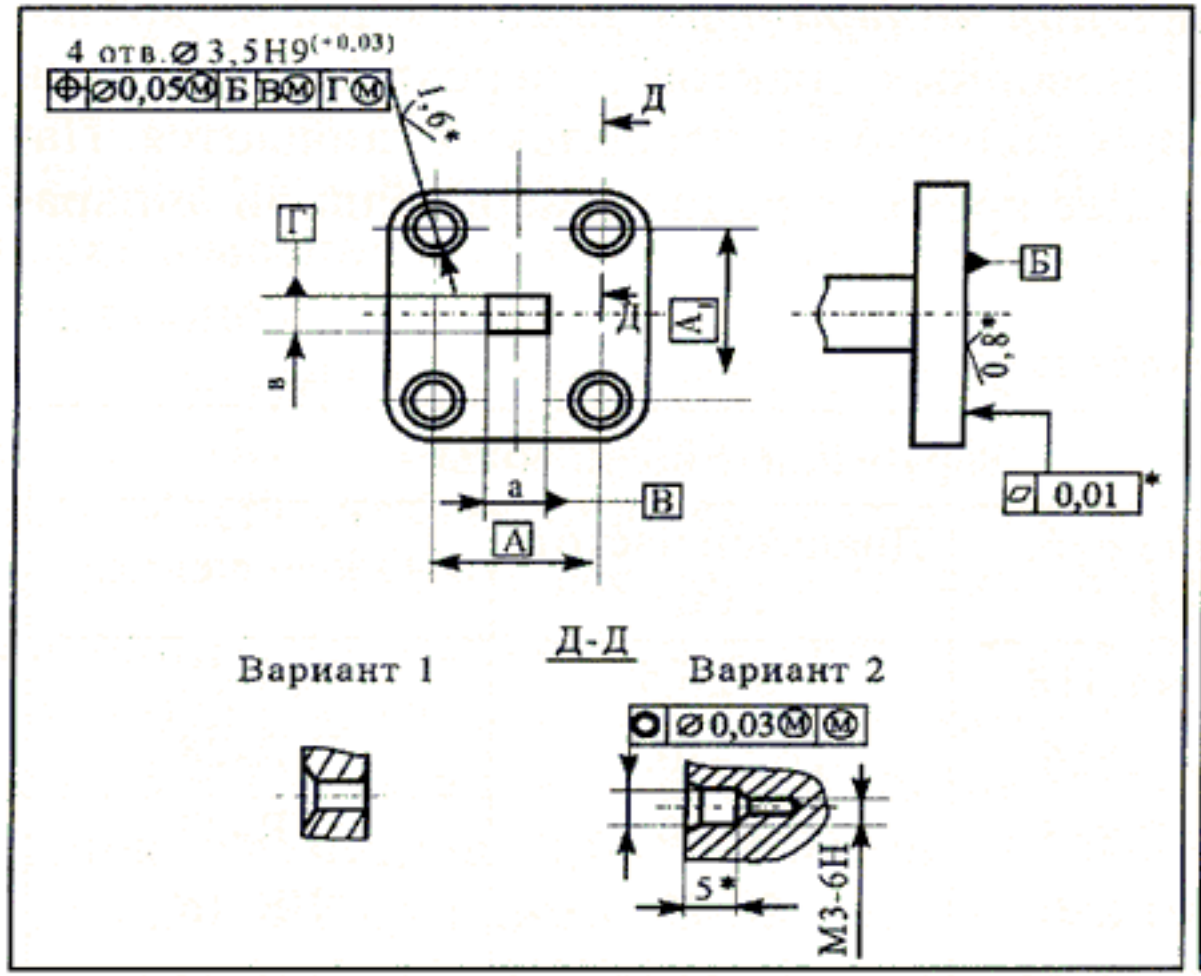




Контактный волноводный фланец:
*1* — контактная прокладка;
*2* — канавки с уплотнителем;
*3* — отверстия для фиксирующих штифтов

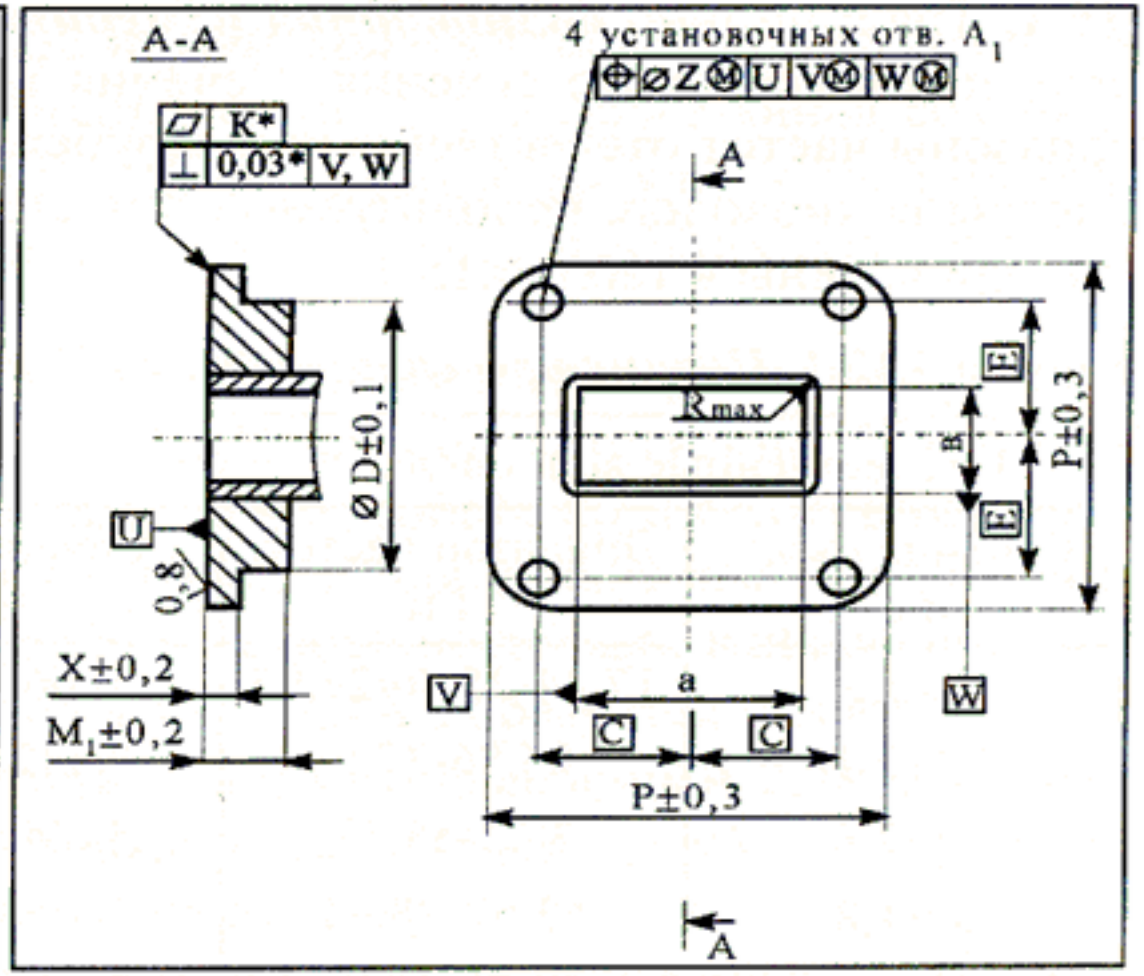
Дроссельный фланец. Контакт осуществляется через последовательный короткозамкнутый шлейф длиной $\lambda/2$, выполненный в форме канавки и углубления внутри фланца. Точка механического контакта В попадает в узел распределения поверхностного тока .



# Стандартные фланцы волноводов СВЧ диапазона




Фланцы для волноводов сечением 7,2×3,4 мм, 11×5,5 мм




Фланцы квадратные для волноводов WR-42 и WR-28

# Стандартные фланцы волноводов КВЧ диапазона

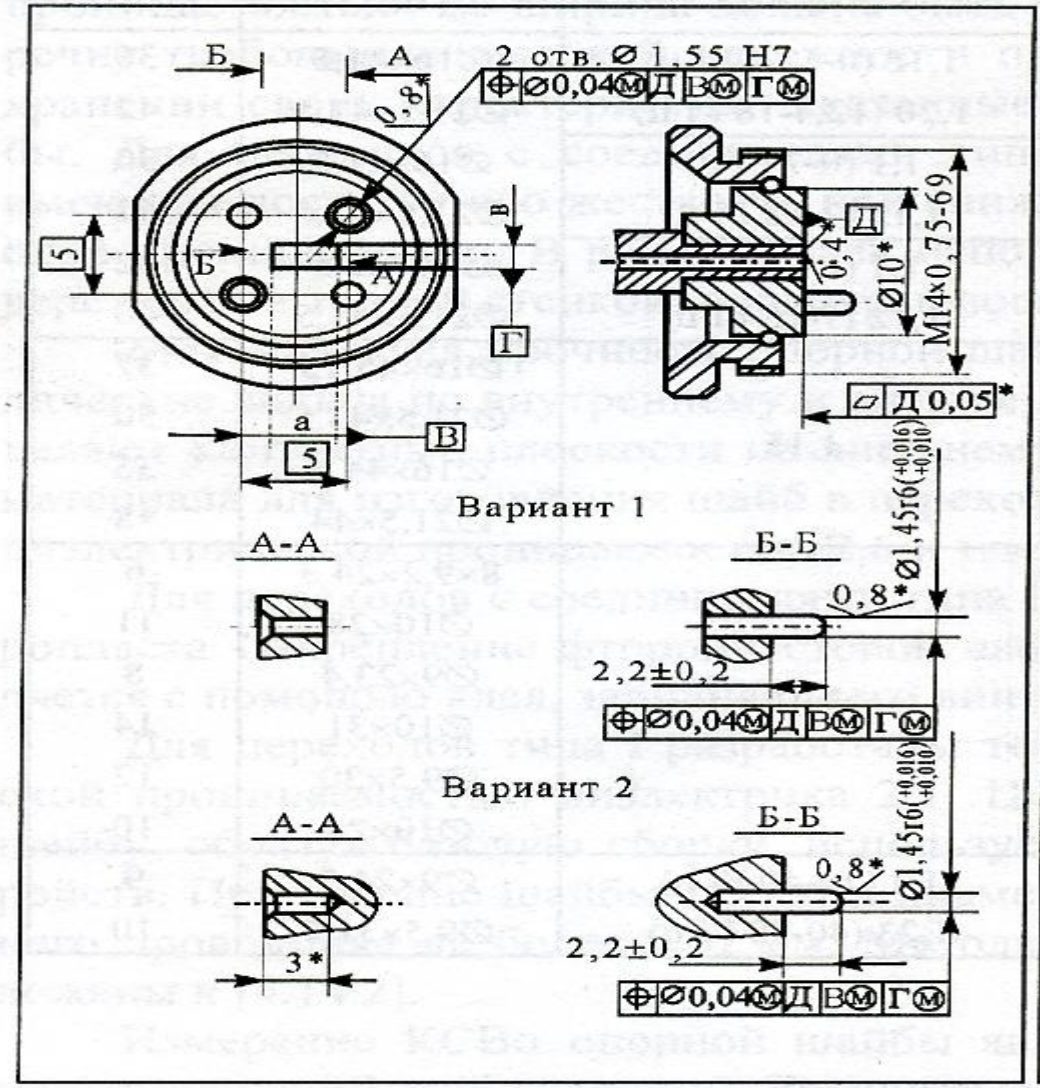



**Рис.4.15.1.** Фланцы для волноводов сечением 1,6×0,8 мм, 2,4×1,2 мм

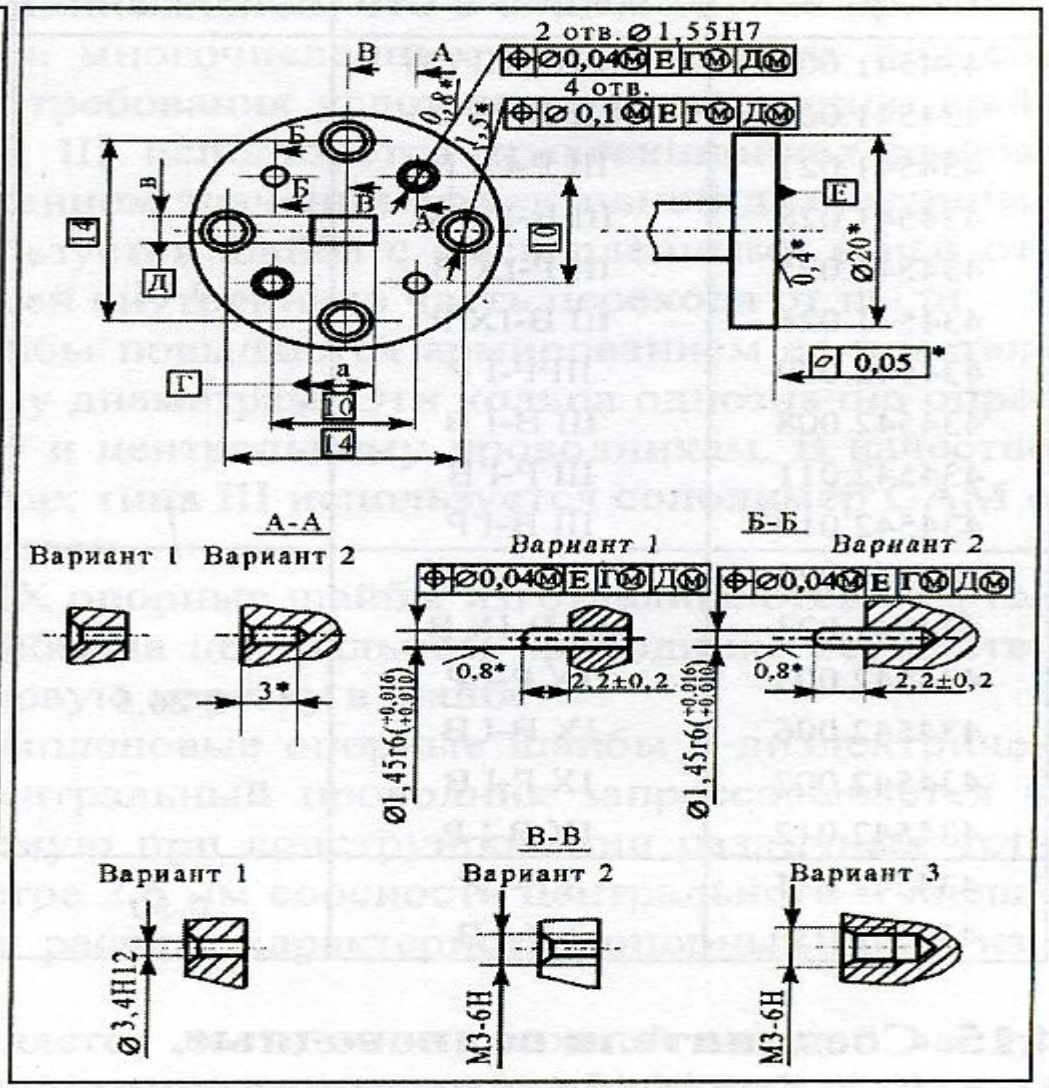



**Рис. 4.15.2.** Фланцы для волноводов сечением 3,6×1,8 мм, 5,2×2,6 мм

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*

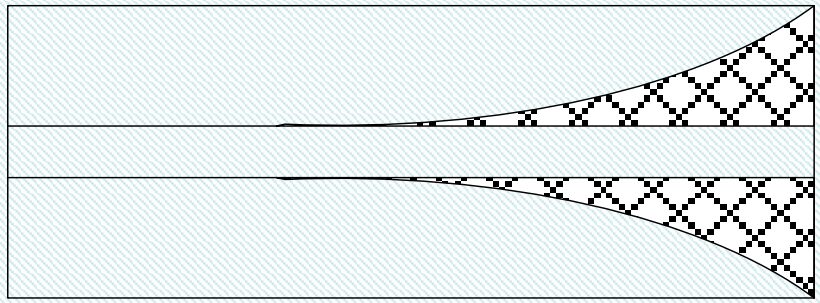
*Конспект лекций по дисциплине «Измерения на СВЧ»*
*(2 редакция)*

# СВЧ нагрузки и многопортовые узлы

Санкт-Петербург
2025 г.


Элементы измерительного тракта СВЧ
Линии передачи
Коаксиальные
Волноводные
Разъемы
Фланцы
СВЧ нагрузки
Согласован-ные
Плунжеры
Слайдеры
Двухпортовые элементы
Переходы
Аттенюаторы, фазовращатели, вентили
Фильтры , усилители
Трех- и четырехпорто вые элементы
Делители, сумматоры, циркуляторы
Направленные ответвители, мосты

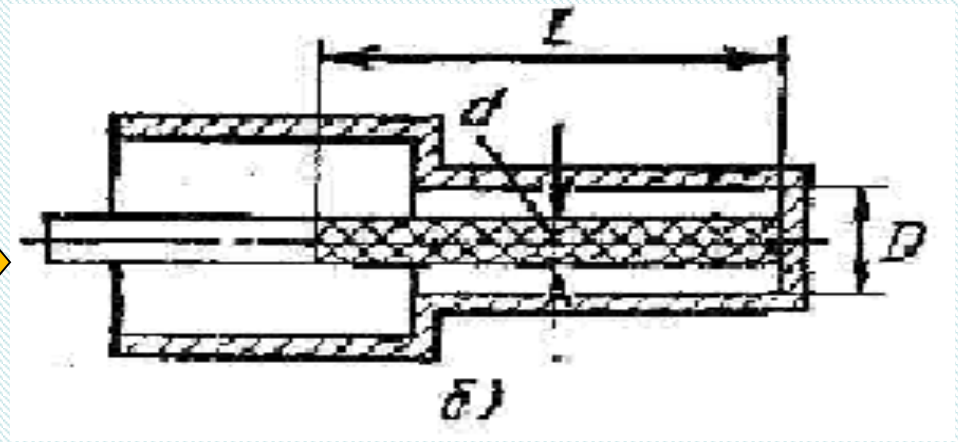
# Коаксиальные нагрузки с объемным поглощающим элементом



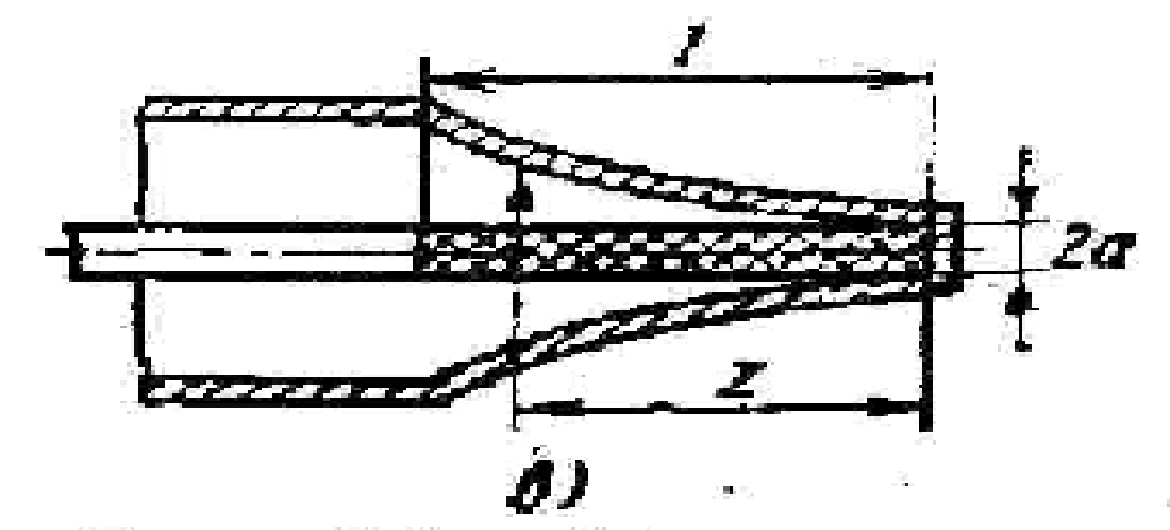
- отрезок нерегулярной линии передачи с потерями (ферроэпоксидный компауд и др.)

Хорошее качество - при длине нагрузки $\geq \lambda$.

Коаксиальная нагрузка с керамическими цилиндрами. Покрыты металлооксидными или углеродистыми пленками. Толщина меньше скинслоя - слабая зависимость сопротивления от частоты. Хорошее согласование при $\lambda \geq 6L$.

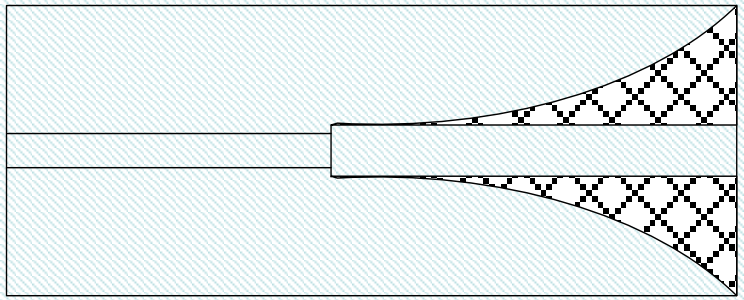


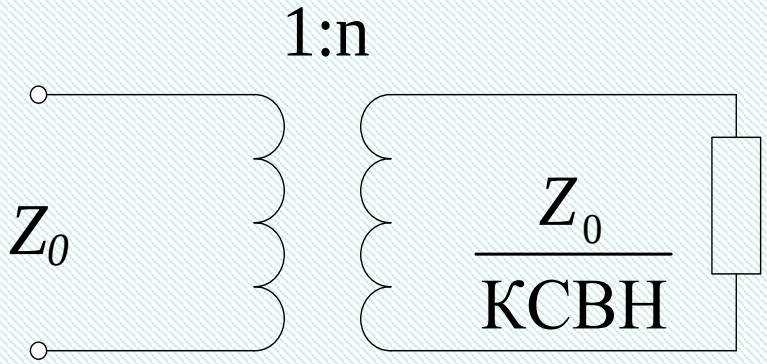
# Широкополосные коаксиальные нагрузки



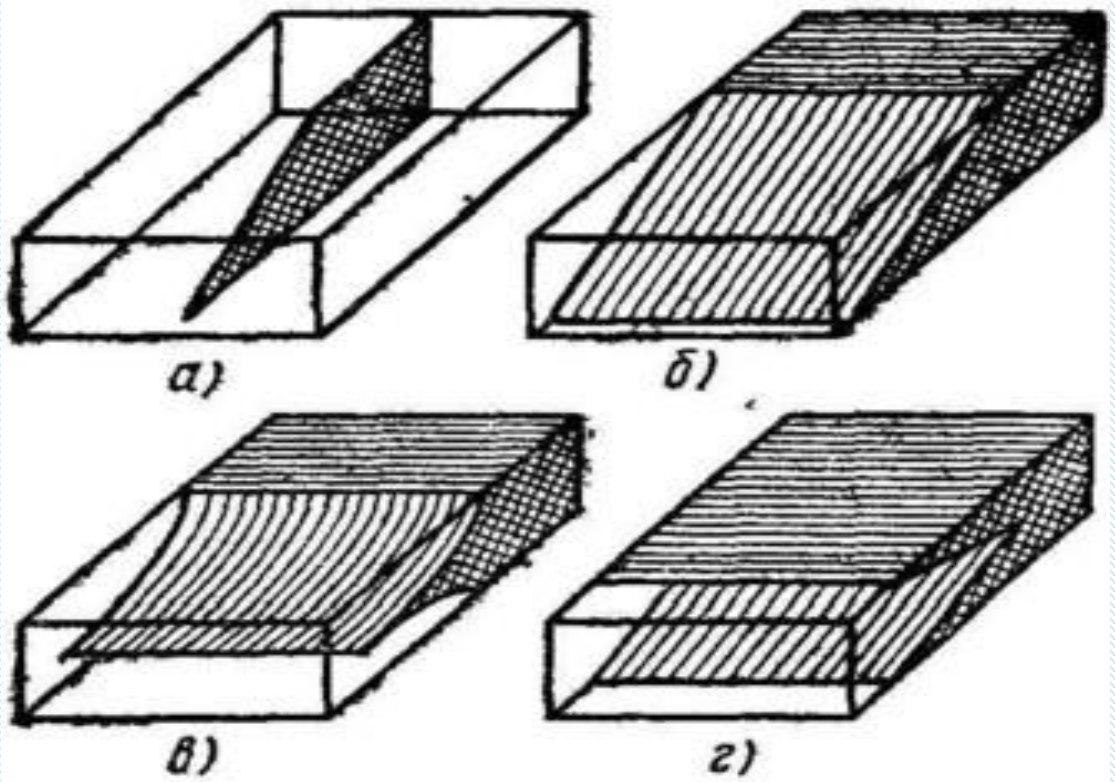

Внешний экран экспоненциальной формы или профиль в виде специальной кривой - **трактрисы.**

Рассогласованная нагрузка с заданным КСВН (скачок диаметра внутреннего проводника)





# Волноводные согласованные нагрузки




*Волноводные согласованные нагрузки*
-поглощающие вставки переменного профиля в отрезке к.з. волновода. Вариант маломощных нагрузок - вставки в виде тонких диэлектрических пластин, покрытых графитовой пленкой (рис. *а).* Объемные поглощающие вставки (рис. *б, в, г)* - из композитных материалов на основе порошков графита, карбонильного железа или карбида кремния.

Для устранения отражения от короткозамыкателя вставка должна вносить ослабление минимум 20—25 дБ.

# Реактивные СВЧ нагрузки

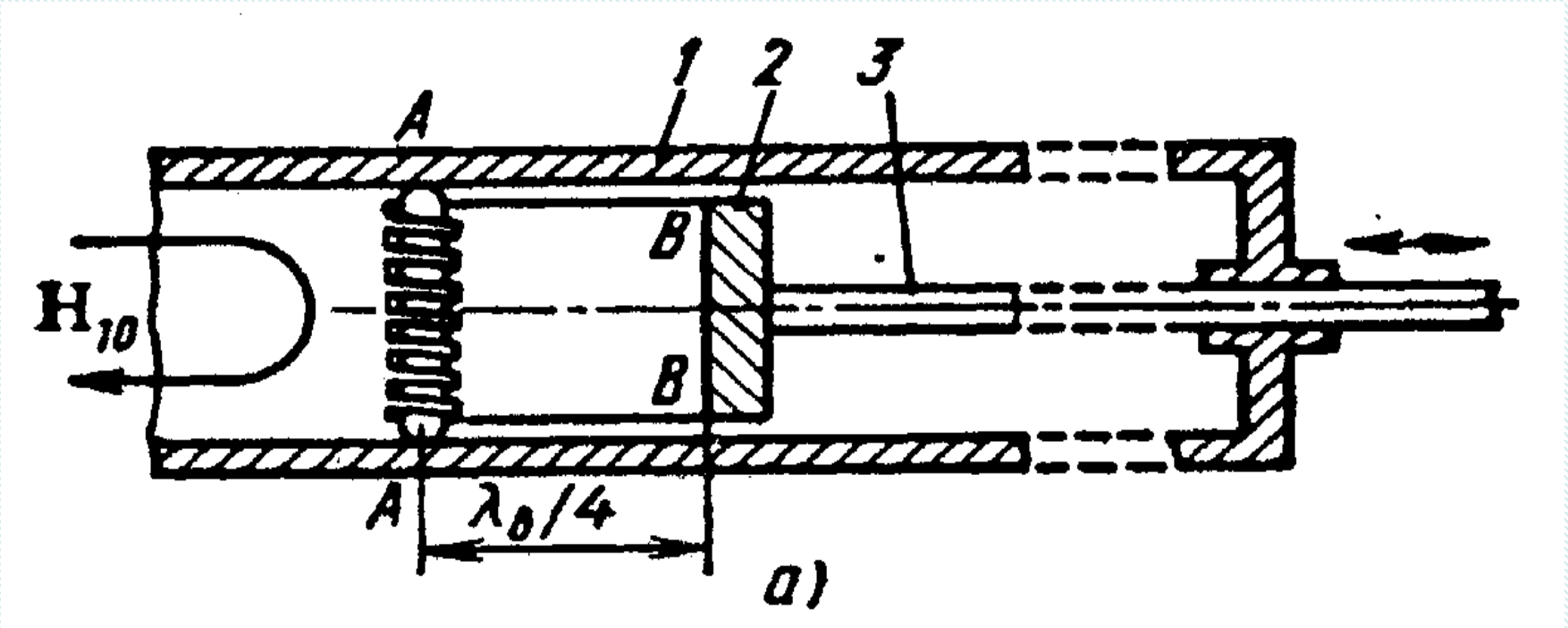
Реактивные нагрузки – регулятор фазы отраженной волны. Обычно - короткозамкнутые отрезки линий передачи с переменной длиной (КЗ шлейфы или плунжеры). Реактивное сопротивление короткозамкнутого шлейфа определяют по формуле:

$$X_{шл} = Z_B tg\beta l$$

где $Z_B$ —волновое сопротивление; β - коэффициент фазы, $l$ - длина шлейфа.

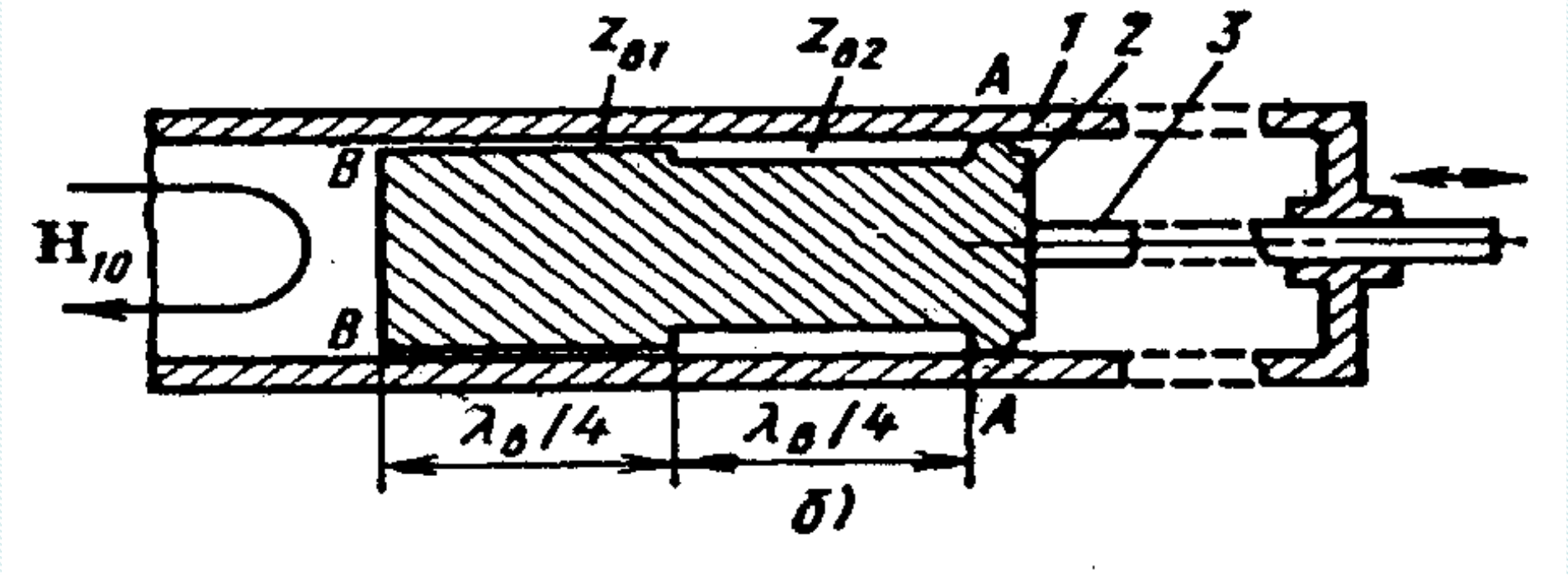
Основной параметр качества плунжера - входной КСВ. В нерегулируемых коаксиальных или волноводных шлейфах КСВ>500. В регулируемых шлейфах (плунжерах) КСВ ниже (до 100). Холостой ход может быть реализован только в закрытых линиях передачи (коаксиальные линии малого диаметра).

# Волноводные подвижные короткозамыкатели (поршни)




*1* — волновод;
*2* — поршень;
*3* — тяга

Разрезные пружинные контакты *A* вынесены от закорачивающей стенки *B* внутрь волновода на расстояние $\lambda_в/4$. Поэтому контакты оказываются в сечении с малым продольным током.




Дроссельный плунжер. Механические контакты *A* расположены через два трансформирующих четвертьволновых отрезка с низким волновым сопротивлением $Z_{B1}$ и $Z_{B2}$. Активное сопротивление контактов в точке *A* равно $r_A$. Входное сопротивление в точках *B:* $r_B = r_A(Z_{B1}/Z_{B2})^2$. При выборе $Z_{B1} << Z_{B2}$ удается существенно увеличить КСВ поршня.

Рабочие и образцовые согласованные,
КЗ и ХХ нагрузки СВЧ;
Рабочие и образцовые переходы.



нагрузка 3,5В1



нагрузка НХХ-78



нагрузка Э9-159



отрезок коаксиальный
Э2-148



нагрузка Э9-154

**Основные технические характеристики СВЧ нагрузок:**

| Тип соединителя по ГОСТ 13317-89 | КСВН | Волновое сопротивление, Ом | Диапазон частот, ГГц |
|---|---|---|---|
| III, варианты 1 и 3, вилка | 1,0+0,025 | 50 | 0 … 4,00 |
| | 1,2±0,05 | | |
| | 1,4±0,05 | | |
| | 2,0±0,05 | | |
| | 3,0±0,1 | | |
| IX, варианты 1 и 3, вилка | 1,0+0,025 | 50 | 0 … 18,00 |
| | 1,2±0,05 | | |
| | 1,4±0,1 | | |
| | 2,0±0,1 | | |
| | 3,0±0,1 | | |
| IV; VI вилка и розетка | 1 + 0,05 | 50 | 0,0003…3,5 |
| VII вилка и розетка | 1 + 0,05 | 75 | 0,0003…1 |



переход
измерительный
7В-7В



переход
измерительный
7В-3,5Р



переход
измерительный
N(P)-VI(B)



переход
измерительный
N(B)-VI(P)

.01

# *Переходы (адаптеры) для разъемов разного типа*

Для каждого типа стандартного соединителя необходимы переходы типа «вилка-вилка», «вилка-розетка» и «розетка-розетка» («male-male» (m-m), «male-female» (m-f) и «female-female» (f-f).

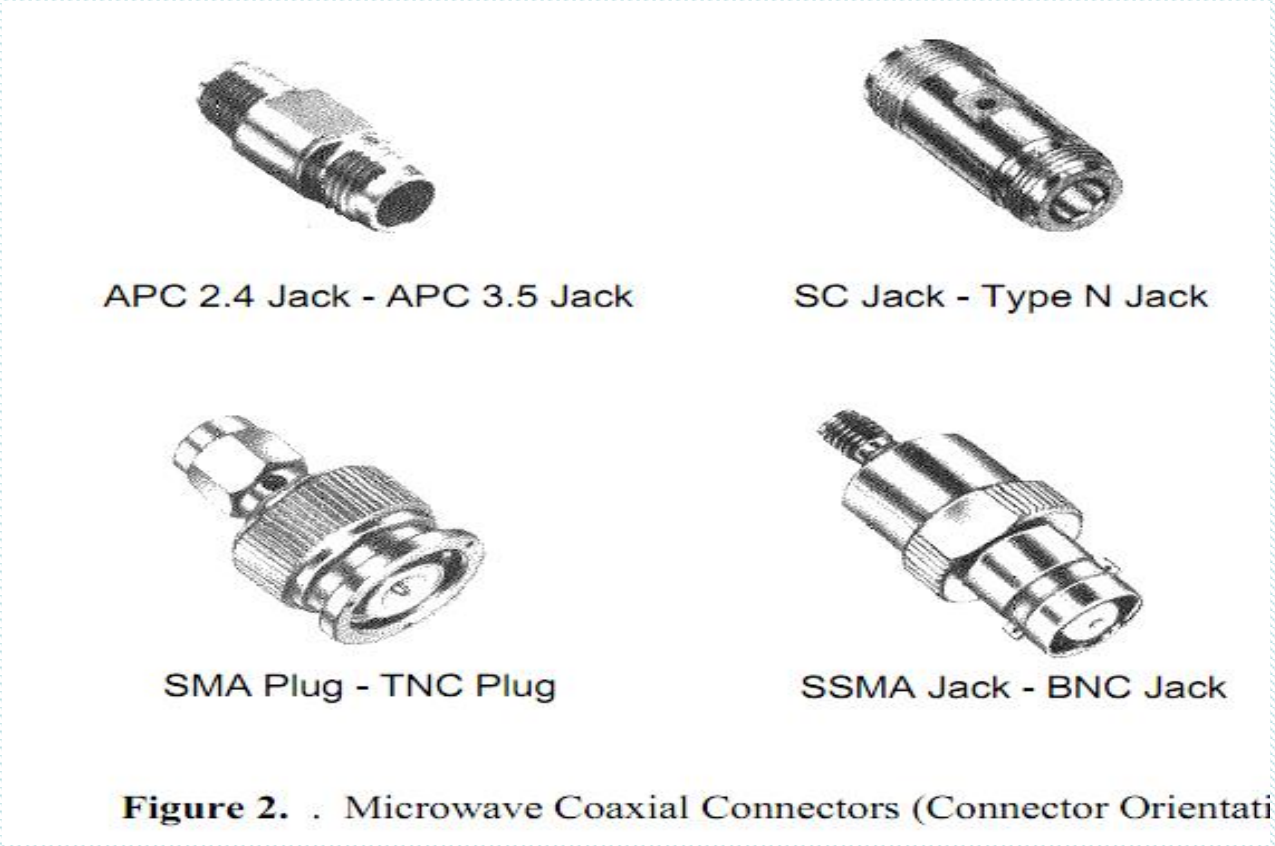
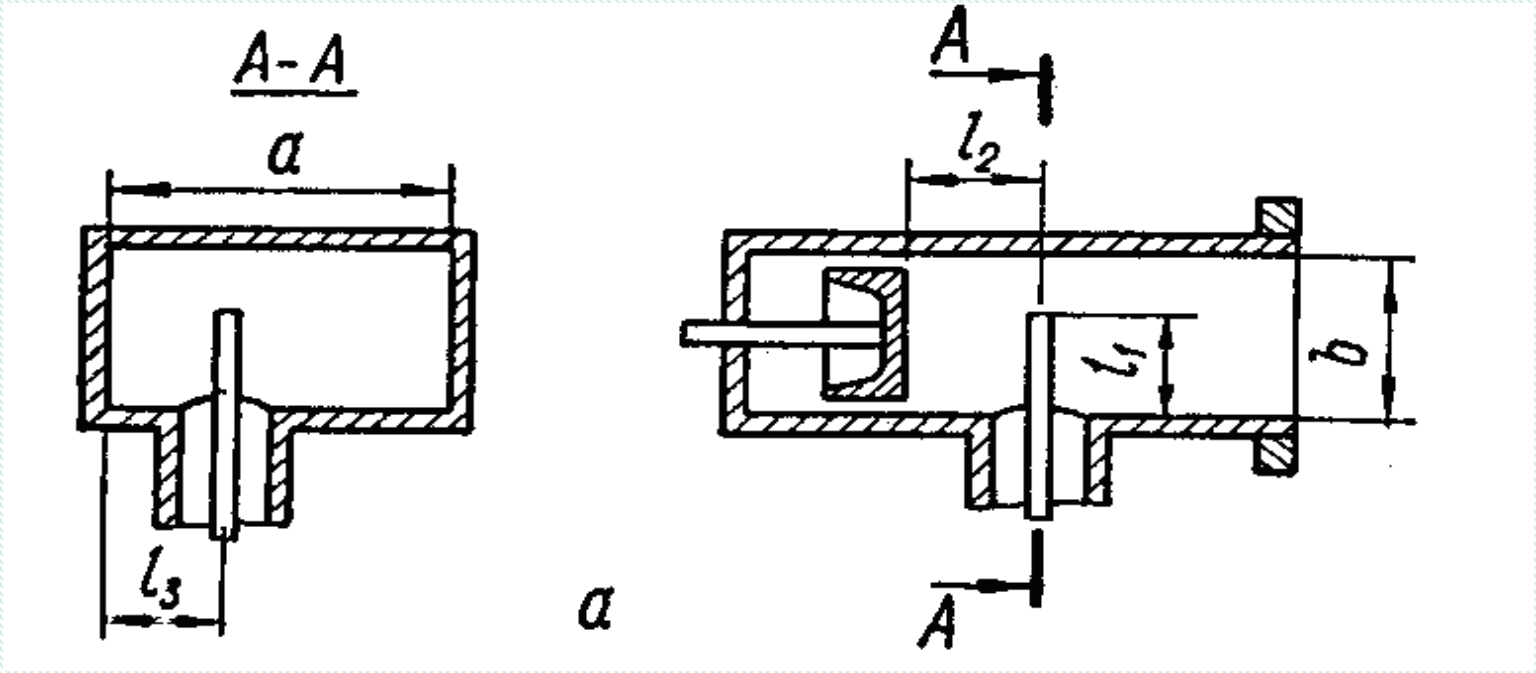


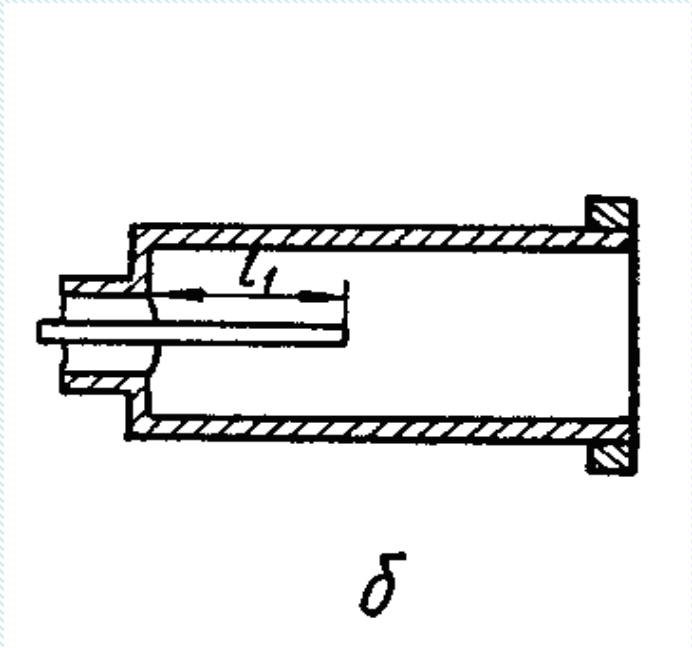

**Figure 2.** . Microwave Coaxial Connectors (Connector Orientati



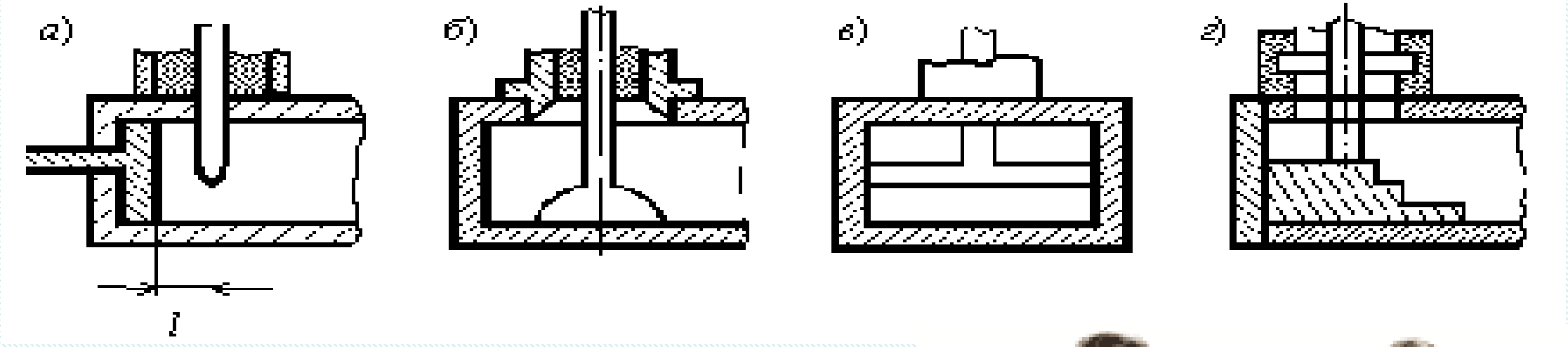
# *Коаксиально-волноводные переходы.*

Если в измерительном тракте необходимы волноводные устройства, применяют *коаксиально-волноводные переходы*.

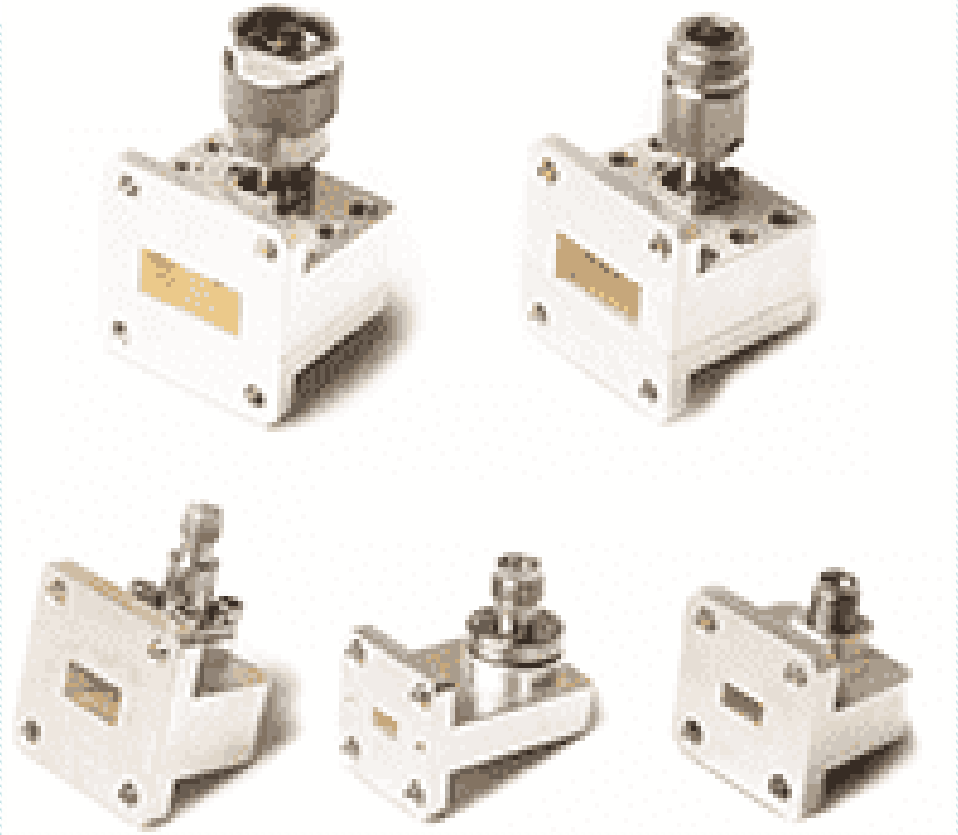



Волноводно – коаксиальные переходы: а) – для всех типов Н; б) – для всех типов Е.




В переходах используют выступающий центральный проводник коаксиальной линии как элемент связи. Расположение штыря относительно стенок определяет коэффициент связи. Кондуктивные штыри – переходы для высокого уровня мощности, имеют высокую механическую прочность



# Ступенчатый широкополосный коаксиально-волноводный переход

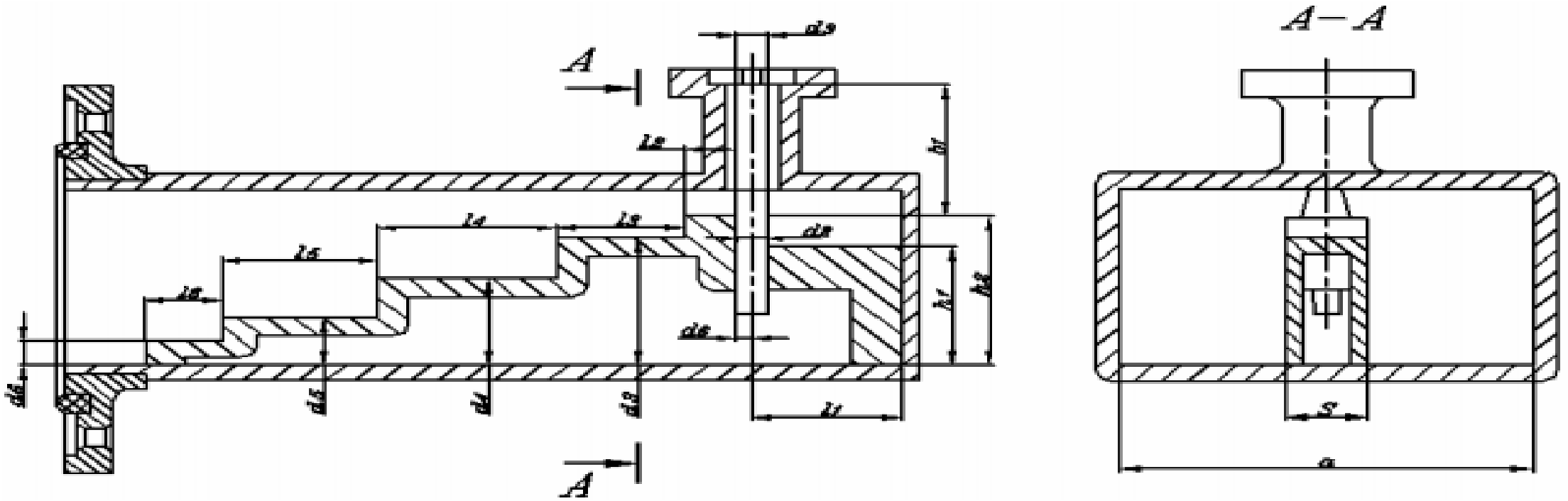



**Рис. 2.12. Конструкция и размеры (мм) многоступенчатых коаксиально-волноводных переходов**

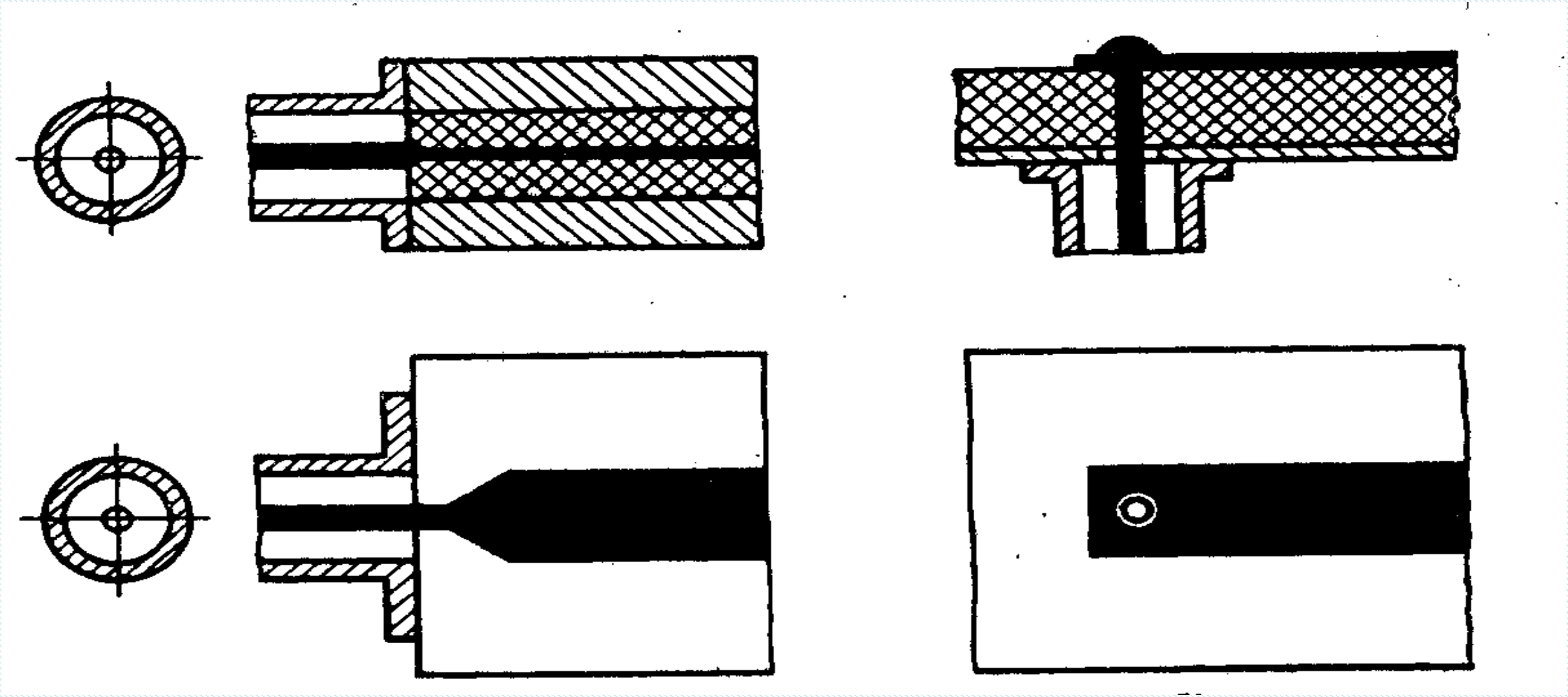
# *Переход с круглого сечения на прямоугольное*



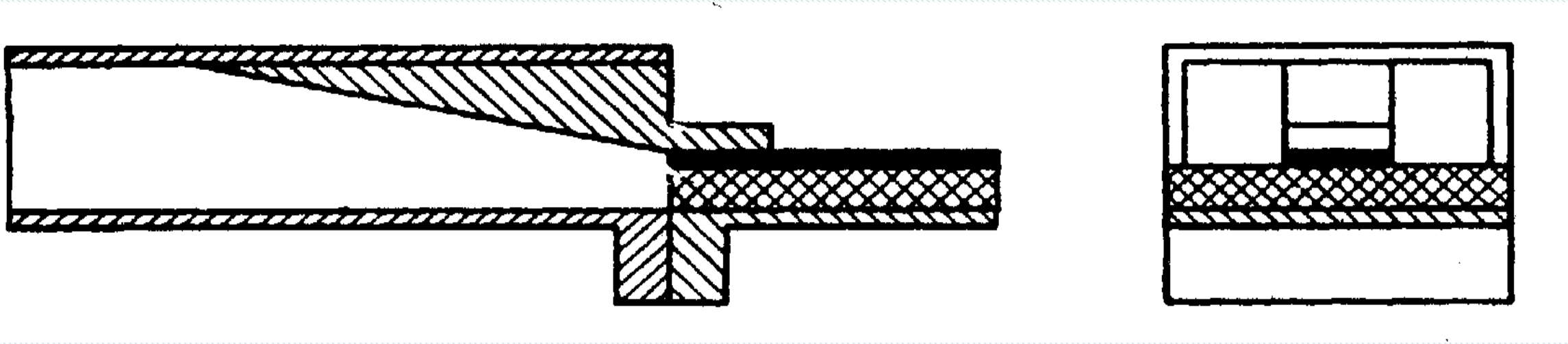


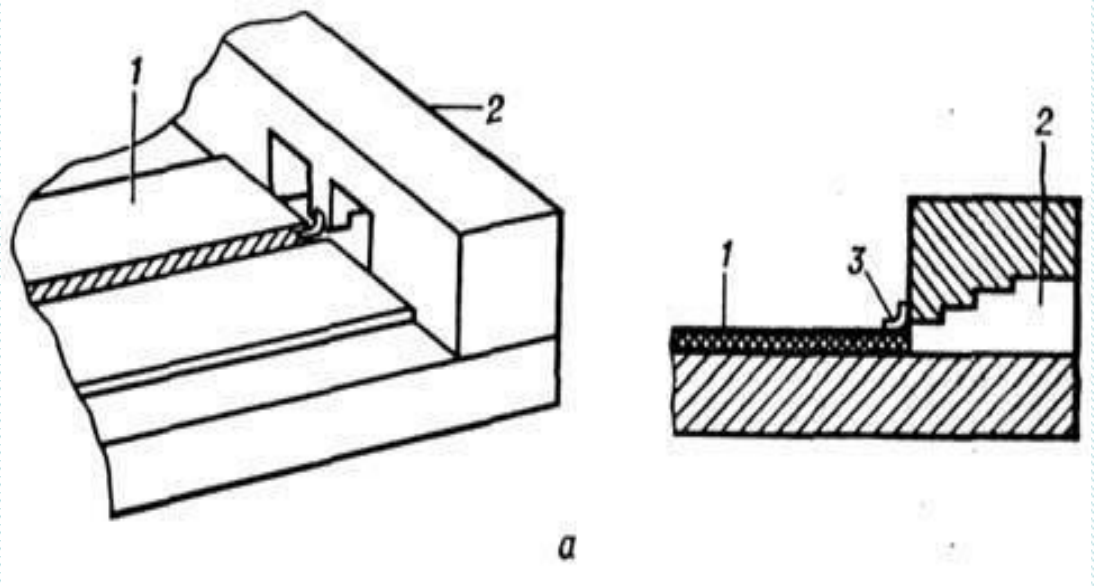

| FREQUENCY BAND | K | Ka | T | Q | U | V | E | W | F | D | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Frequency Range (GHz) | 18-26.5 | 26.5-40 | 18-40 | 33-50 | 40-60 | 50-75 | 60-90 | 75-110 | 90-140 | 110-170 | 140-220 |
| Insertion Loss (dB max) | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 1.0 | 1.0 |
| VSWR (max) | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 |
| Length, inches/mm (typ) | 2.0/50.8 | 1.50/38.1 | 1.50/38.1 | 1.50/38.1 | 1.50/38.1 | 1.10/27.9 | 1.10/27.9 | 1.10/27.9 | 1.10/27.9 | 1.10/27.9 | 1.10/27.9 |
| Flange Pattern | UG-595/U | UG-599/U | WRD-180 | UG-383/U | UG-383/U | UG-385/U | UG-387/U | UG-387/U-M | UG-387/U-M | UG-387/U-M | UG-387/U-M |

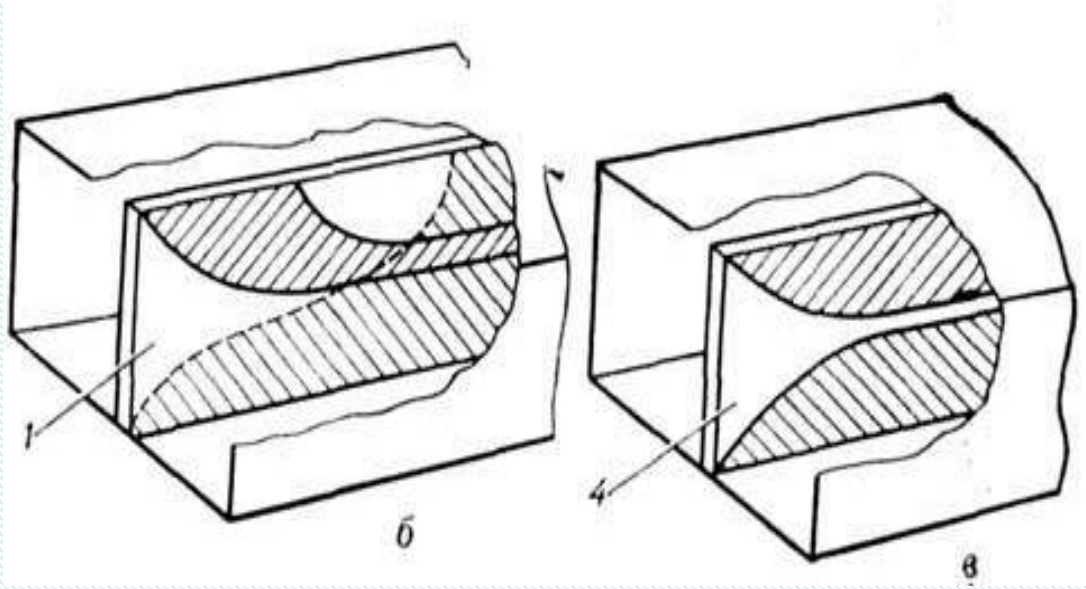
# *Коаксиально-полосковые переходы*



# Волноводно-полосковые переходы





# Трехпортовые (шестиполюсные) элементы измерительного тракта СВЧ

Теорема: *Взаимный реактивный шестиполюсник не может быть согласован по всем входам с помощью реактивных согласующих устройств.*
Это следствие унитарности матрицы рассеяния

Следствие 1: *Согласованный по всем входам невзаимный реактивный шестиполюсник является идеальным циркулятором.*

$$[S]=\begin{bmatrix} 0 & e^{j\theta} & 0 \\ e^{j\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi} \end{bmatrix}$$

# 3-дБ тройники (рассогласованные делители)

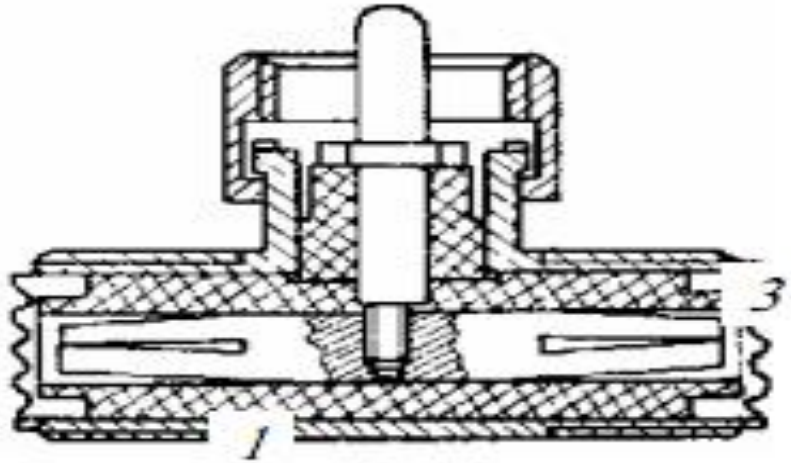



Рис. 1. Коаксильный тройник

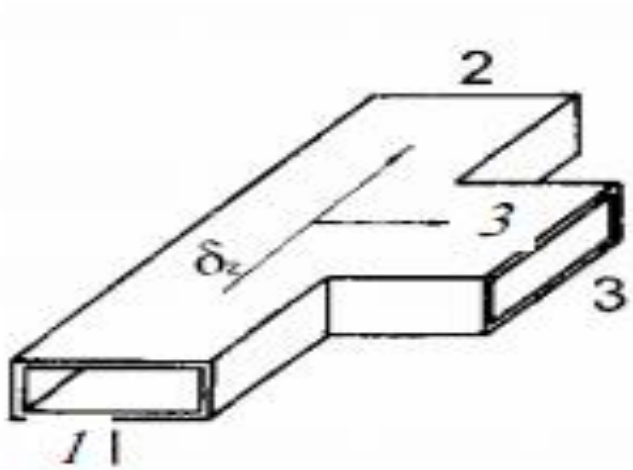



Рис. 2. Разветвление волноводов в плоскости *H*

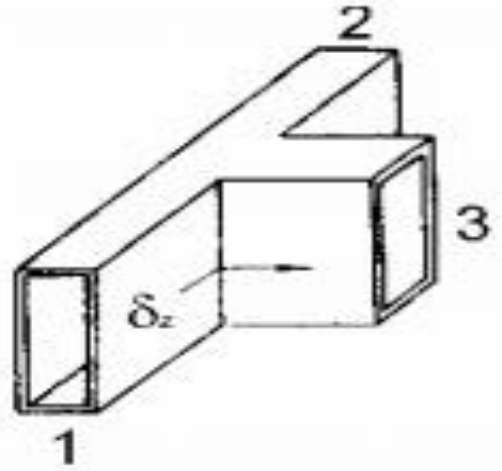
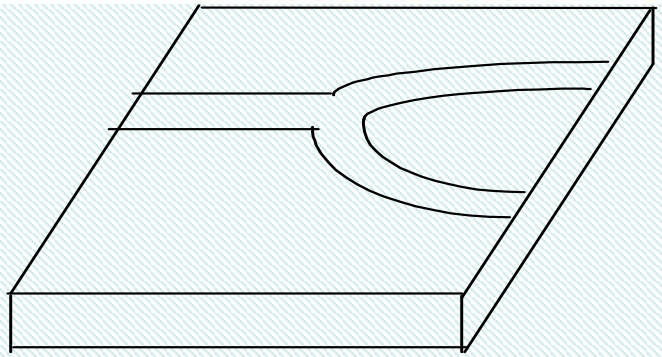



Рис. 3. Разветвление волноводов в плоскости *E*

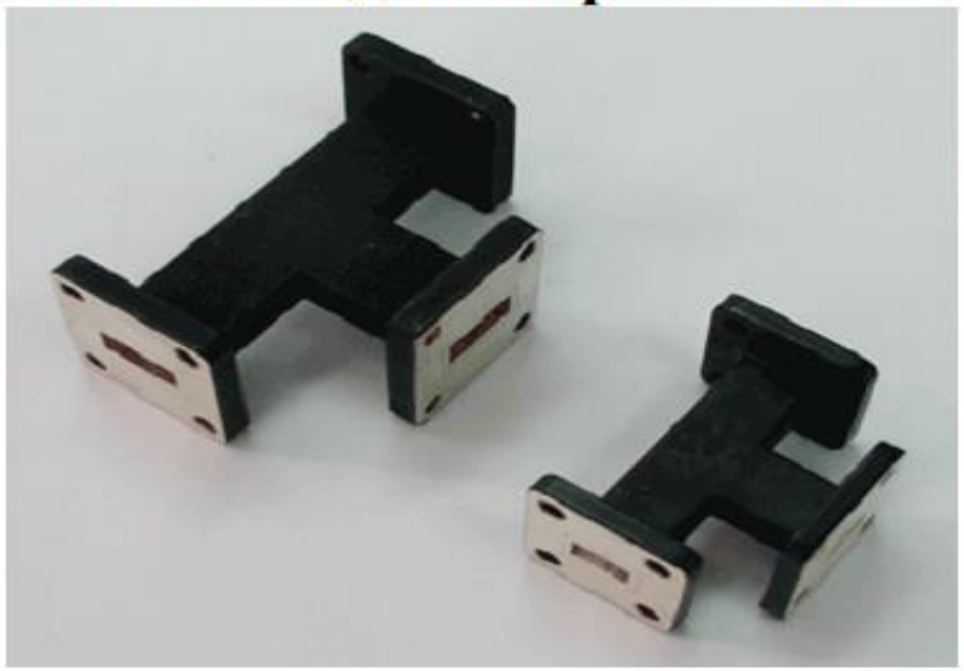
$$[S]=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1 & 1 & \sqrt{2}\\ 1 & 1 & -\sqrt{2}\\ \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0\end{bmatrix}$$ -для Е-тройника;

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



Микрополосковый тройник

## Волноводные тройники:



| Диапазон частот | Деление по плечам в указанном диапазоне частот | Сечение волновода |
|---|---|---|
| 8...12 ГГц | ±0,5 дБ | 35x15 mm |
| 10...15 ГГц | ±0,5 дБ | 19x9,5 mm |
| 12...18 ГГц | ±0,5 дБ | 16x8 mm |
| 18...26 ГГц | ±0,5 дБ | 11x5,5mm WR42 |
| 26...40 ГГц | ±0,5 дБ | WR28 |

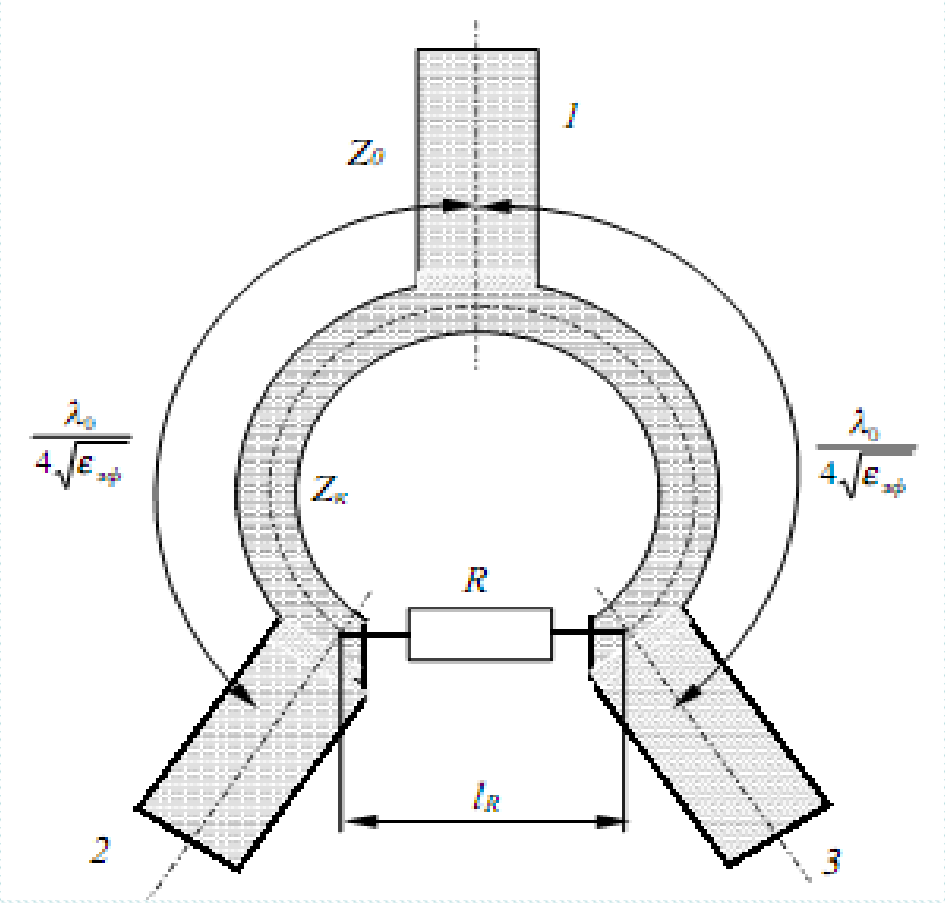
## Коаксиальные тройники

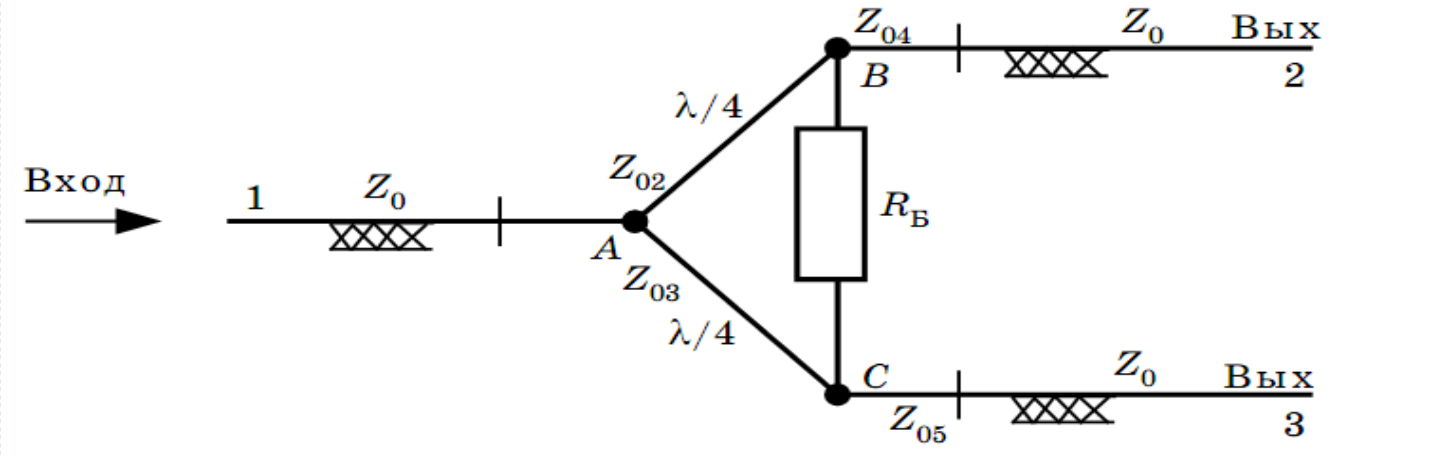






# Кольцевой согласованный делитель мощности с балластным резистором (мост Уилкинсона)



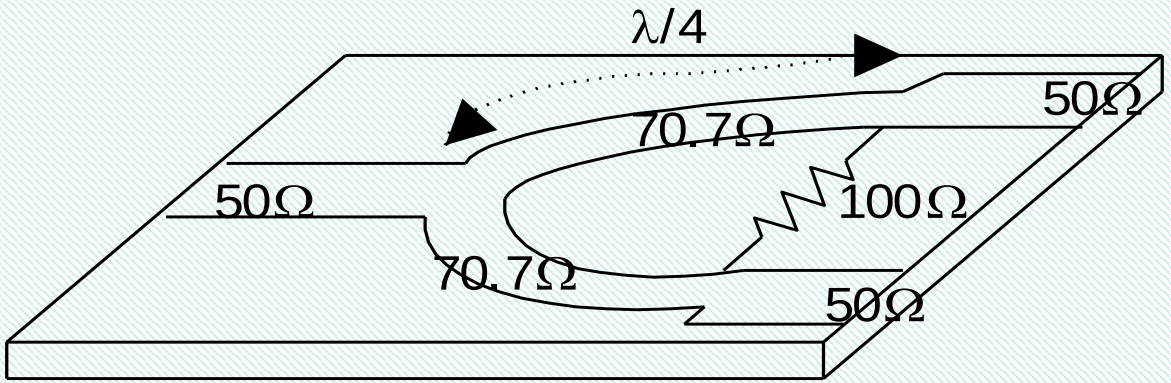



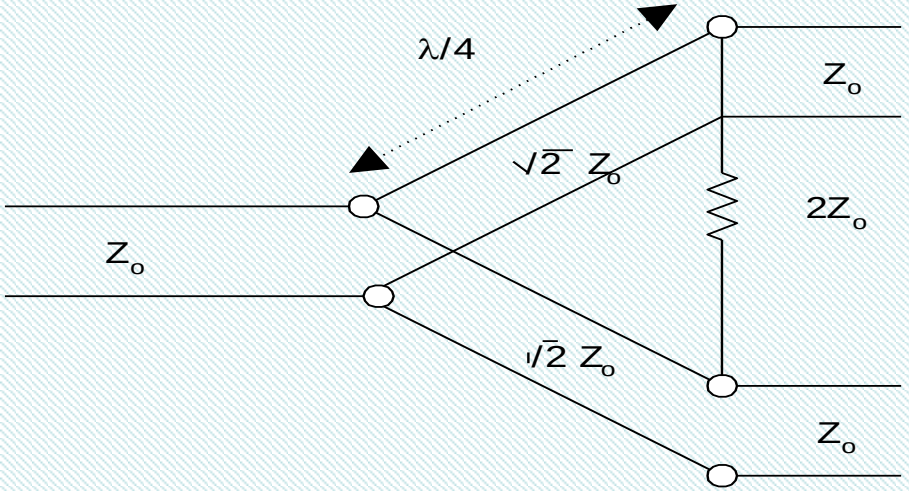

$$d_{ср} = \frac{1}{\pi}\left(\frac{\lambda_0}{2} + l_R\right)$$

$$Z_{02} = Z_{03} = Z_0\sqrt{2}$$

$$R_Б = 2Z_0$$

# *Пример: микрополосковый вариант моста Уилкинсона*




Входное сопротивление ⇒ $Z_{in}^{e} = \frac{Z_T^2}{2}$

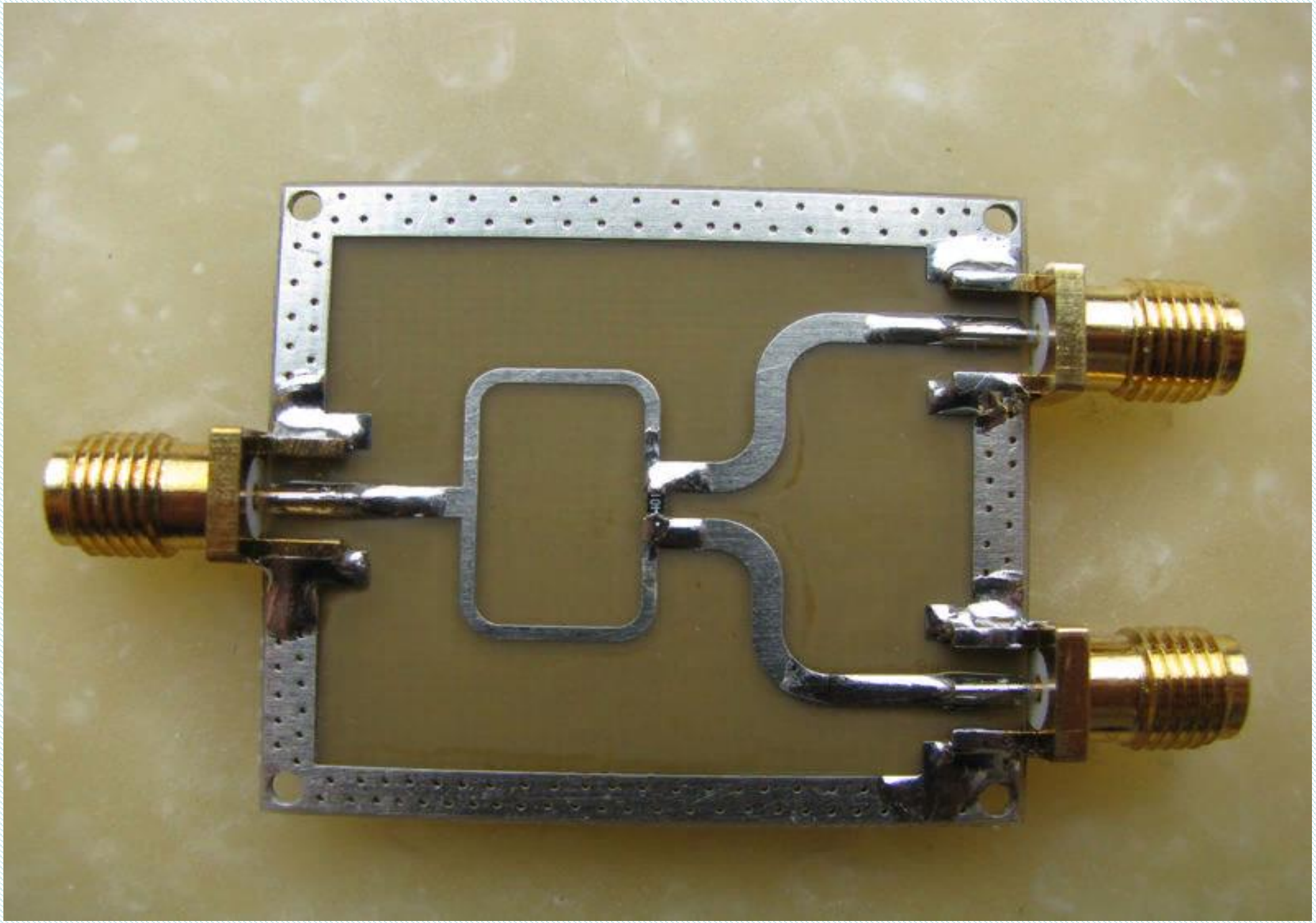
Для $Z_{in} = Z_o = 50\ \Omega$

$Z_T = \sqrt{2}\, Z_o$ ⇒ $Z_T = \sqrt{2}\, 50 = 70.7\Omega$

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

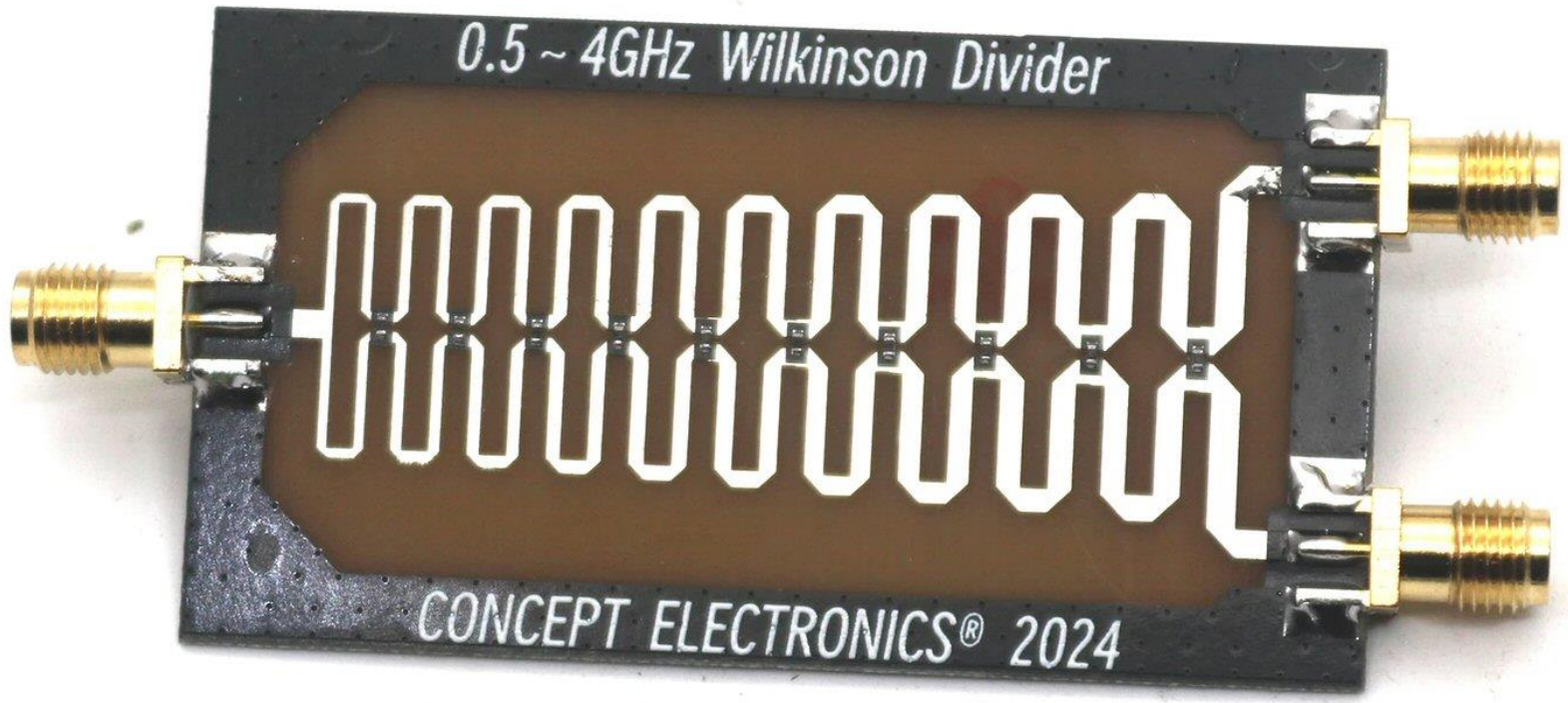
Сопротивление балласта $R = 2\, Z_o = 100\Omega$

⇒ Отказ от условия унитарности позволяет согласовать входы 2 и 3



# RF Power divider

## 500Mhz-4Ghz

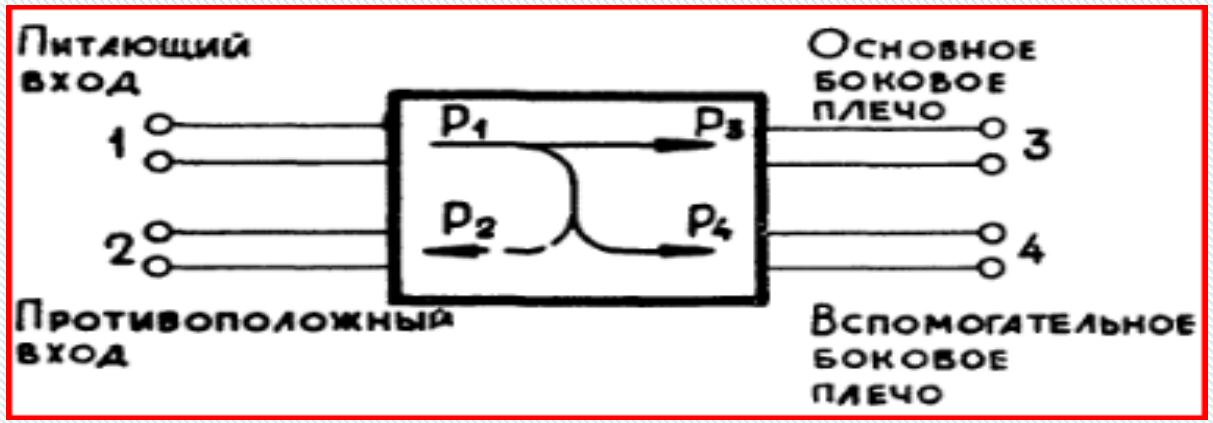



Широкополосный делитель Уилкинсона (полоса частот – октава)

# ВОСЬМИПОЛЮСНЫЕ УСТРОЙСТВА СВЧ

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix}$$

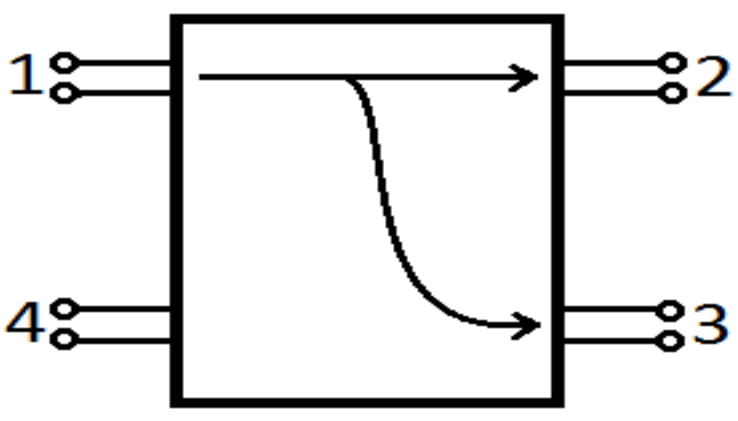
Четырехпортовый узел имеет в матрицу рассеяния из 16 комплексных переменных (32 измеряемых параметра).

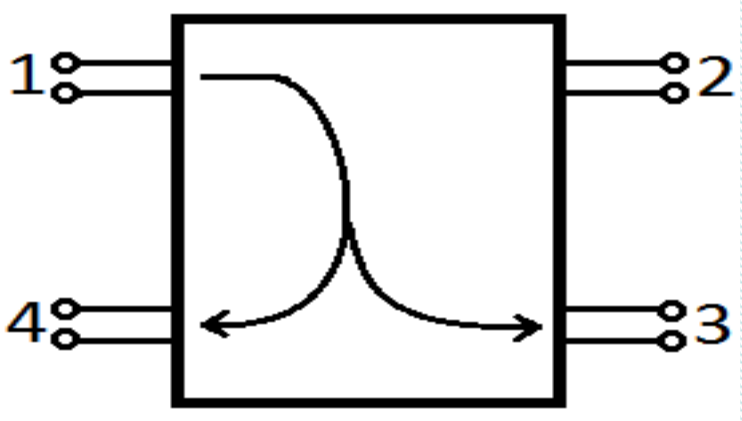


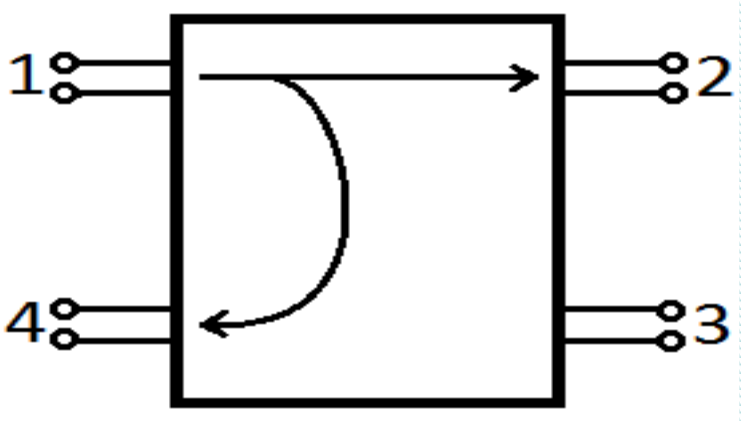

Четырехпортовые узлы, обладающие свойством развязки одного из плеч, называются направленными ответвителями (НО). Идеальный направленный ответвитель обладает свойствами взаимности, реактивности и согласования всех портов.

# Три варианта записи матрицы для согласованного восьмиполюсника без потерь (НО)

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0 & S_{21} & S_{31} & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{42} \\ S_{31} & 0 & 0 & S_{43} \\ 0 & S_{42} & S_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad S_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{31} & S_{41} \\ 0 & 0 & S_{32} & S_{42} \\ S_{31} & S_{32} & 0 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad S_3 = \begin{bmatrix} 0 & S_{21} & 0 & S_{41} \\ S_{21} & 0 & S_{32} & 0 \\ 0 & S_{32} & 0 & S_{43} \\ S_{41} & 0 & S_{43} & 0 \end{bmatrix}$$



# *Основные характеристики направленного ответвителя*

- *Переходное ослабление* C13 = 10 lg (P1/P3) [дБ] = -20 lg |S31| [дБ]
- *Рабочее затухание* C12=10 lg (P1/P2) = -20 lg |S21| [дБ]
- *Коэффициент деления по мощности* $m = |S31|^2/|S21|^2$
- *Разность фаз напряжений в выходных плечах* $\Delta\varphi$

  Если $\Delta\varphi=90^0$, то НО называют квадратурным

  Если $\Delta\varphi=0^0$, то НО называют синфазным

- Если $\Delta\varphi=180^0$, то НО называют противофазным
- *Развязка* C14 = 10 lg (P1/P4) = -20 lg |S41| [дБ]
- *Направленность* D = 10 lg (P3/P4) [дБ] = 20 lg |S31/S41| [дБ]
- *КСВ в i-плече* = (1+|Sii|) / (1-|Sii|)

## *Виды направленных ответвителей*

*Гибридным соединением* называют НО, осуществляющий равное деление мощности

*Мостом* называют *гибридное соединение*, напряжения в плечах которого имеют постоянный фазовый сдвиг в полосе частот.

| ***Синфазно-противофазные НО***: | ***Квадратурные НО:*** |
|---|---|
| •Двойной волноводный тройник | •Волноводно-щелевой мост |
| •Гибридное кольцо | •Шлейфный мост |
| | •НО на связанных линиях |
| | •НО Ланге |

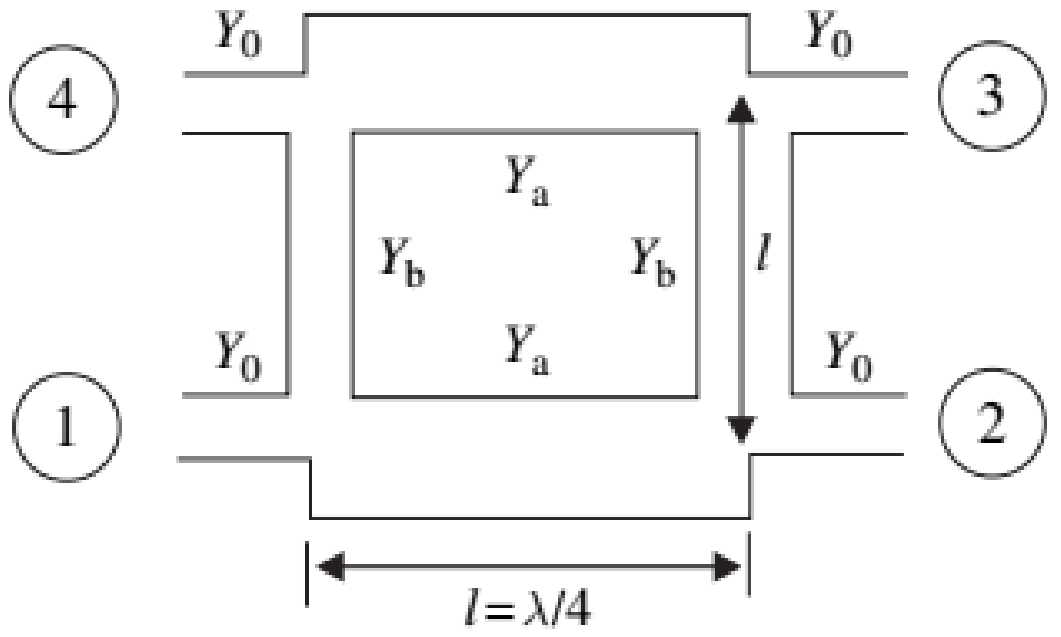
# *Шлейфный Мост*

(Quadrature Hybrid Coupler)

Может быть исполнен как в коаксиальном, так и в полосковом виде.

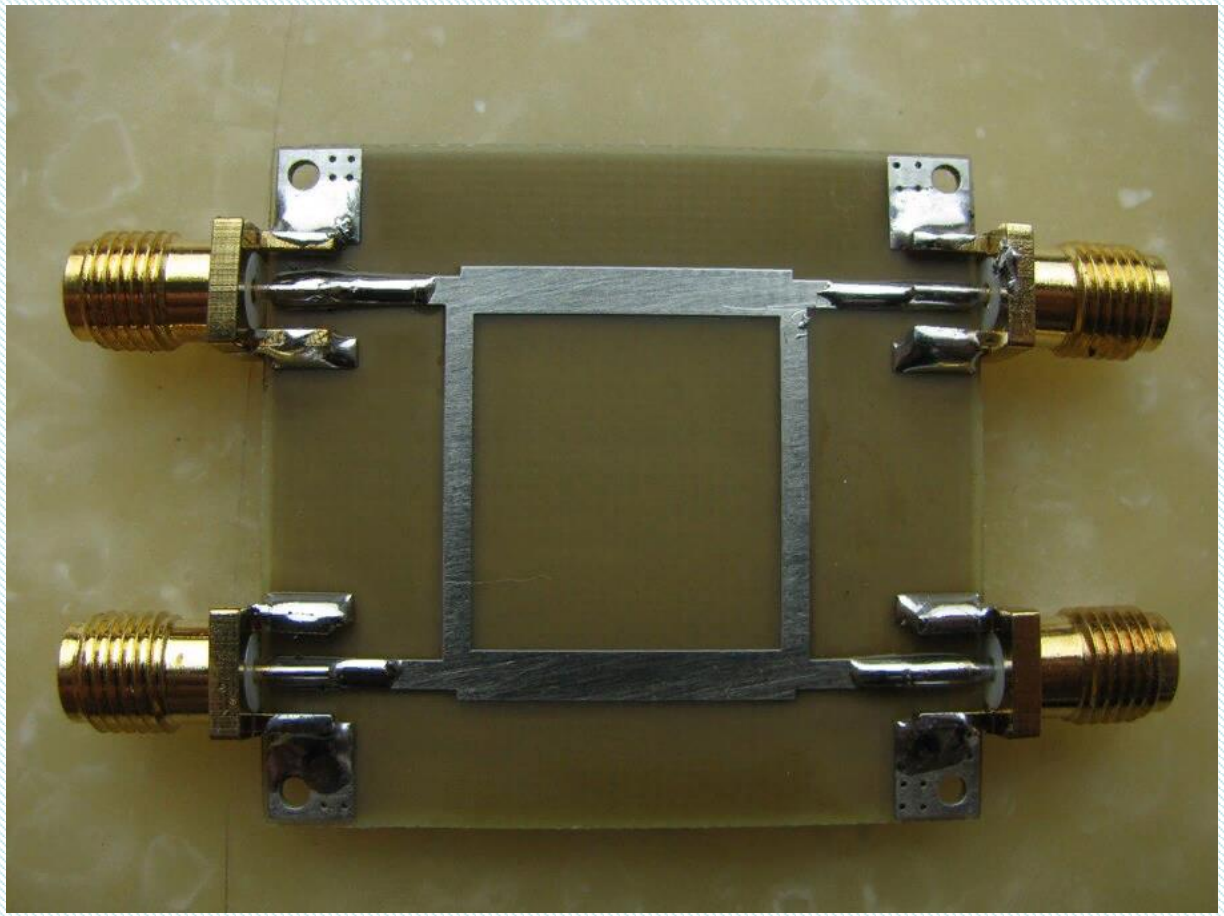
Имеет матрицу рассеяния квадратурного НО

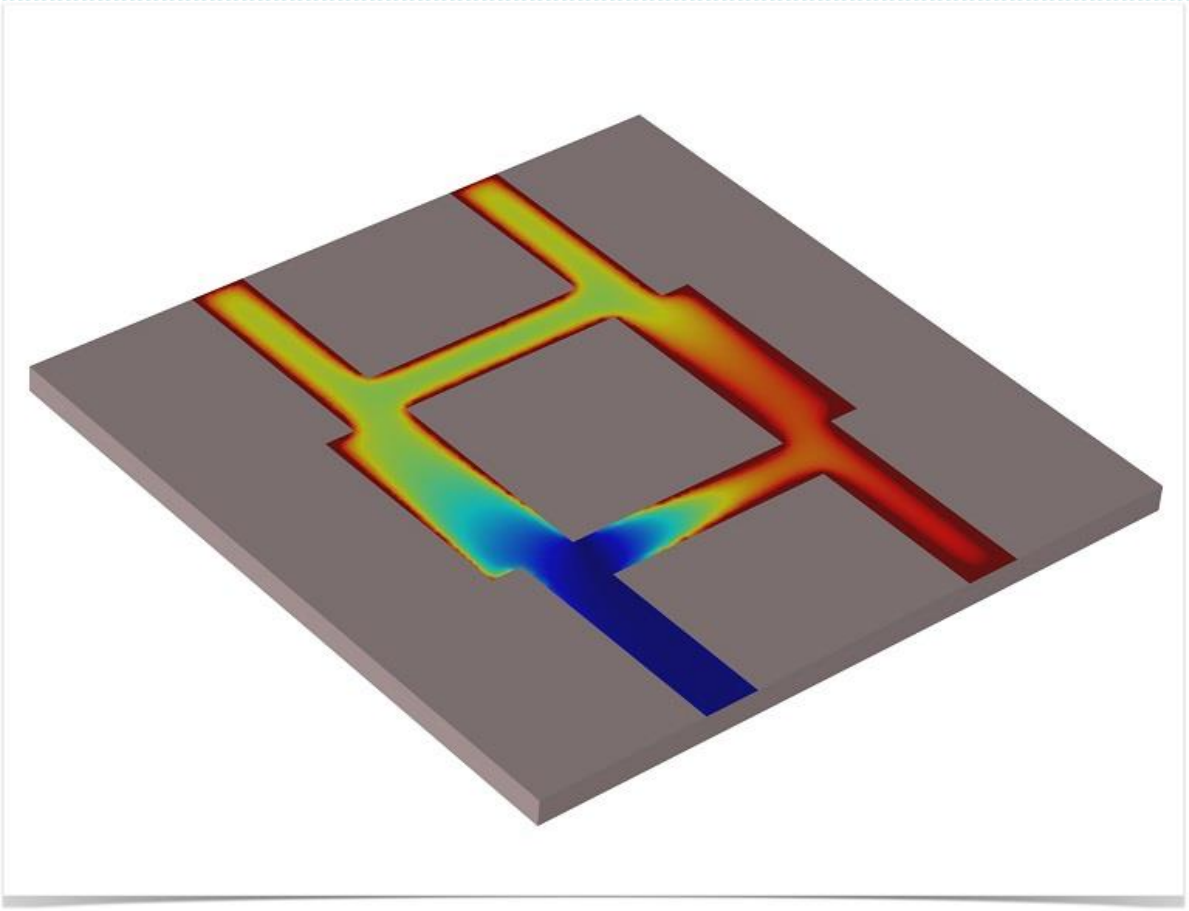
$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & -i\cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ -i\cos\psi & 0 & 0 & -\sin\psi \\ -\sin\psi & 0 & 0 & -i\cos\psi \\ 0 & -\sin\psi & -i\cos\psi & 0 \end{bmatrix}$$




| | $S_{21}$ | $S_{31}$ | $Y_a/Y_0$ | $Y_b/Y_0$ |
|---|---|---|---|---|
| 3 dB 90° coupler | $-\frac{j}{\sqrt{2}}$ | $-\frac{1}{\sqrt{2}}$ | $\sqrt{2}$ | 1 |
| 6 dB 90° coupler | $-j\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $-\frac{1}{2}$ | $\frac{2}{\sqrt{3}}$ | $\frac{1}{\sqrt{3}}$ |
| 10 dB 90° coupler | $-j\frac{3}{\sqrt{10}}$ | $-\frac{1}{\sqrt{10}}$ | $\frac{\sqrt{10}}{3}$ | $\frac{1}{3}$ |

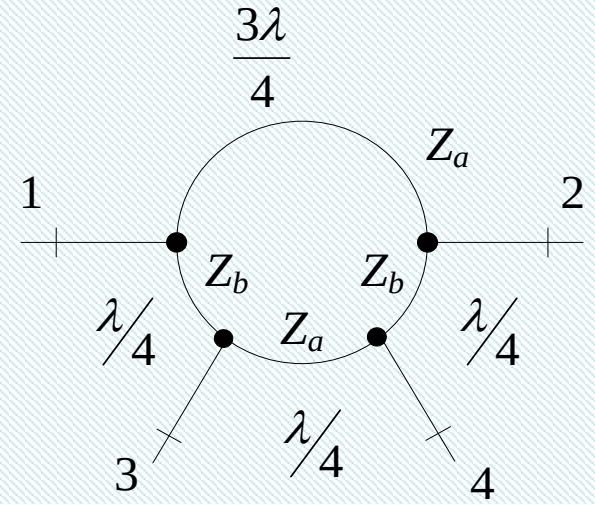
# *Внешний вид и распределение поля*

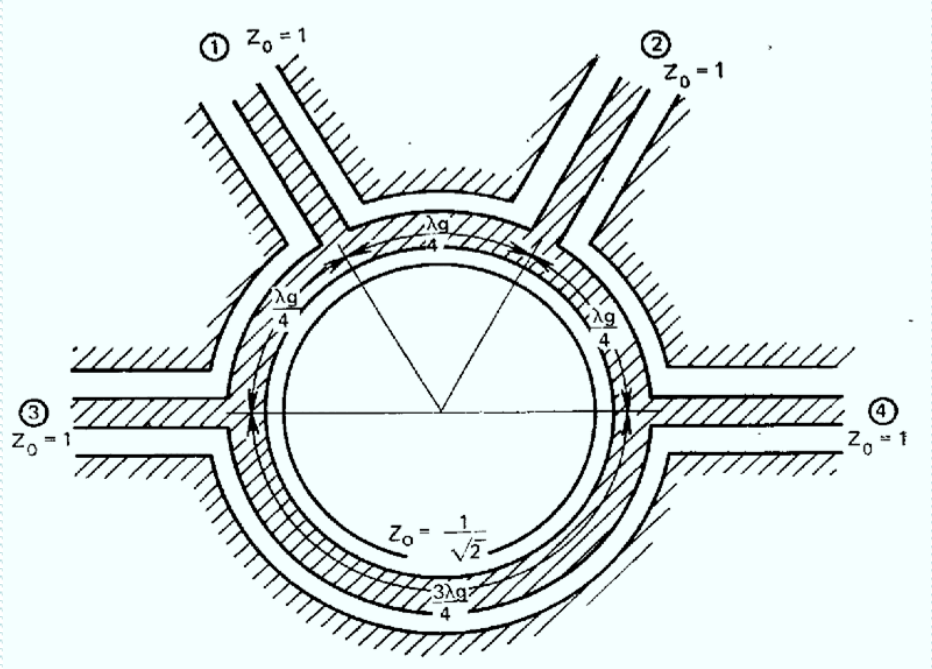


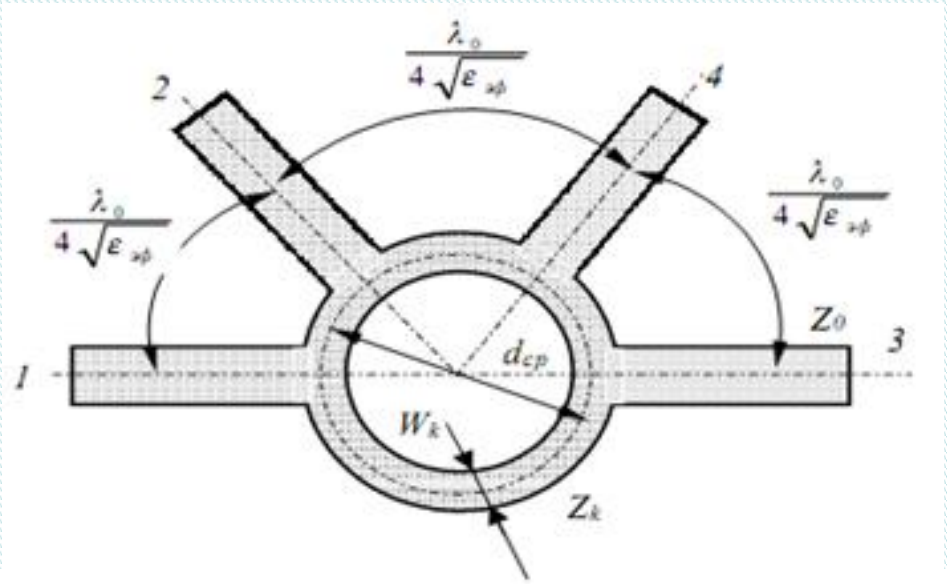


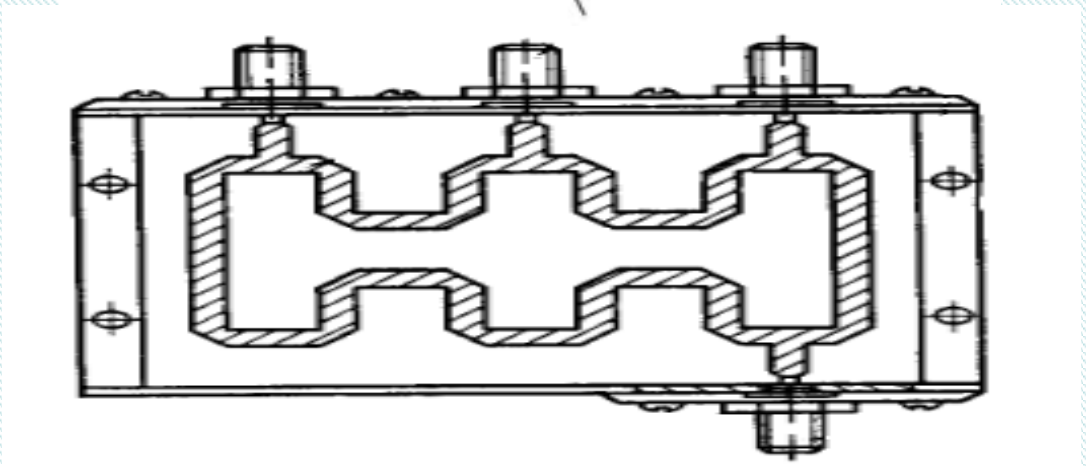
# Гибридное кольцо (Rat-Race Coupler) синфазно-противо-фазный НО

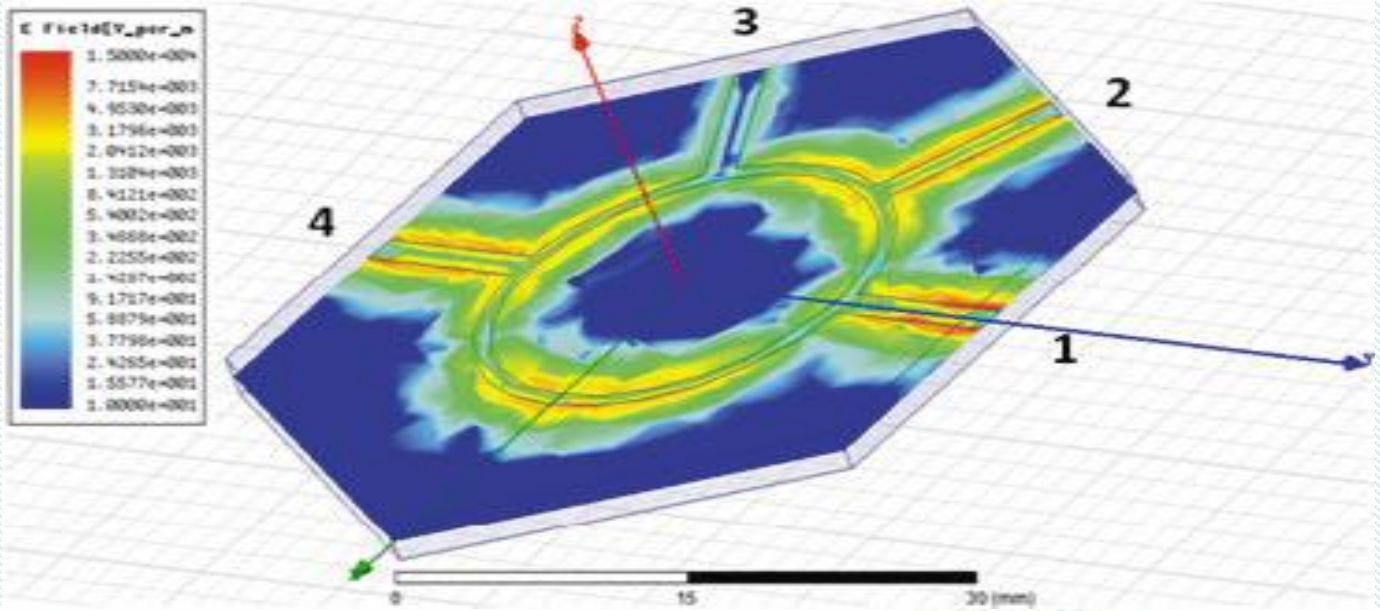
$$[S] = -\frac{j}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



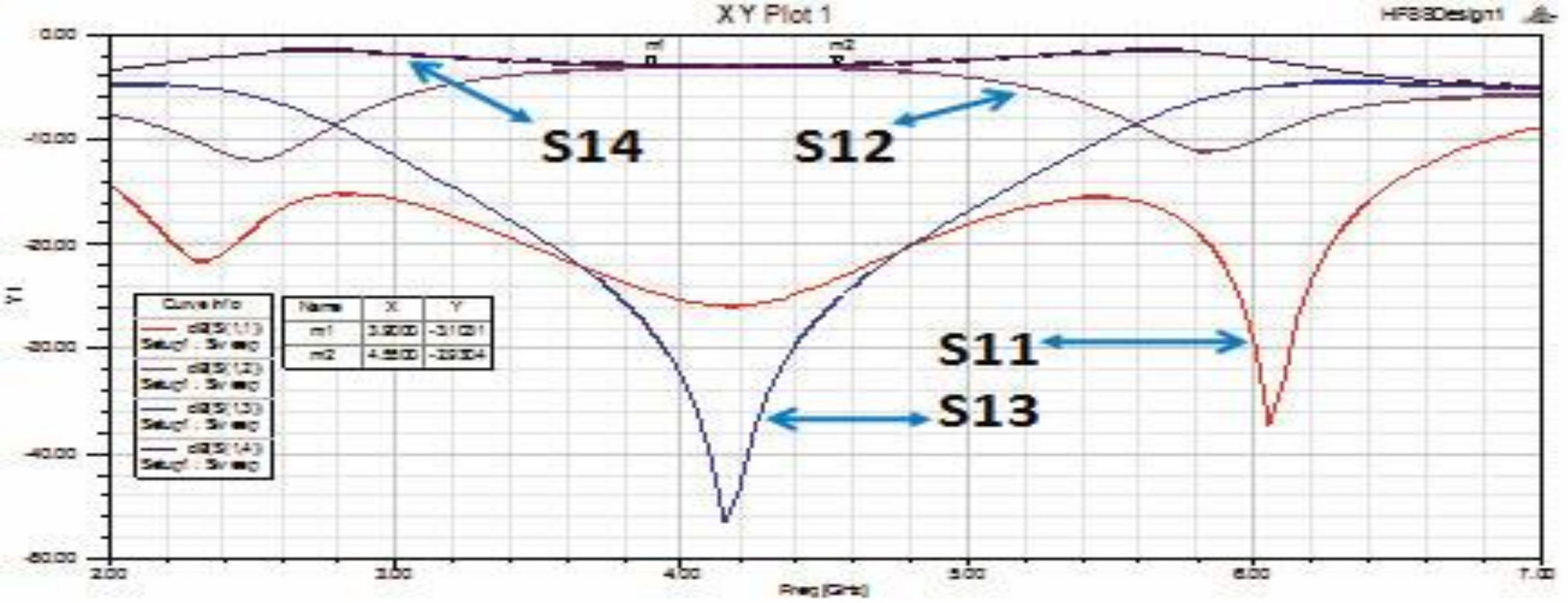



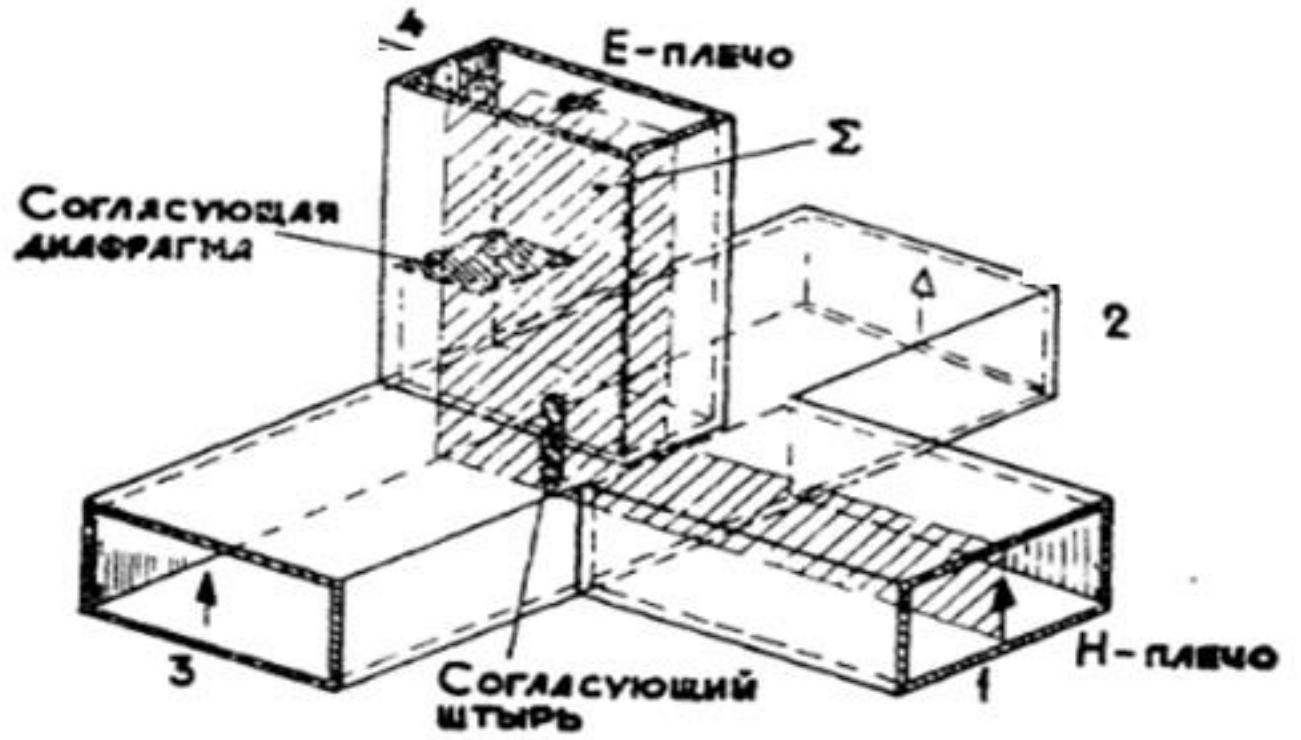



Гибридное кольцо и его S-параметры.

Расчет распределения поля в системе САПР ANSYS HFSS



# *Двойной волноводный тройник (двойной Т-мост, magic Tee).*

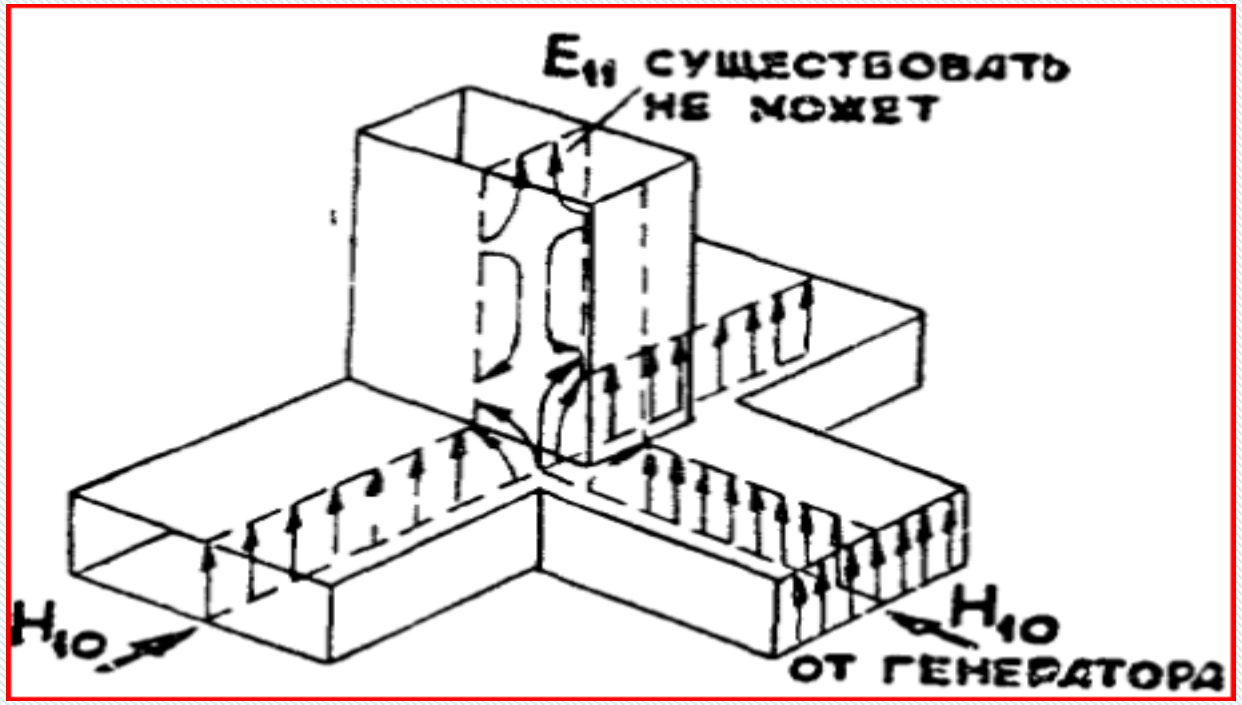



Представляет собой соединение Е-тройника и Н-тройника, совмещенных в одной плоскости.

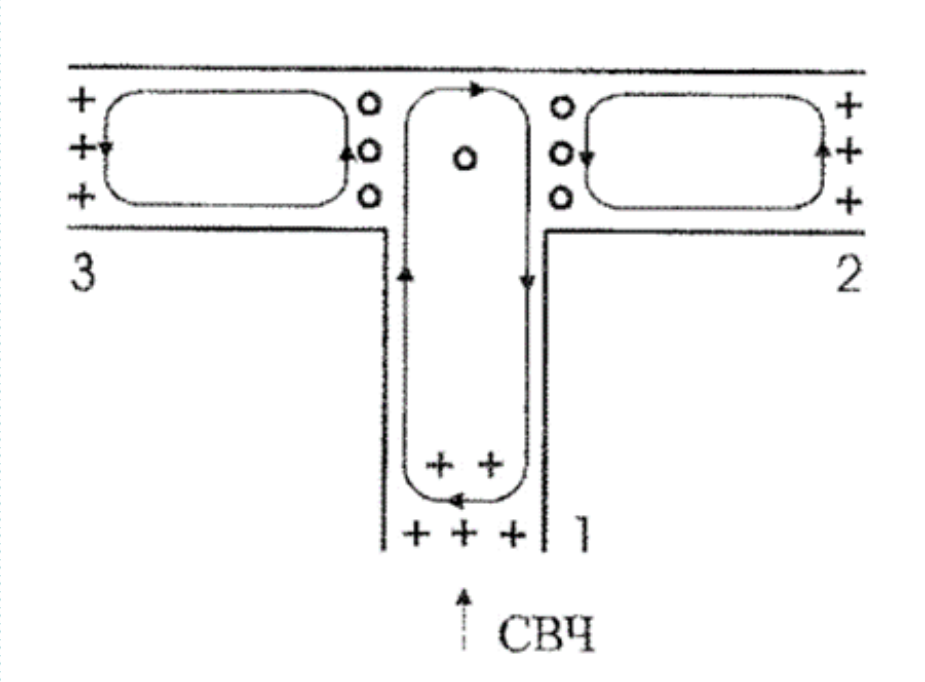
При условии взаимности устройства имеем:

$$S_{21} = S_{12};\quad S_{31} = S_{13};\quad S_{41} = S_{14};$$

$$S_{32} = S_{23};\quad S_{42} = S_{24};\quad S_{43} = S_{34}.$$



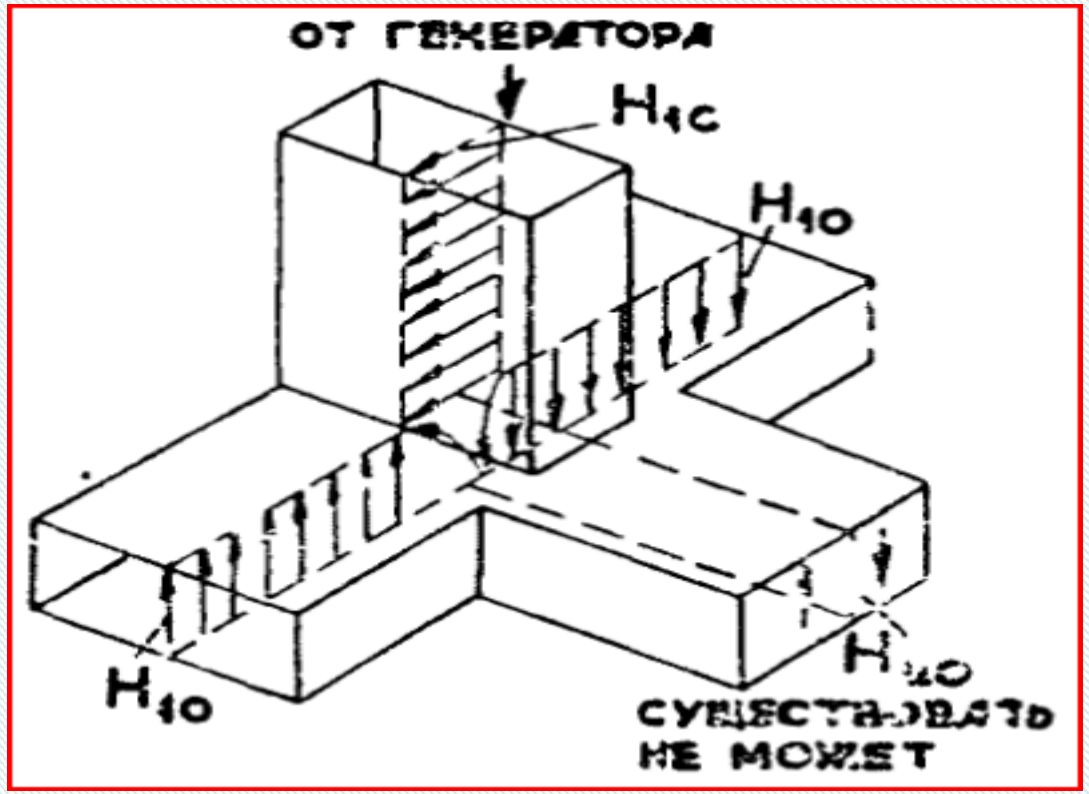

Генератор подключен к плечу 1 (Н плечо).
Плечо 1 согласовываем штырем => S11=0.
Из условия существования только $H_{10}$ волны в плече Е следует => S41=0.
Условие унитарности:




$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 + |S_{41}|^2 = 1$$

Из условия унитарности, симметрии и синфазности возбуждения плеч 2 и 3

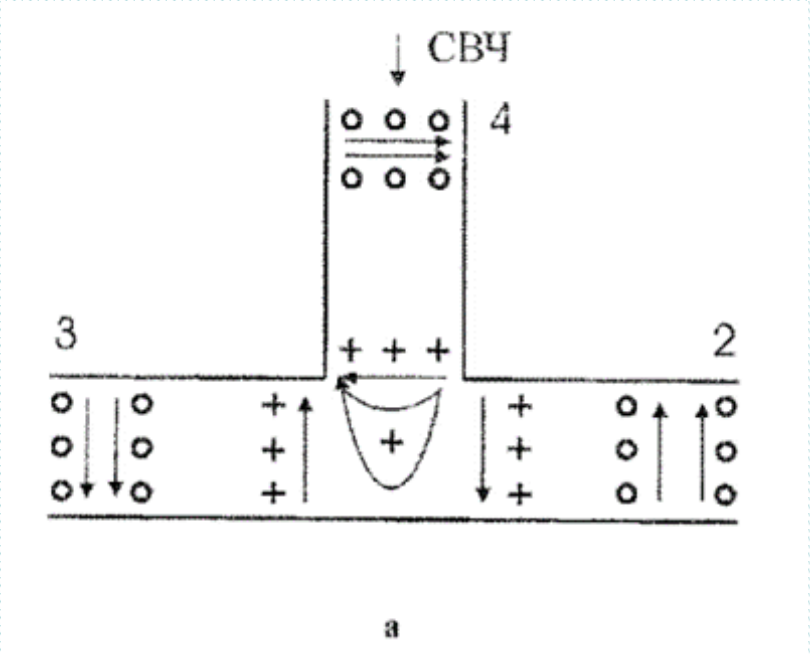
$$S_{21} = S_{31} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$




Генератор подключен к плечу 4 (Е плечо).

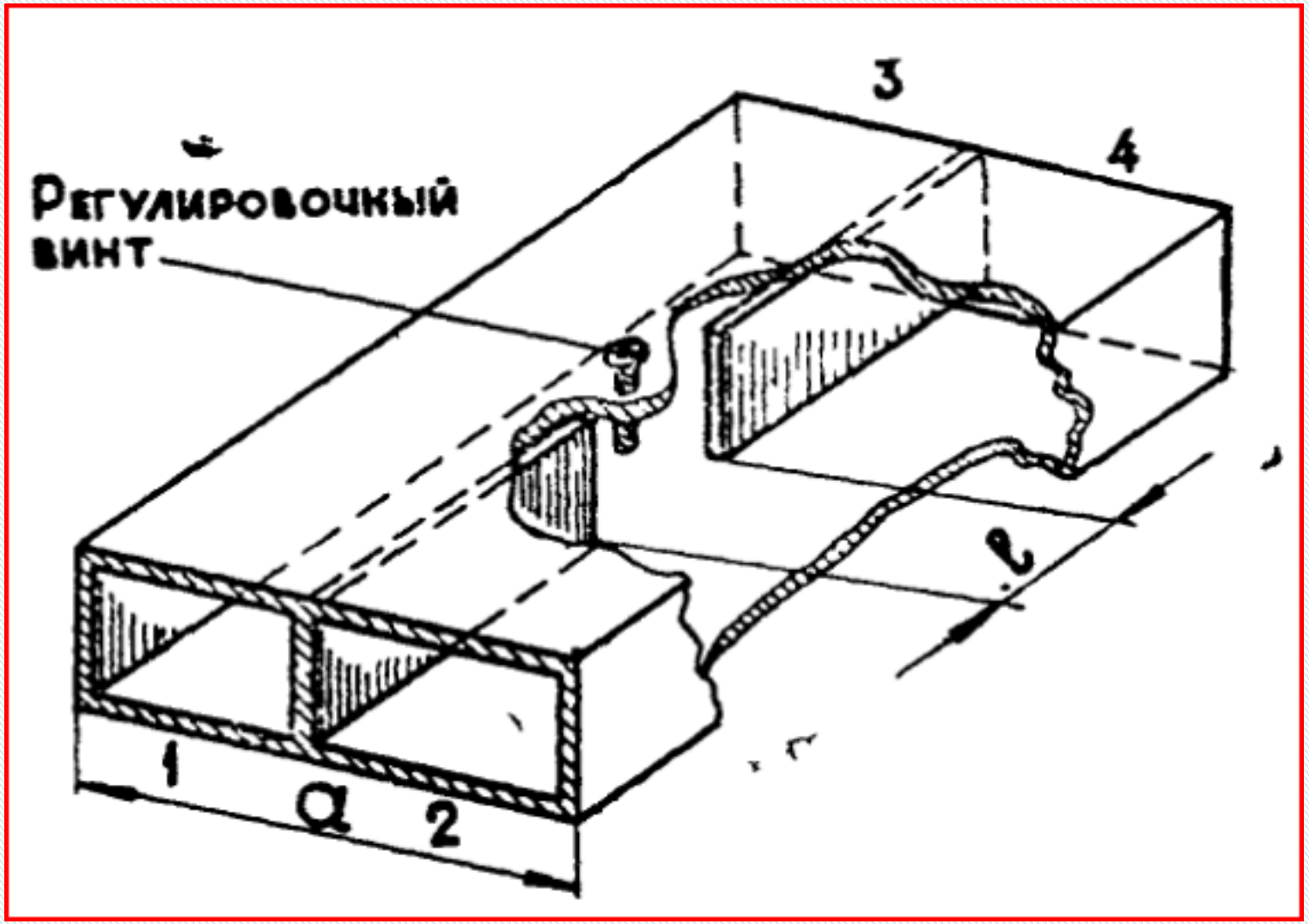
Его согласуем диафрагмой +> S44=0.

*Мощность* делится между 2 и 3 плечами поровну и противофазно




$$|S| = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$S_{24} = -S_{34} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

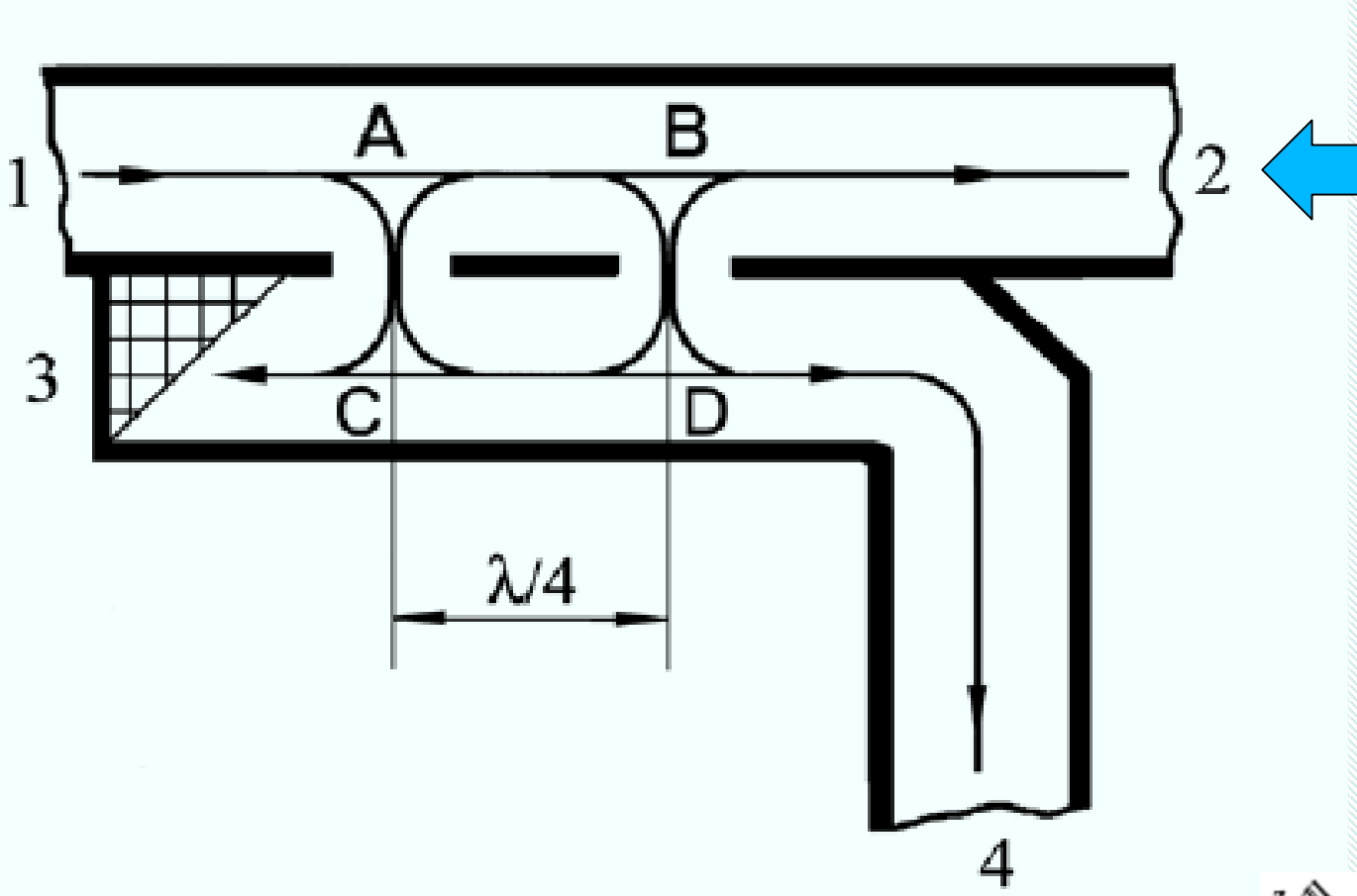



*Волноводно-щелевой мост.*

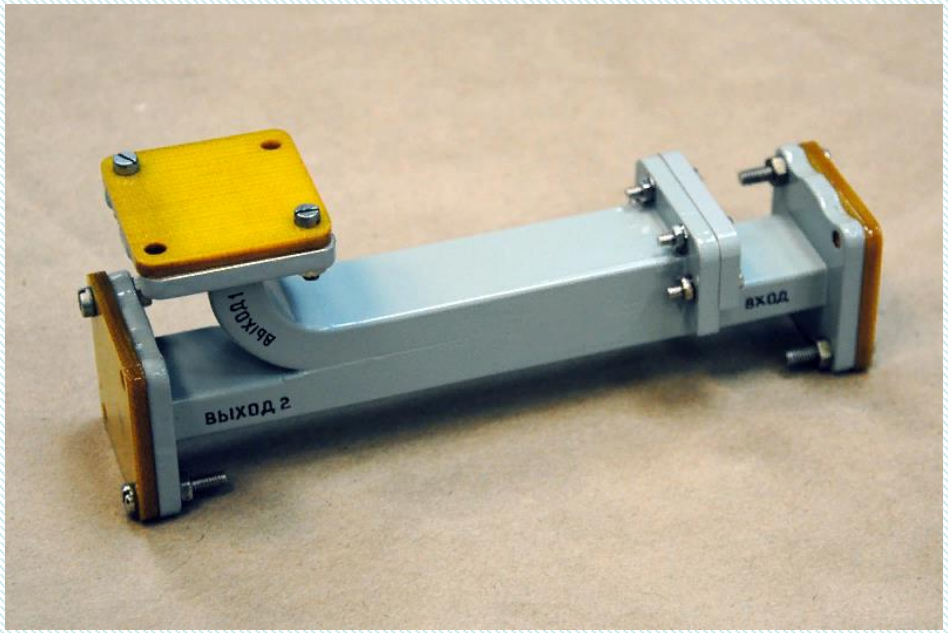
Состоит из двух прямоугольных волноводов, связанных щелью в общей узкой стенке.

Этот квадратурный НО используют для широкополосного деления сигнала на высоких уровнях мощности

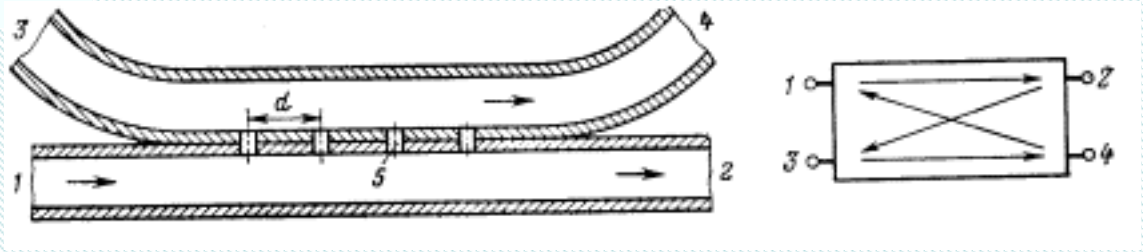
# *Волноводный НО*




Отверстия расположены через четверть волны друг от друга в общей широкой стенке.




Многодырочный волноводный направленный ответвитель



# *Направленные ответвители на связанных линиях.*

Так называют НО, состоящие из двух линий передачи (полоски, волноводы, коаксиалы), имеющих электромагнитную связь на некотором участке.

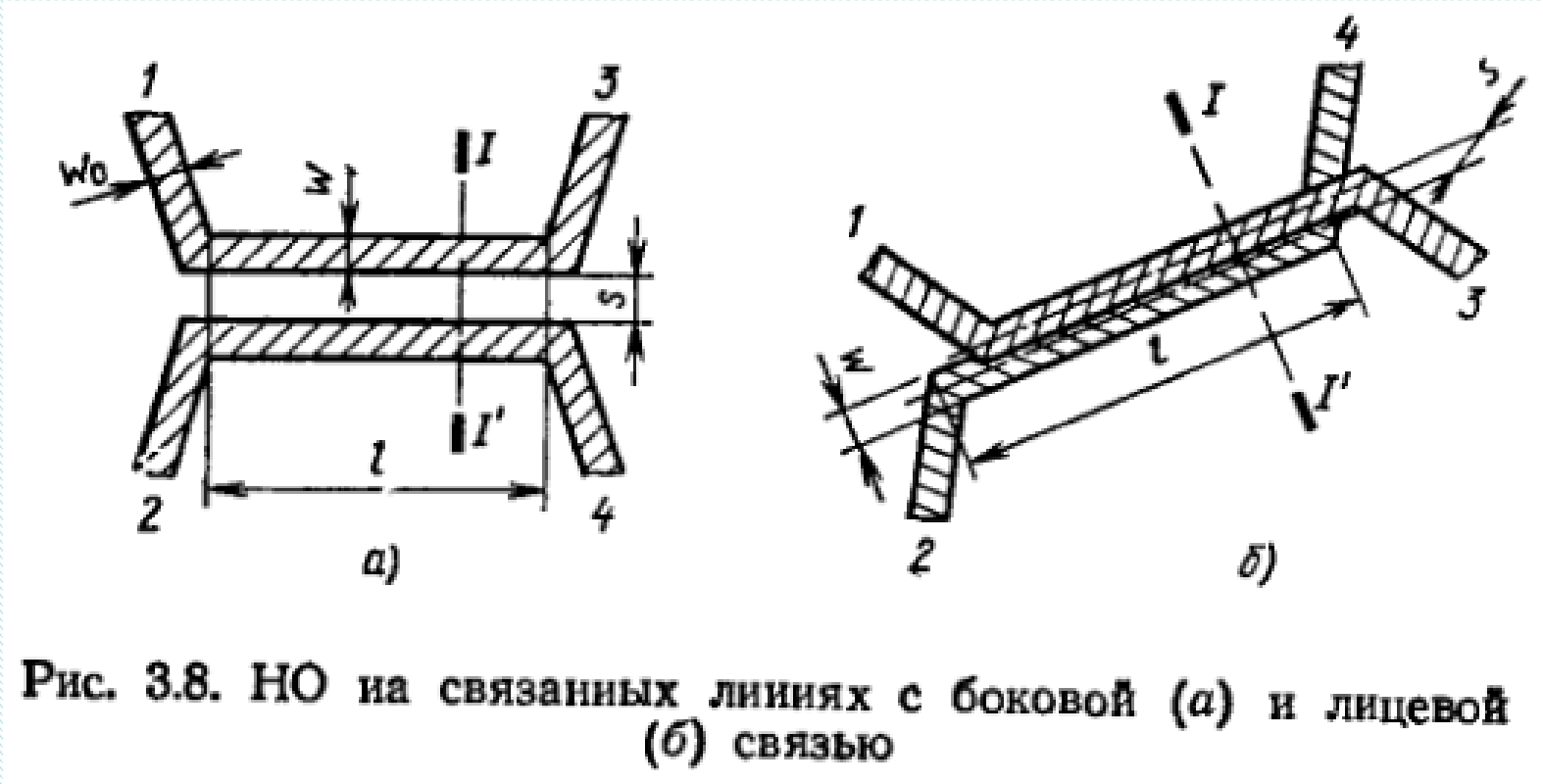
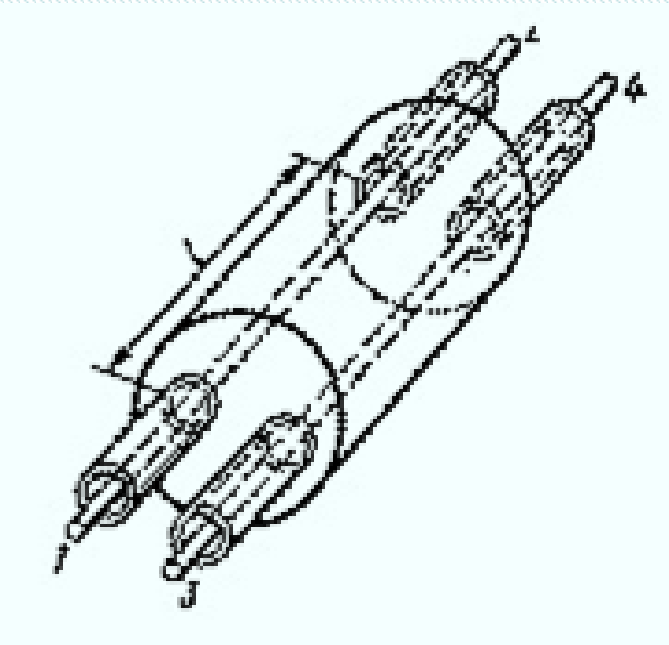
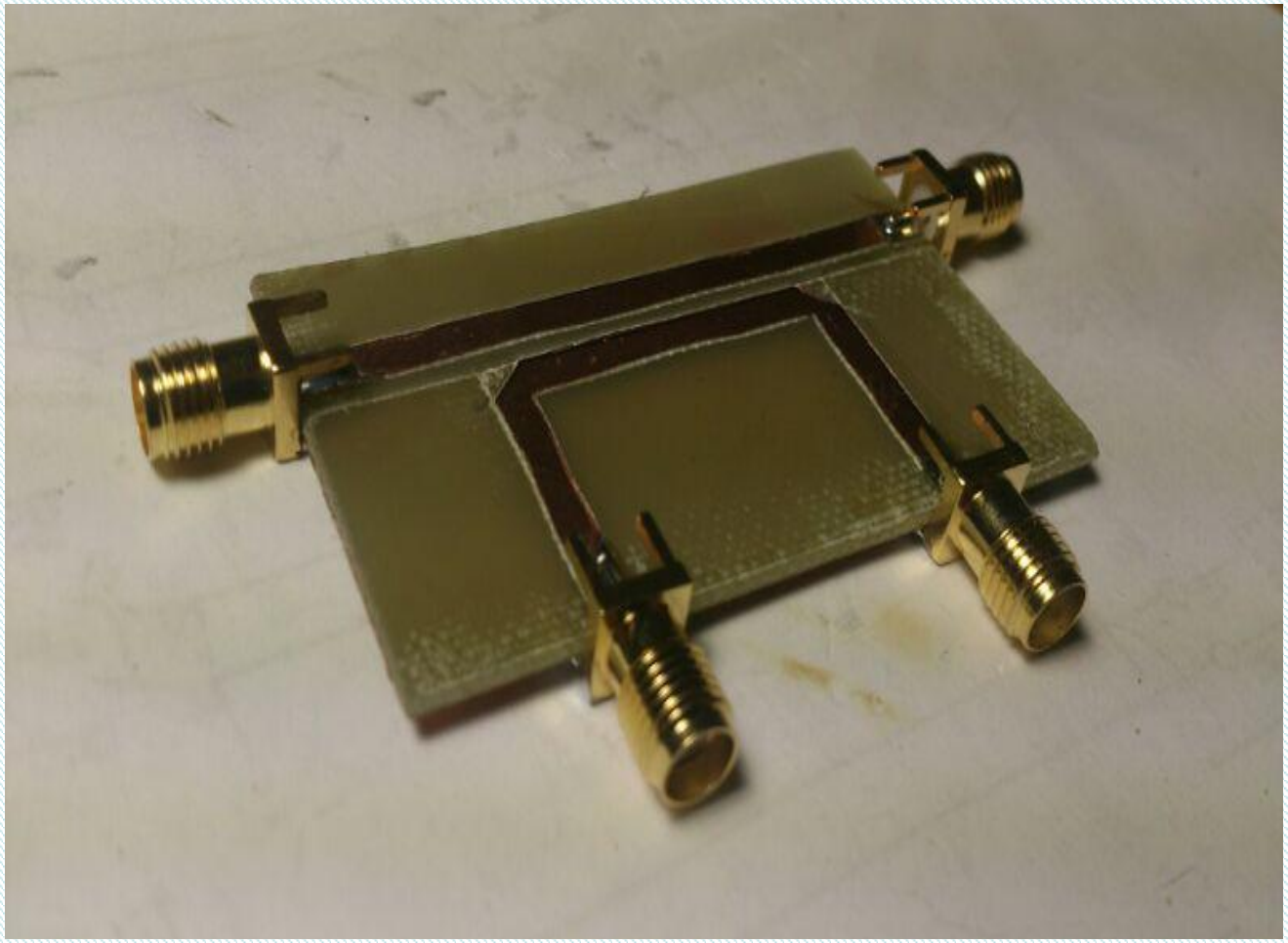


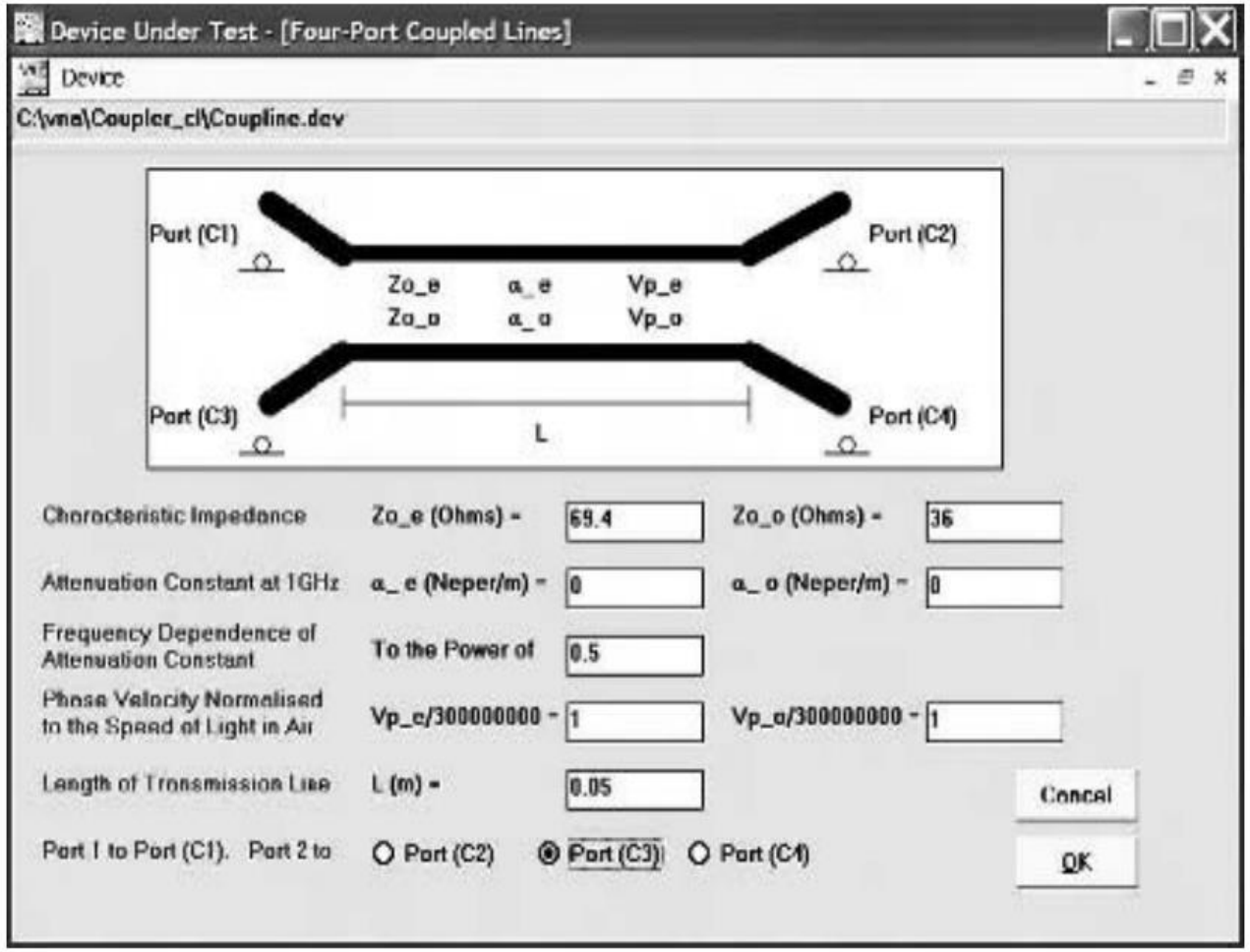

Рис. 3.8. НО на связанных линиях с боковой (*а*) и лицевой (*б*) связью

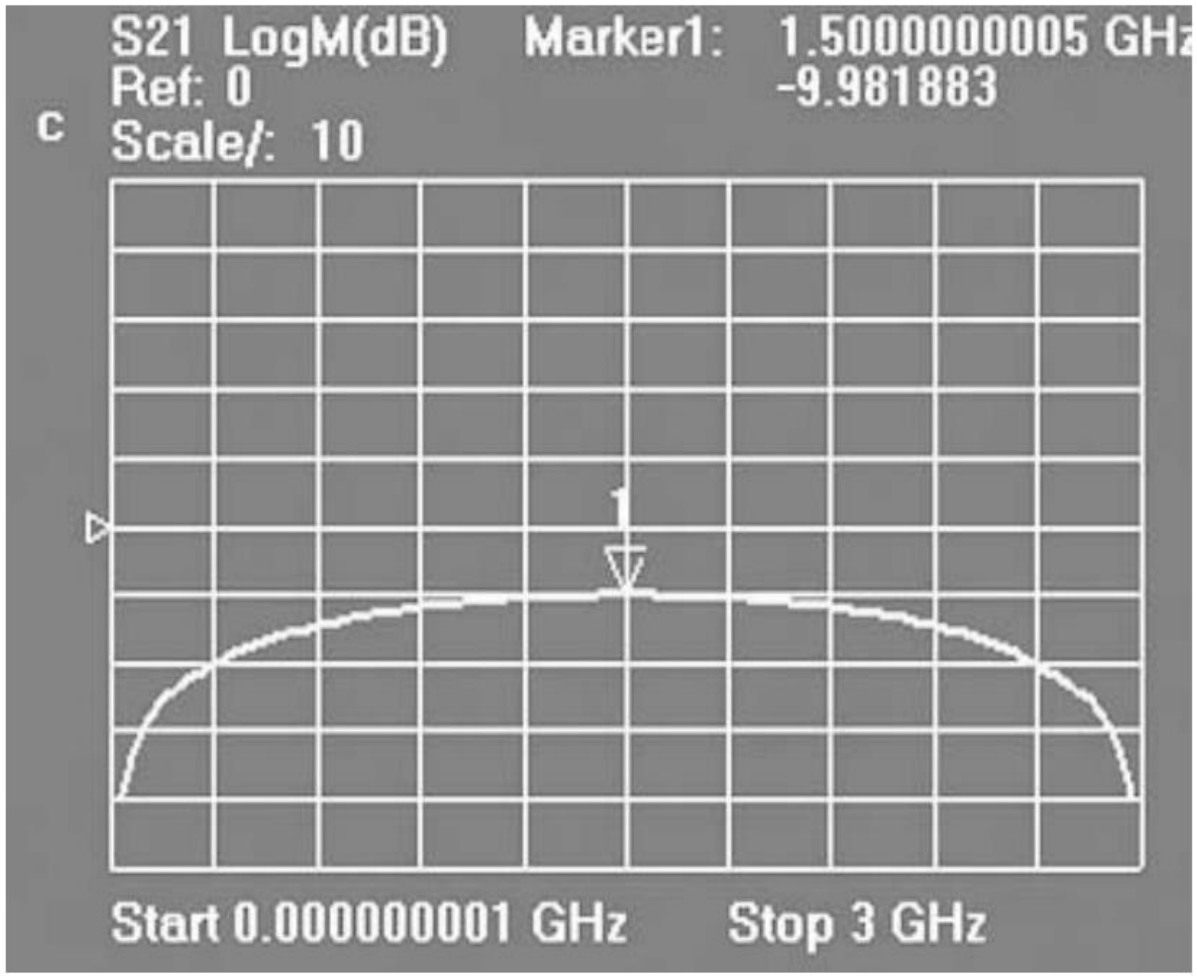


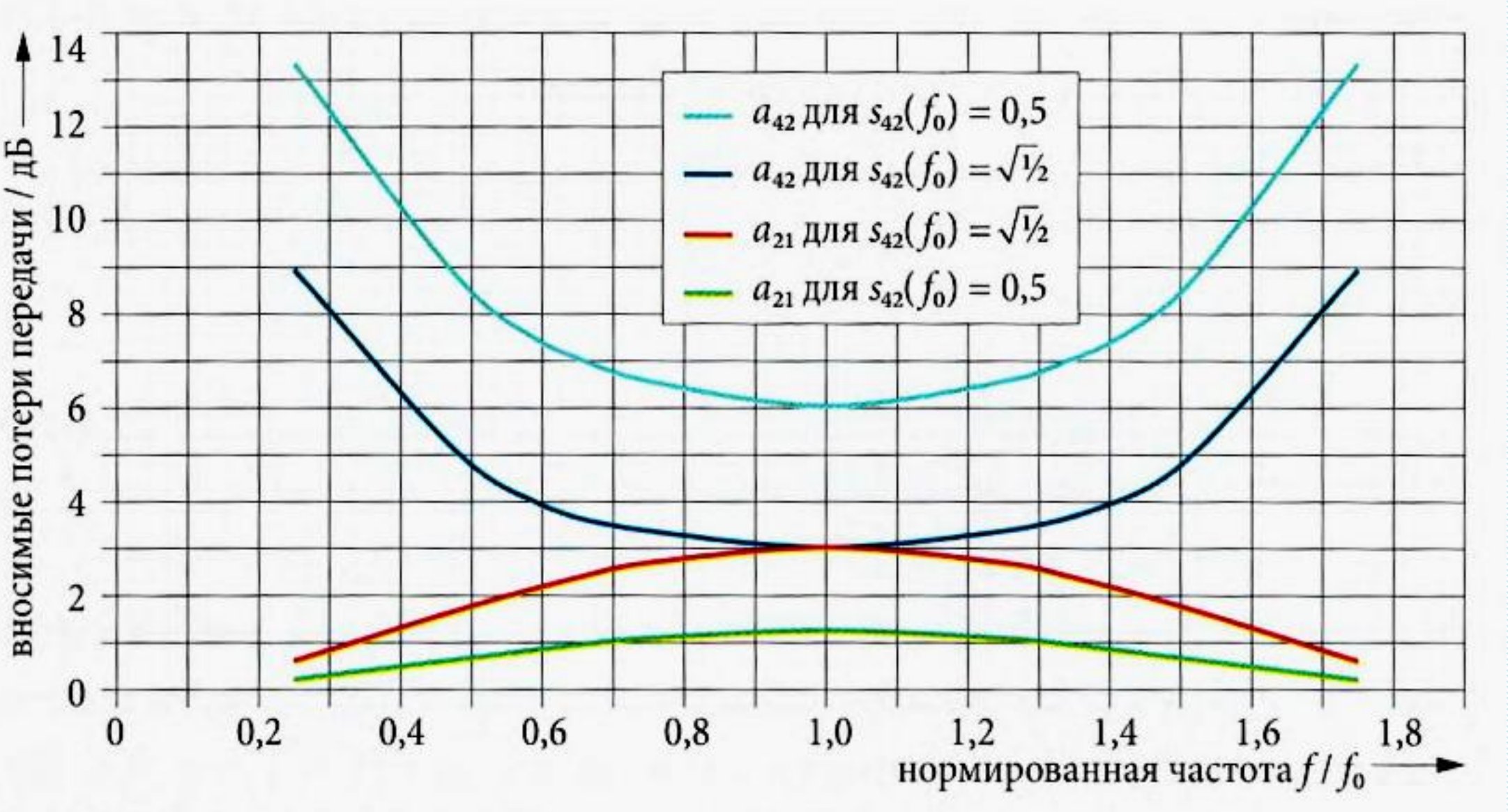




# Геометрия, моделирование и расчет коэффициента передачи 10 дБ направленного ответителя на связанных линиях на частоту 1.5 ГГц, имеющего неравномерность АЧХ  0.2 дБ в полосе 30%



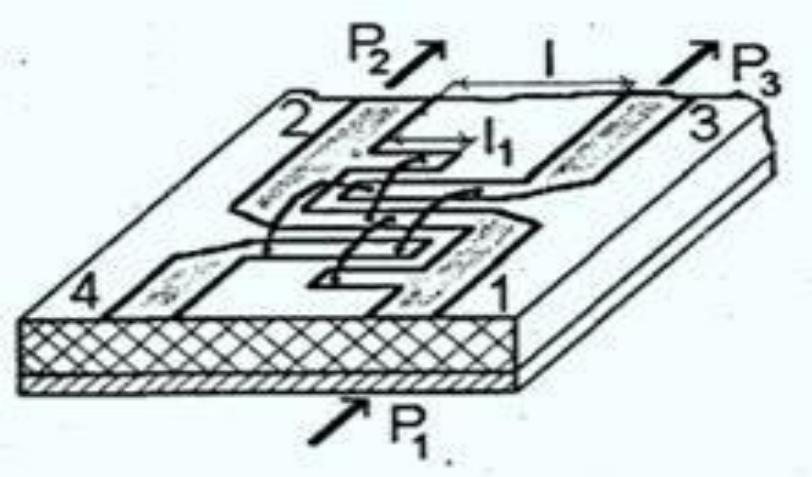


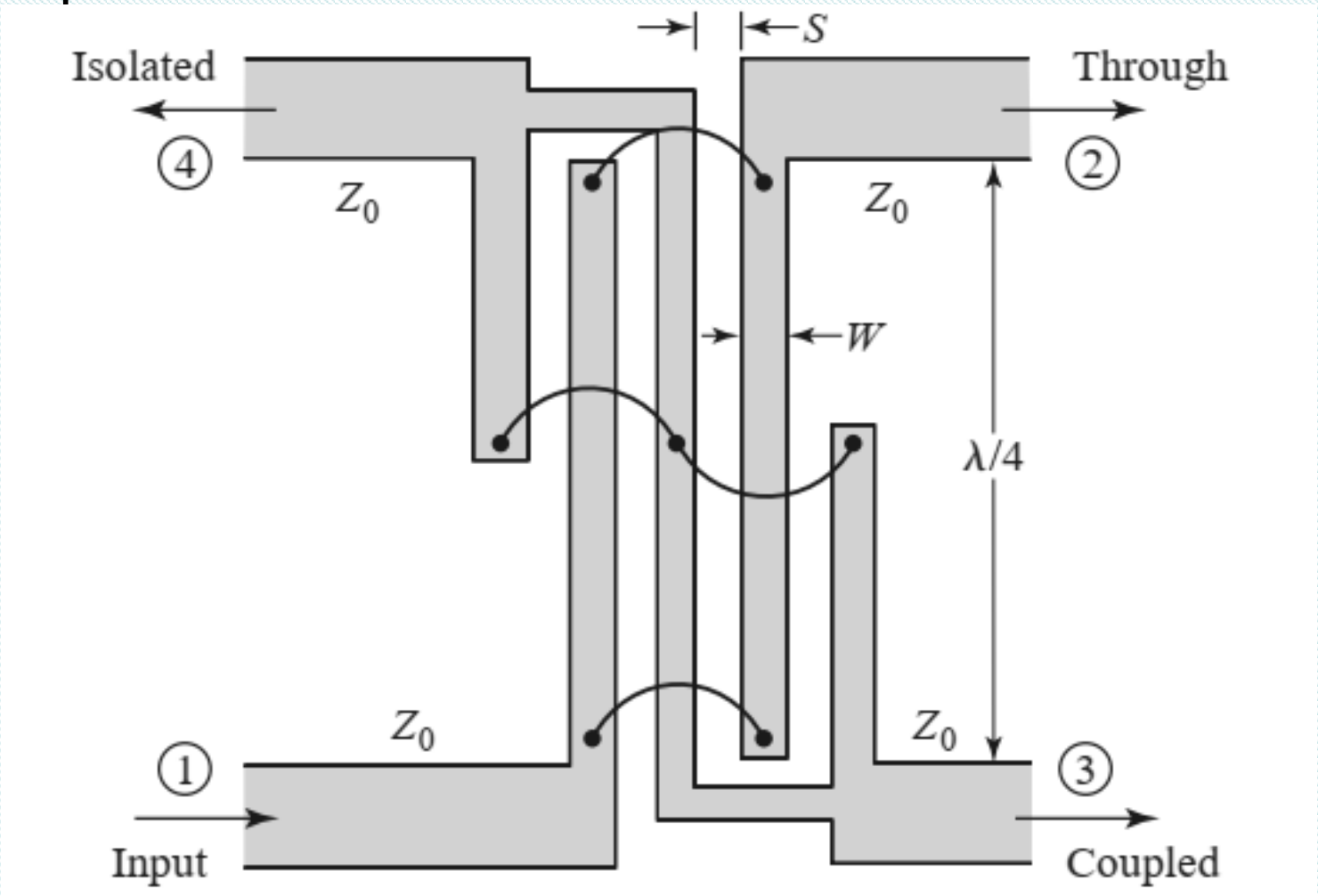

Частотные зависимости трехдецибельного НО (синий график) и шестидецибельного НО (голубой график). Рекомендуемый частотный диапазон (2/3…4/3 ) f0 – в пределах октавы

# *Направленный ответвитель Ланге.*

Сложно реализовать НО на связанных линиях с коэффициентом передачи -3 дБ и более из-за узких зазоров между проводниками. Выход – установка дополнительных перемычек



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)*

# Ферритовые устройства измерительных трактов СВЧ

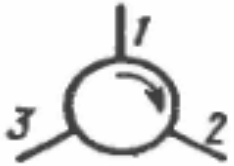
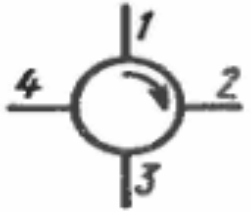
Санкт-Петербург
2025 г.

# Ферритовые элементы измерительного тракта СВЧ

Устройства СВЧ с ферритами могут быть разделены на две группы.

1) *невзаимные устройства*—вентили, гираторы и циркуляторы

Таблица 1

| Вентиль | Гиратор | 6-полюсный циркулятор | 8-полюсный циркулятор |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ e^{-j\varphi} & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & e^{-j\varphi} \\ e^{-j(\varphi \pm \pi)} & 0 \end{bmatrix}$ | $e^{-j\varphi}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ | $e^{-j\varphi}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ |

2) *Управляющие устройства* — фазовращатели, выключатели, коммутаторы, перестраиваемые фильтры. Изменение характеристик производится регулированием внешнего магнитного поля

**Феррит –** магнитодиэлектрик ($\varepsilon = 5\ldots20$, $tg\delta = 10^{-2} \ldots 10^{-3}$)

- Поликристаллический - смеси кристаллов Fe+ двухвалентный металл – никель, марганец ($NiOFe_2O_3$, $MgOFe_2O_3$);
- Монокристалл – ЖИГ (железо-иттриевый гранат) $Y_3Fe_2(FeO_4)_3$

Магнитная проницаемость – связывает напряженность магнитного поля H и силовую характеристику поля - индукцию B

$$B = \mu_0(H + M) = \mu H \qquad M = \chi H$$

M- вектор намагниченности, $\chi$ - магнитная восприимчивость

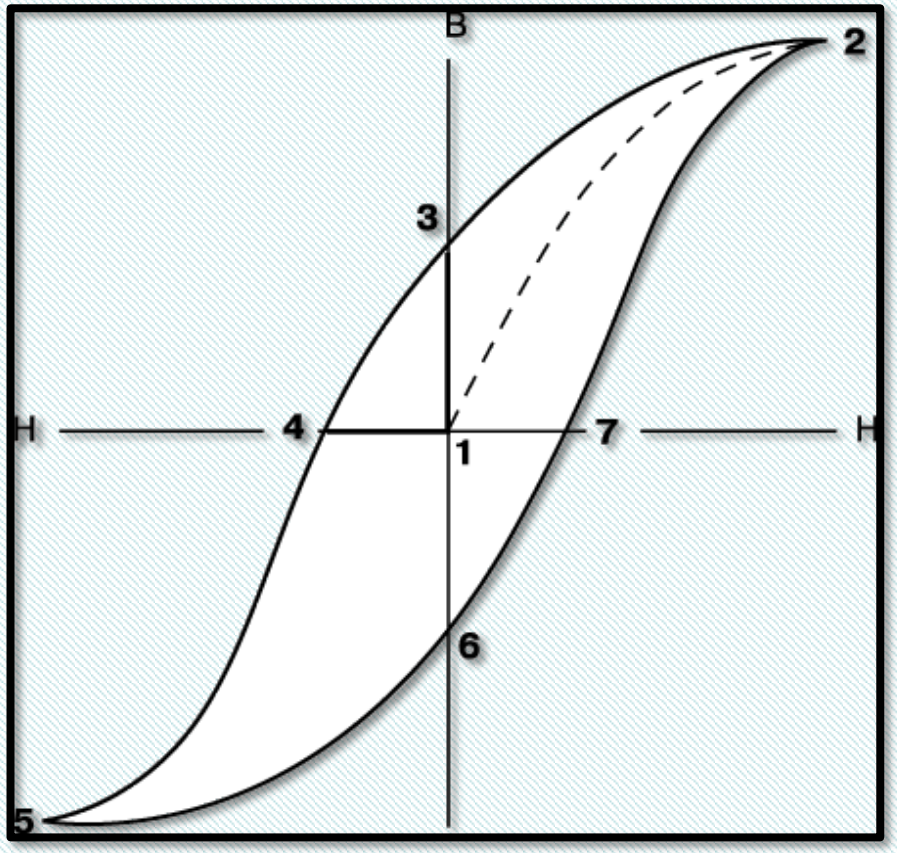
Ферромагнетик: $\chi >> 1$ доменная структура

Парамагнетик : $\chi = 10^{-2}\ldots10^{-3}$ хаотическая структура внутренних магнитных моментов;

Диамагнетик: отрицательная $\chi = -10^{-5}\ldots-10^{-6}$ не содержит магнитных моментов.

# Свойства подмагниченных ферритов

Связь между напряженностью поля H и индукцией B в начальной части нелинейна из-за явлений насыщения и гистерезиса.




В точке *2* достигается магнитное насыщение – далее индукция B линейно связана с H. Отрезок *1–3* определяет остаточную магнитную индукцию Br, отрезок *1–4* – коэрцитивную силу Hc, характеризующую способность образца противостоять размагничиванию

# Свойства ферритов в СВЧ поле

Свойства феррита при одновременном воздействии на него постоянного и слабого СВЧ магнитных полей описываются ***тензором магнитной проницаемости***

$$\vec{B} = \{\mu\}\vec{H} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \vec{H}$$

$$\mu = \mu_0\left(1 - \frac{\omega_s\,\omega_0}{\omega^2 - \omega_0^2}\right) = \mu' + i\mu''$$

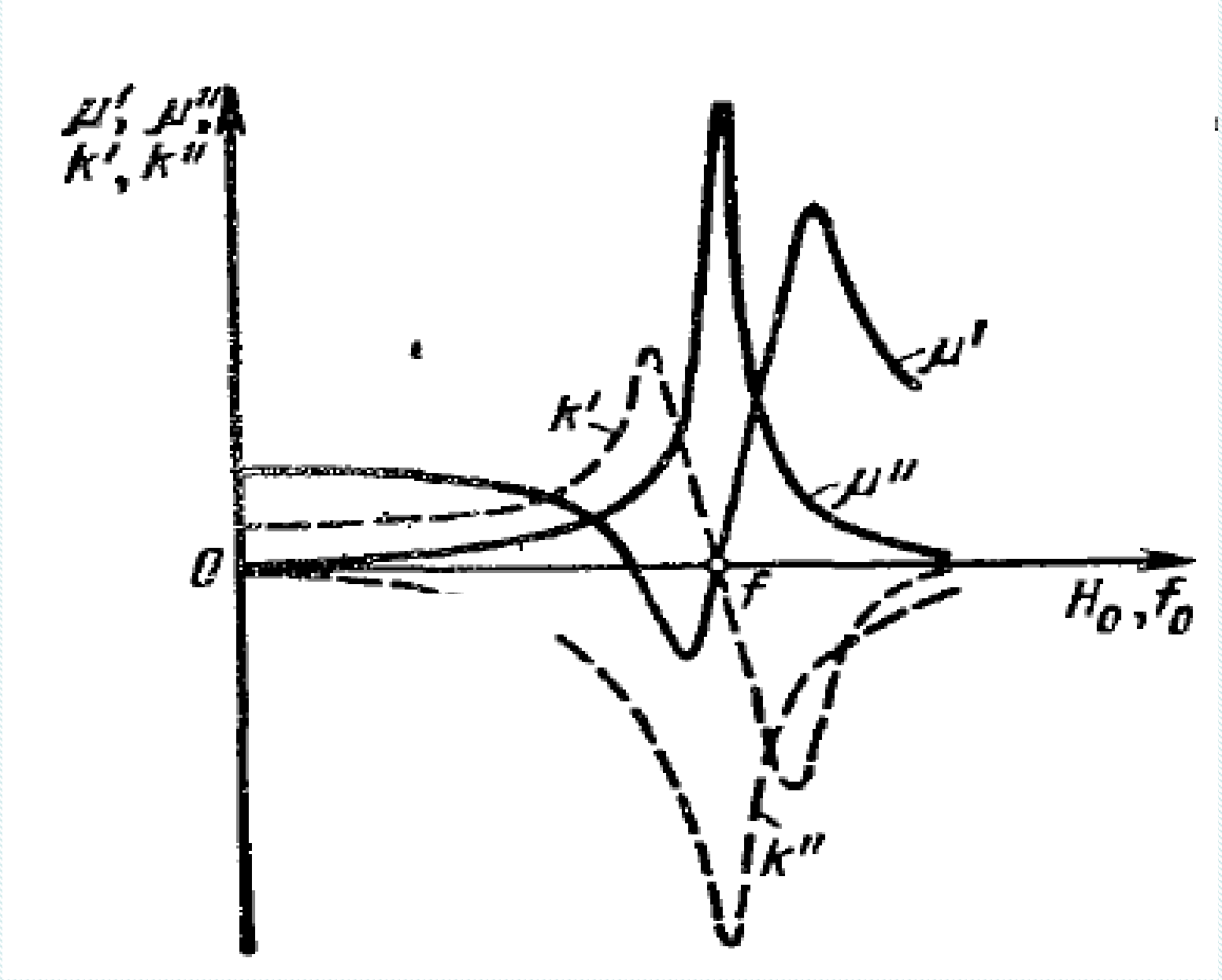
$$k = \mu_0\left(\frac{\omega_s\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}\right) = k' + ik''$$

$$\omega_s = \gamma\mu_0 M_s$$

$$\omega_o' = \mu_0\gamma H_0 \Rightarrow \omega_0 + i\mu_0\alpha$$

ω – частота СВЧ сигнала, ωs – параметр феррита, ω0 – частота гиромагнитного резонанса (ларморова частота). Для феррита с потерями она комплексная ω0’, α – коэффициент затухания, γ= e/m=1.76 $10^{11}$ Кл/кг – гиромагнитная постоянная.

# Зависимость параметров тензора феррита от поля подмагничивания




На частоте гиромагнитного резонанса резко возрастают потери – **резонансное поглощение.**

Ширина линии гиромагнитного резонанса

$$\Delta H \simeq 2\alpha H_0$$

# Взаимодействие СВЧ поля с ферритом при разных направлениях векторов $H_0$ и $H_{СВЧ}$

1. Совпадение направлений СВЧ поля и поля подмагничивания – нет гиротропности

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{СВЧ} \end{bmatrix} = \mu_0 \cdot H_{СВЧ} \cdot \vec{e}_z$$

2. Перпендикулярное расположение СВЧ поля и поля подмагничивания - появляется эллиптическая поляризация (меняется структура поля)

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{СВЧ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mu \cdot H_{СВЧ} \cdot \vec{e}_x + ik \cdot H_{СВЧ} \cdot \vec{e}_y$$

3. СВЧ поле имеет правую круговую поляризацию. Вектор индукции имеет также правую круговую поляризацию. Эффективная магнитная проницаемость μ+

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{СВЧ} \\ -iH_{СВЧ} \\ 0 \end{bmatrix} = \cdots$$

$$\cdots = \left[\mu \cdot H_{СВЧ} - k \cdot H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_x - i\left[\mu \cdot H_{СВЧ} - k \cdot H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_y \cdots$$

$$\cdots = \left[\mu_+ H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_x - i\left[\mu_+ H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_y$$

$$\mu_+ = \mu - k = \mu_0 \cdot \left(1 - \frac{\omega_s}{\omega - \omega_0}\right)$$

4. СВЧ поле имеет левую круговую поляризацию. Вектор индукции имеет также левую круговую поляризацию. Эффективная магнитная проницаемость μ-

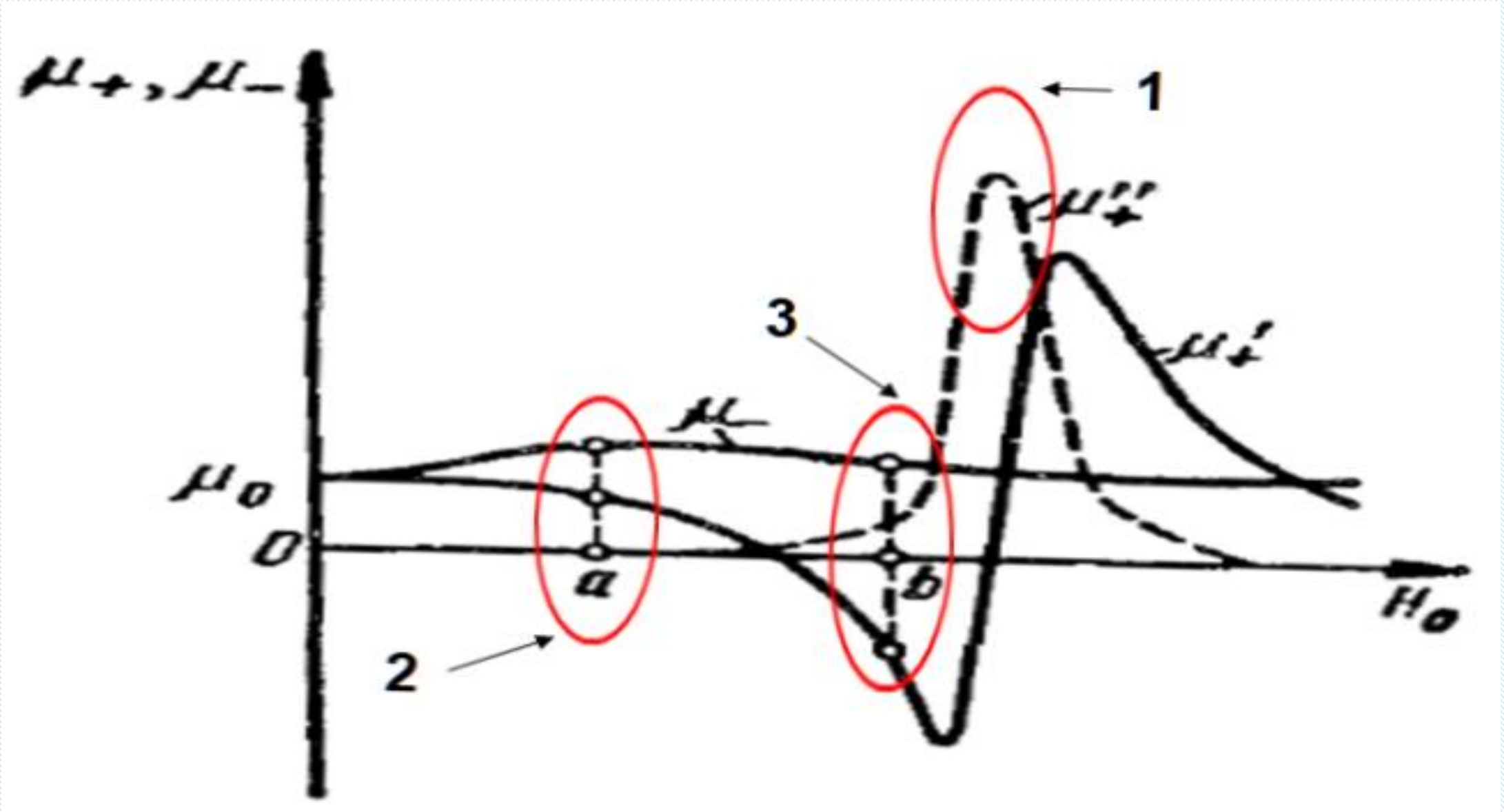
$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{СВЧ} \\ iH_{СВЧ} \\ 0 \end{bmatrix} = \cdots$$

$$\cdots = \left[\mu \cdot H_{СВЧ} + k \cdot H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_x + i\left[k \cdot H_{СВЧ} + \mu \cdot H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_y = \cdots$$

$$\cdots = \left[\mu_H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_x + i\left[\mu_H_{СВЧ}\right] \cdot \vec{e}_y$$

$$\mu_ = \mu + k = \mu_0 \cdot \left(1 + \frac{\omega_s}{\omega + \omega_0}\right)$$

# Зависимость коэффициентов μ+ и μ- от напряженности поля подмагничивания H0



# Области использования свойств подмагниченного феррита в СВЧ устройствах

1.Резонансная область. Максимальное поле подмагничивания H0=Hрез. Эффективное поглощение поля ТОЛЬКО ПРАВОЙ круговой поляризации. Невзаимные поглотители (вентили);

2.Дорезонансная область $\mu- > \mu+$ (сечение a) – различные свойства феррита для волн разной поляризации (невзаимные фазовращатели, циркуляторы)

3.Дорезонансная область $\mu- > 0$ , $\mu+ < 0$ (сечение b) - выталкивание поля правой поляризации из феррита (вентили на смещении поля)

4.Регулирование $\mu+$ в дорезонансной области плавным изменением поля подмагничивания (плавные фазовращатели)

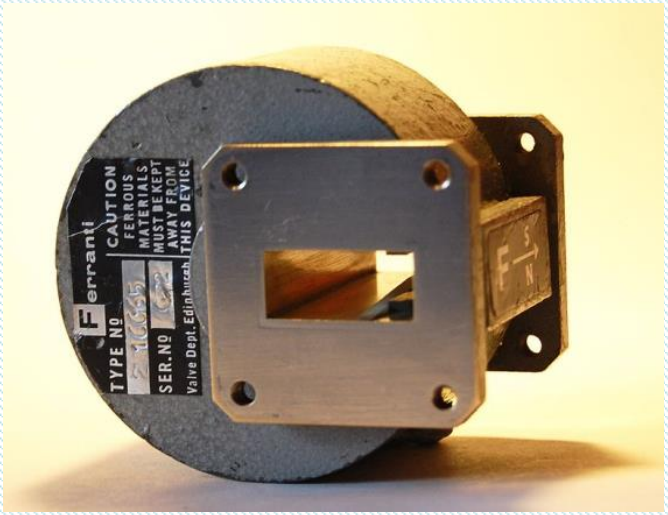
# Классификация ферритовых устройств СВЧ

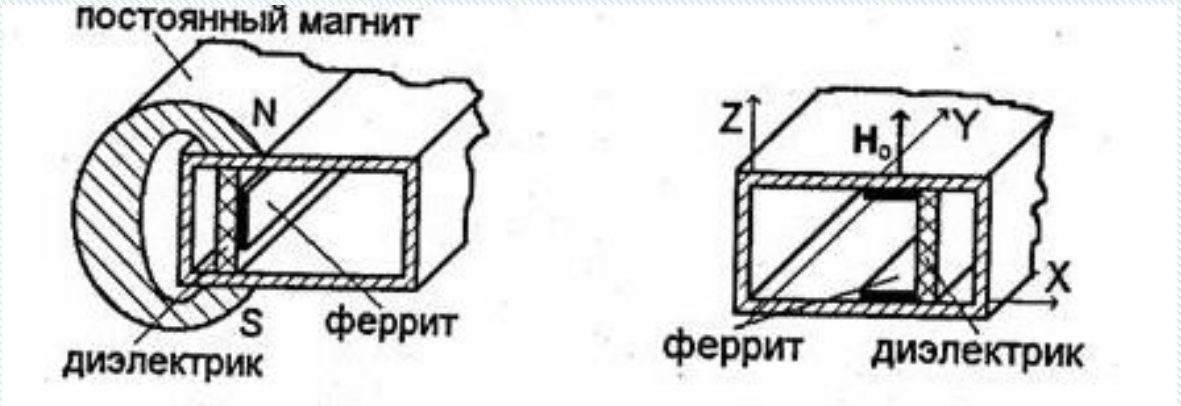


# Вентиль

1. Резонансные вентили-

Принцип действия таких вентилей основан на явлении поперечного резонанса. Потери энергии при резонансе оказываются малыми для одного направления распространения и большими для другого.



2.Вентили со смещением поля. Такие вентили выгодно отли-чаются от резонансных меньшими габаритами и массой, поскольку согласно  величина намагничивающего поля в них в 1,5…2 раза меньше, чем в резонансных. Принцип действия основан на явлении смещения поля, существующем в линиях передачи, содержащих намагниченные ферритовые элементы

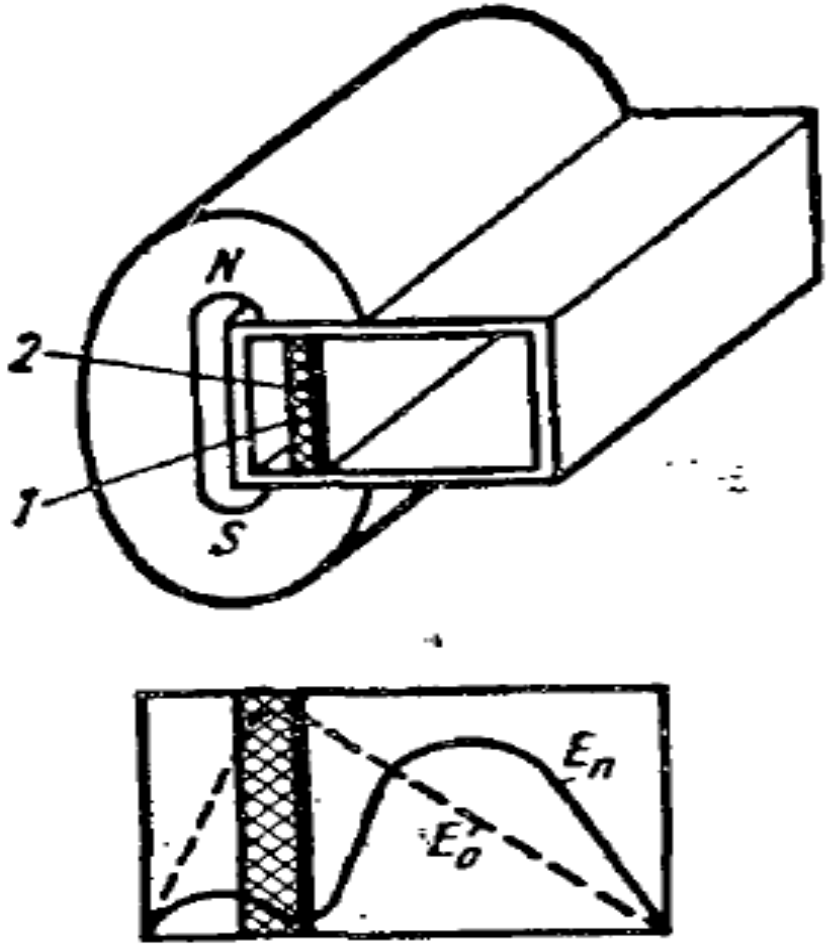



Рис. 6.19. Вентиль со смещеннем поля на прямоугольном волноводе

# Конструкция вентиля на смещении поля

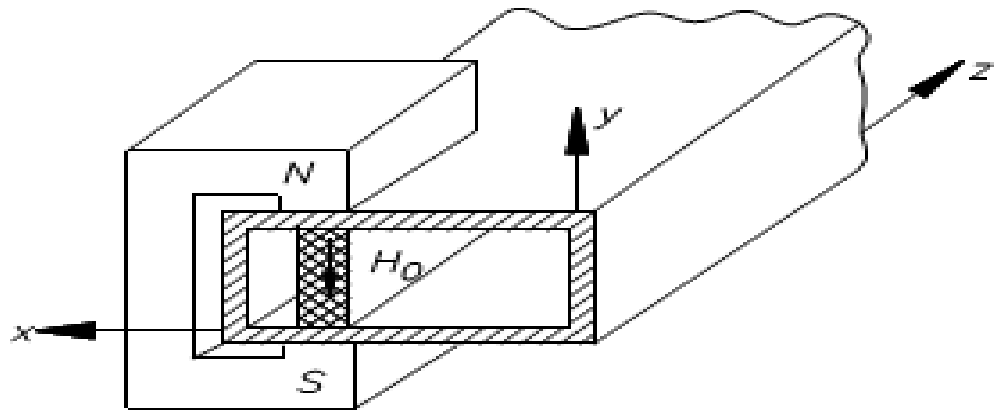
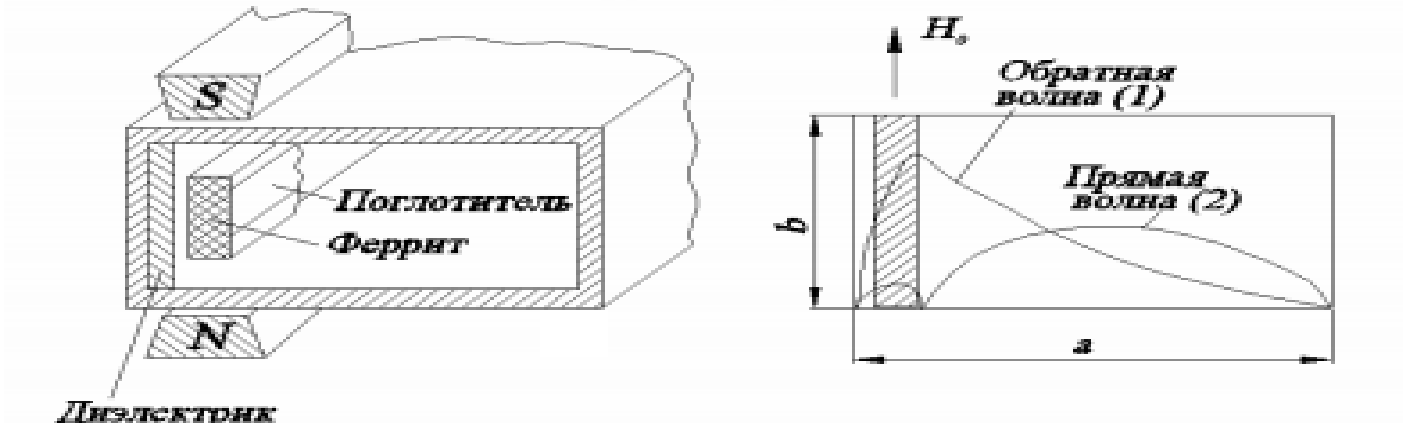


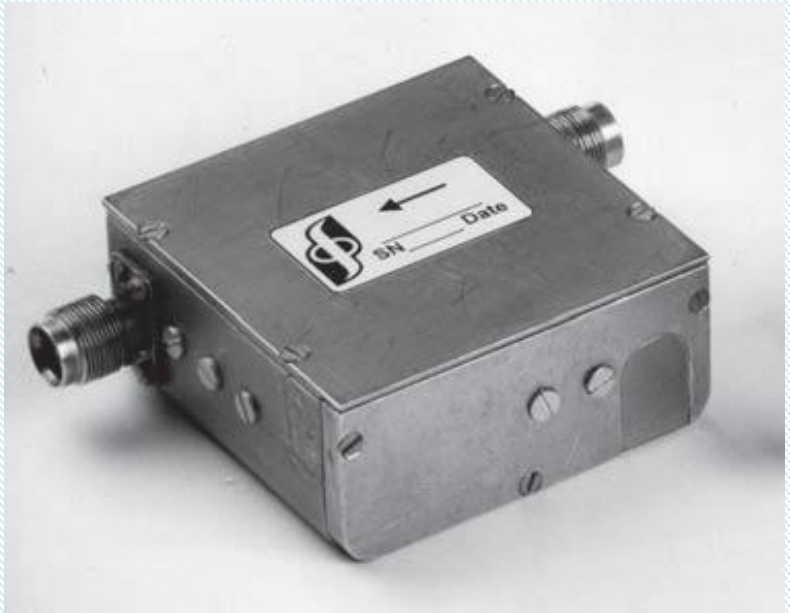

**Рис. 4.2. Эскиз конструкции резонансного вентиля**




*а)* *б)*

**Рис. 4.3. Вентиль со смещением поля:**
*а* – эскиз конструкции; *б* – распределение напряжённости электрического поля

# Резонансный вентиль на коаксиальном волноводе



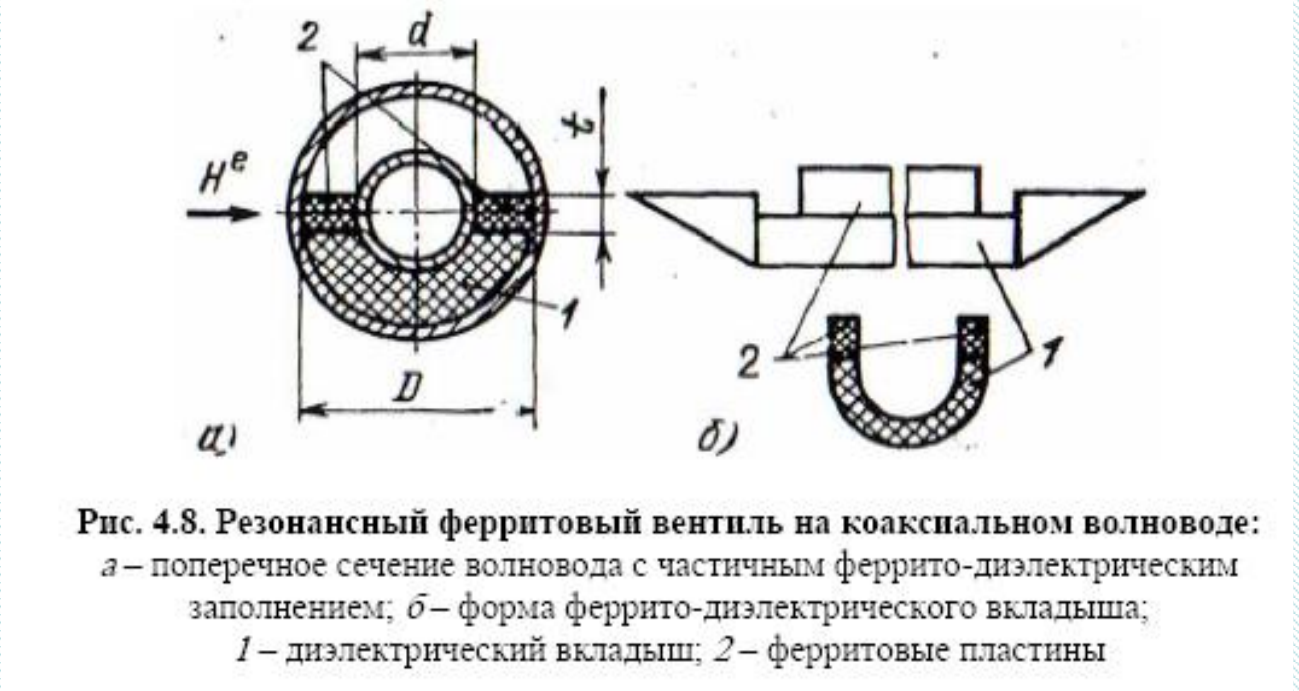




**Рис. 4.8. Резонансный ферритовый вентиль на коаксиальном волноводе:**
*а* – поперечное сечение волновода с частичным феррито-диэлектрическим заполнением; *б* – форма феррито-диэлектрического вкладыша;
*1* – диэлектрический вкладыш; *2* – ферритовые пластины

Областей с круговой поляризацией СВЧ магнитного поля в коаксиальной линии нет. Для их создания частично заполняют коаксиальный волновод диэлектриком с большой проницаемостью (10...20).

# Резонансный вентиль на полосковой линии

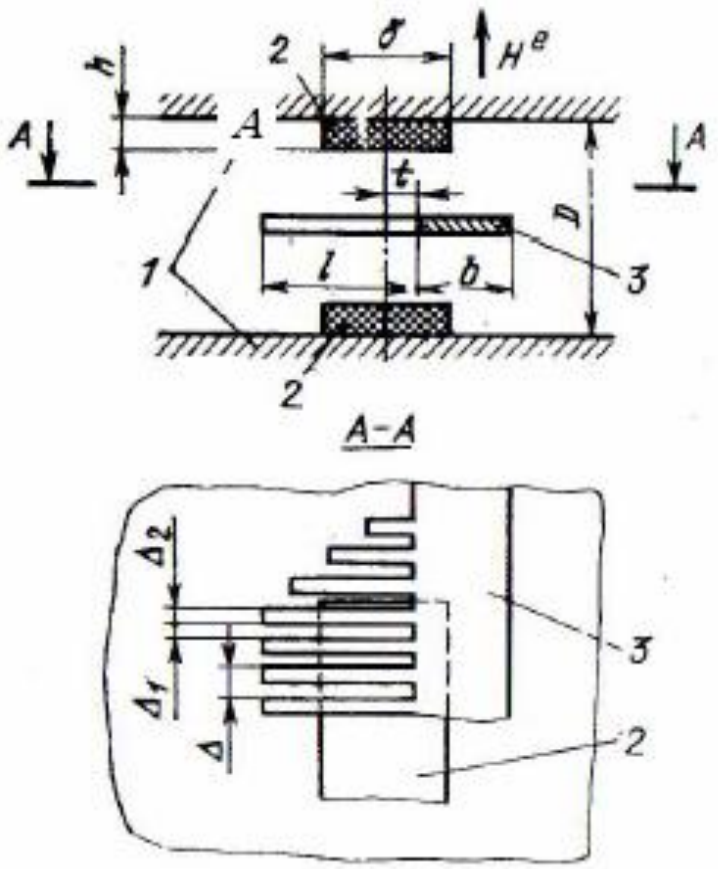
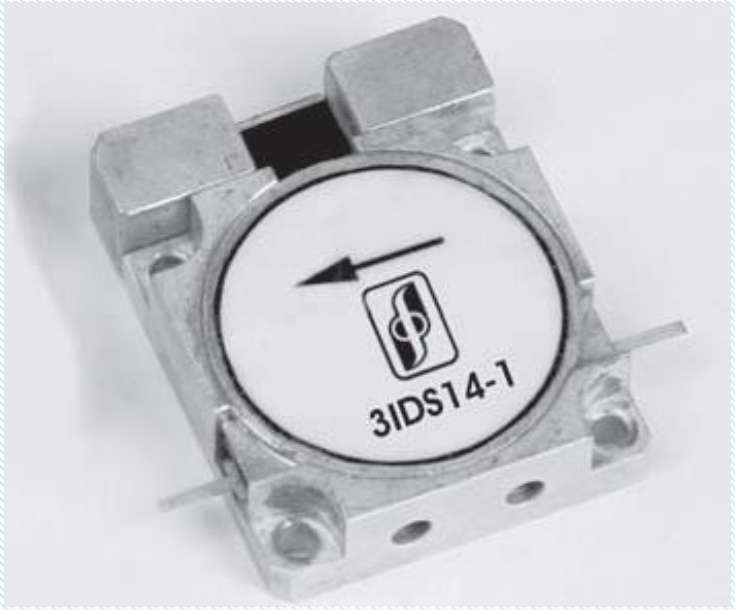



**Рис. 4.9. Резонансный вентиль на полосковом волноводе с гребенчатым центральным проводником:**
*1* – заземлённые пластины; *2* – ферритовые вкладыши;
*3* – центральный проводник с гребенчатой замедляющей структурой




Для создания области с круговой поляризацией СВЧ магнитного поля используют гребенчатую замедляющую структуру на центральном полосковом проводнике, образованную рядом разомкнутых шлейфов, длины которых на основной части вентиля $L = 0{,}125\lambda$ , *а на концах вентиля для широ*кополосного согласования *L плавно уменьшается.*

# Полосковая конструкция резонансного вентиля

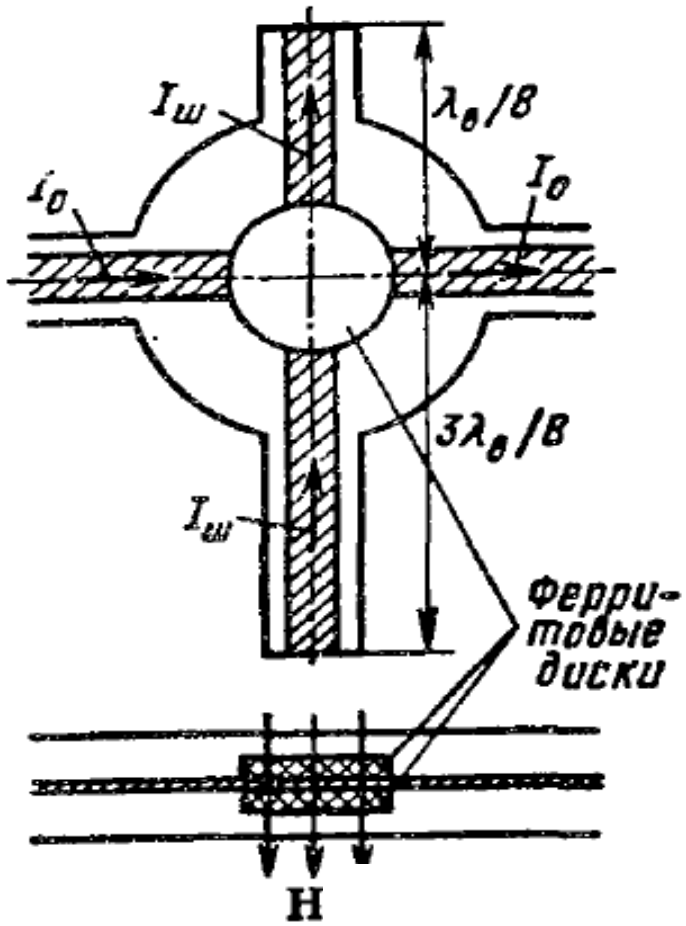


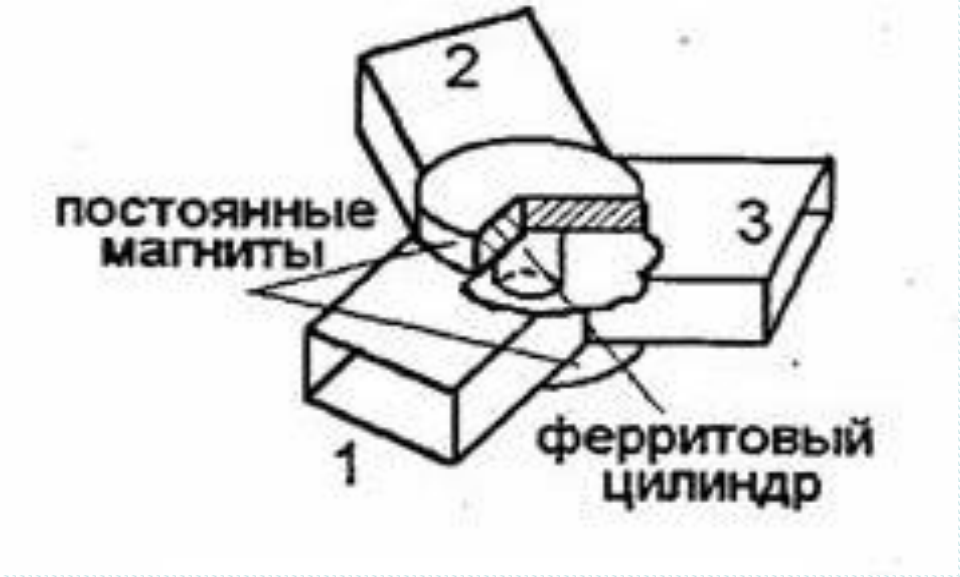

Рис. 6.18. Резонансный вентиль на полосковой линии передачи с короткозамкнутыми шлейфами

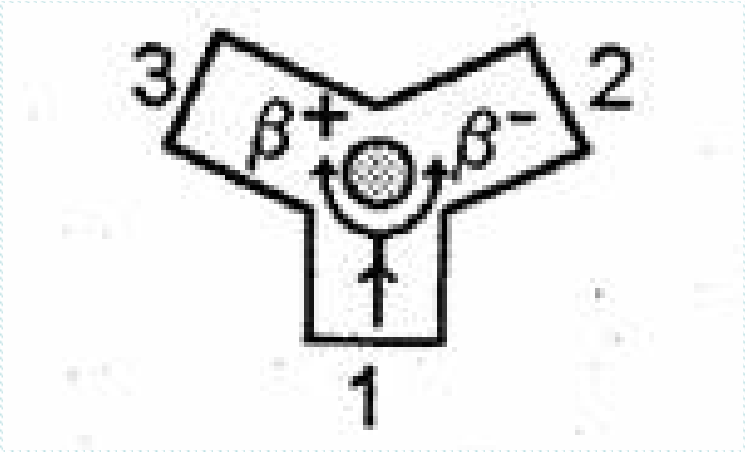
Вращающееся магнитное поле в области ферритовой вставки создается с помощью двух поперечных шлейфов. Суммарный ток, ответвляющийся в шлейфы, равен нулю, поэтому согласование не нарушается.

Общий недостаток резонансных вентилей: большая масса постоянного магнита, который должен создавать большую напряженность магнитного поля (сотни тысяч ампер на метр)

# Y-Циркулятор

Волноводный Y-циркулятор представляет собой Н- плоскостное Y-сочленение прямоугольных волноводов, в центре которого помещен ферритовый цилиндр .




Принцип действия Y-циркулятора заключается в следующем. Предположим, что в плече *1* циркулятора возбуждена волна $H_{10}$, распространяющаяся в направлении ферритового цилиндра. В результате дифракции волны на цилиндре возникают две волны, одна из которых (левая) обегает ферритовый цилиндр по часовой стрелке, а другая (правая) - против часовой стрелки. Набеги фаз из-за невзаимности будут разные – в одном плече волны складываются, в другом - вычитаются

# Y-циркулятор

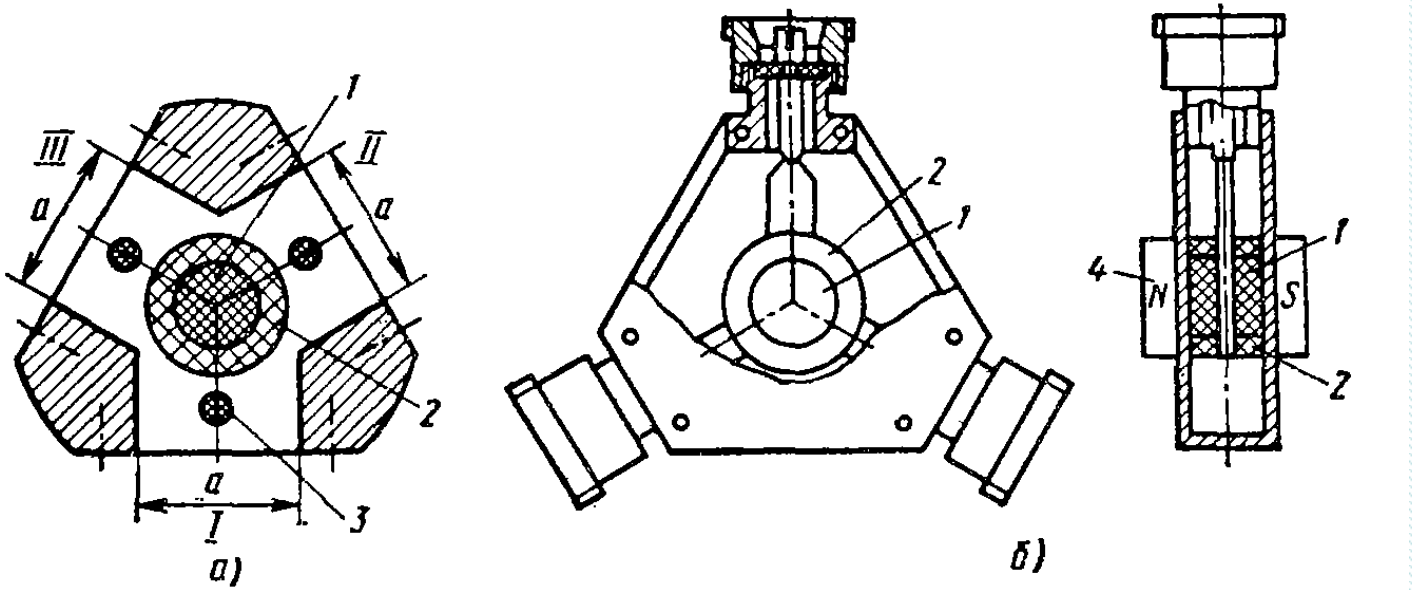
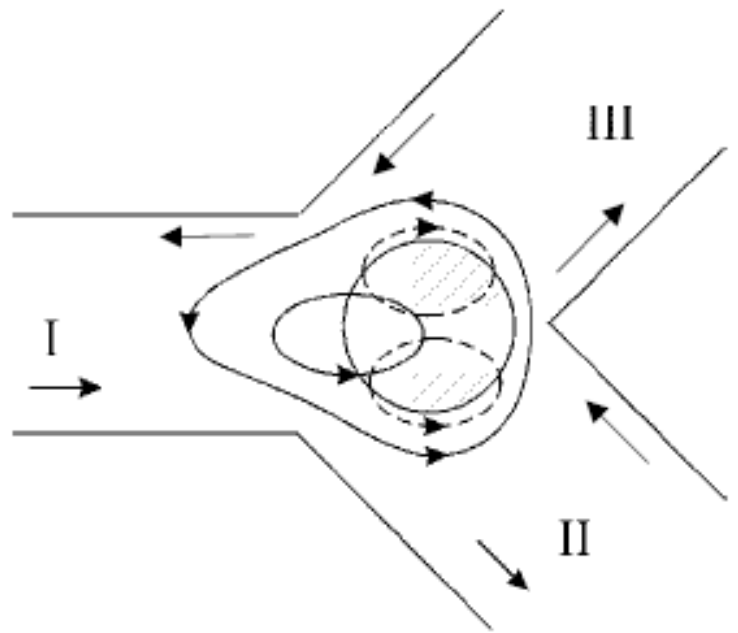



Рис. 6.21. Волноводный (*а*) и полосковый (*б*) Y-циркуляторы

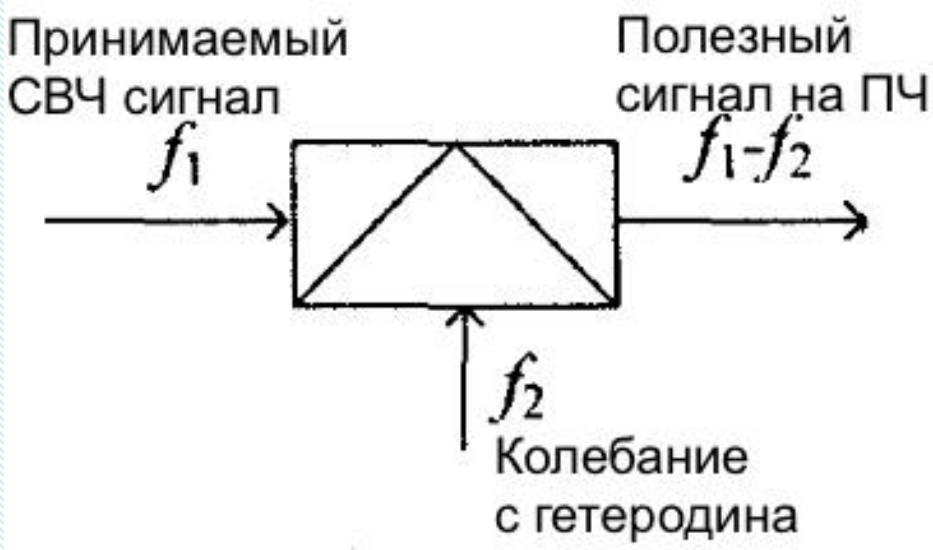



*Преимущества Y-циркуляторов:*

*1)Простота конструкции 2) малые габариты и масса*

*3)Широкополосность (волноводные – до 30%, полосковые – до октавы)*

# Диодные смесители СВЧ

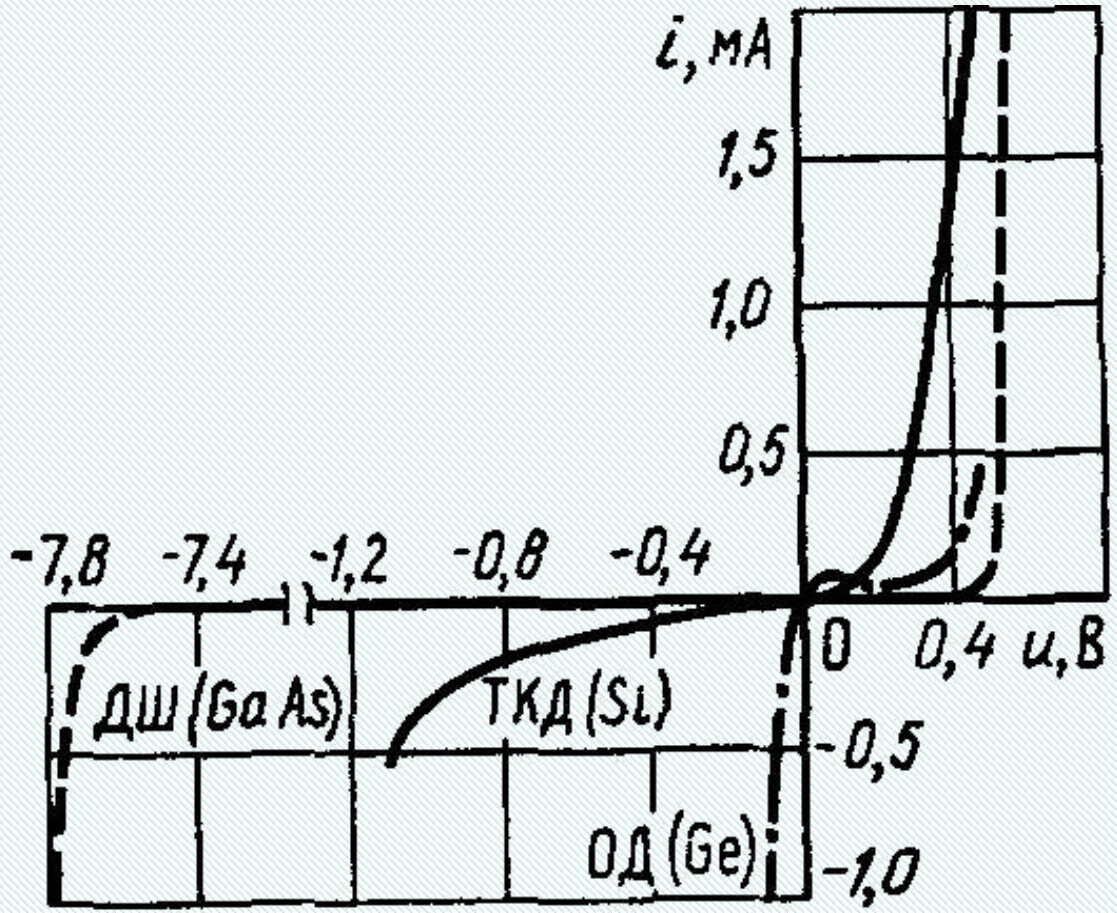



Смеситель - трехпортовое устройство, имеющее вход радиочастоты (RF), вход сигнала гетеродина (LO) и выход промежуточной частоты (IF)

**Смеситель** – СВЧ устройство, предназначенное для преобразования двух колебаний частот $f_1$ и $f_2$ с помощью параметрического или нелинейного элемента в колебание *разностной* частоты $f_1$-$f_2$ (реже- *суммарной* частоты $f_1$+$f_2$ ).

**Преобразователь** частоты – это смеситель + гетеродин (LO- Local Oscillator)+фильтр ПЧ.

Преобразование частоты сигнала происходит за счет изменения во времени параметров смесительного элемента (диода) (параметрическое устройство) . Для входного сигнала малого уровня смеситель линеен. Изменение параметров диода происходит большим сигналом гетеродина.

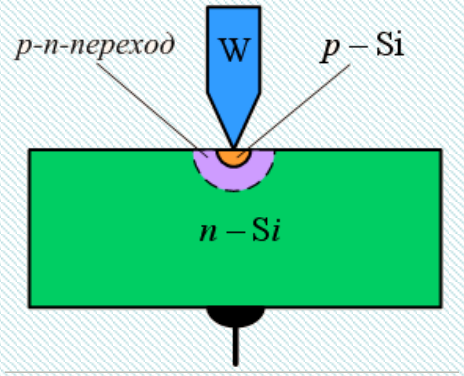



*Вольт-амперные характеристики смесительных диодов*

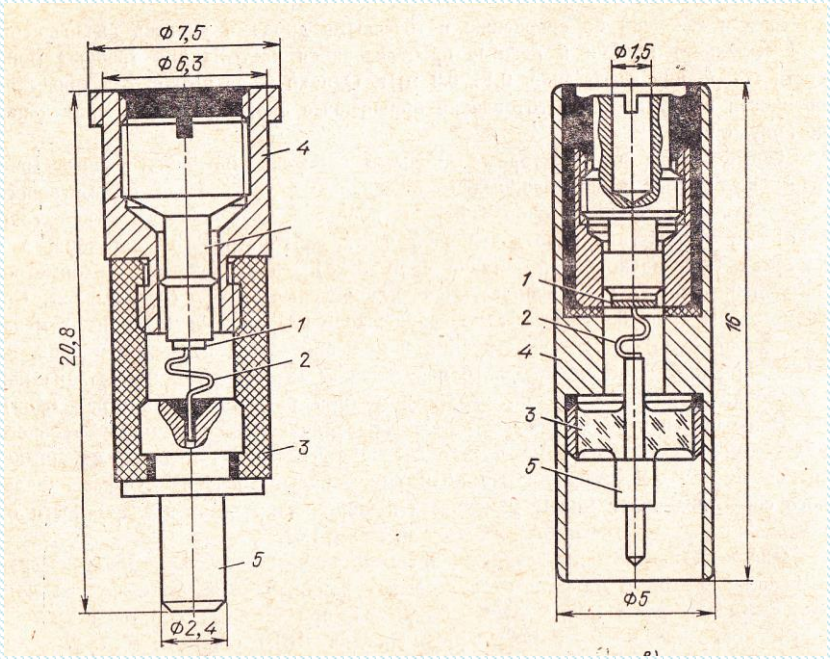
В смесителях используют:

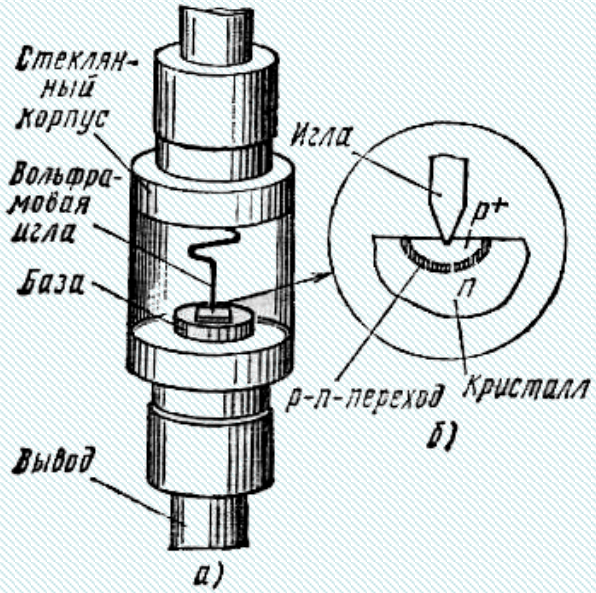
- точечно-контактные диоды (ТКД)
- диоды с барьером Шотки (ДШ).
- обращенные туннельные диоды (ОД)
- варикапы
- СВЧ транзисторы

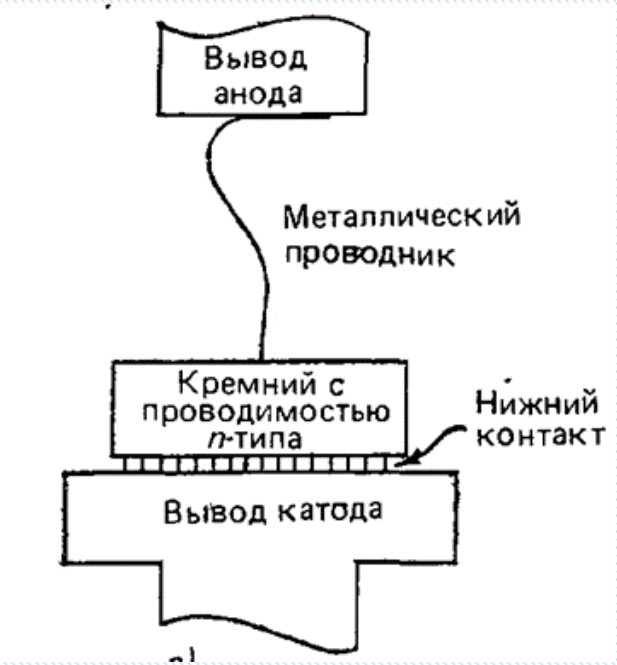
# Диод с точечным контактом




Диод с точечным контактом представляет собой полупроводниковый кристалл  с проводимостью n-типа, с которым контактирует заостренный металлический проводник. Обладает малой емклстью, но низкая стабильность контакта

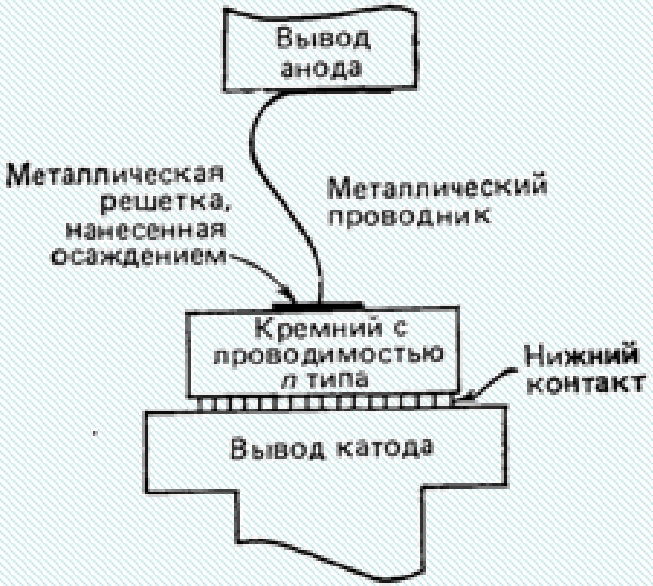


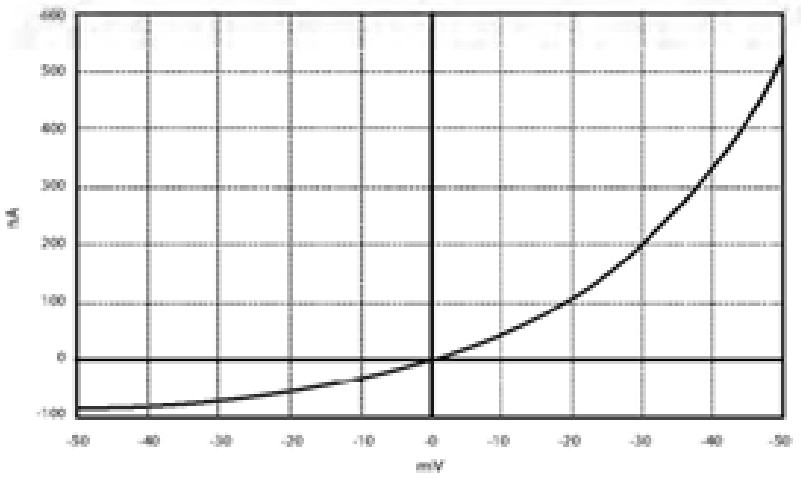



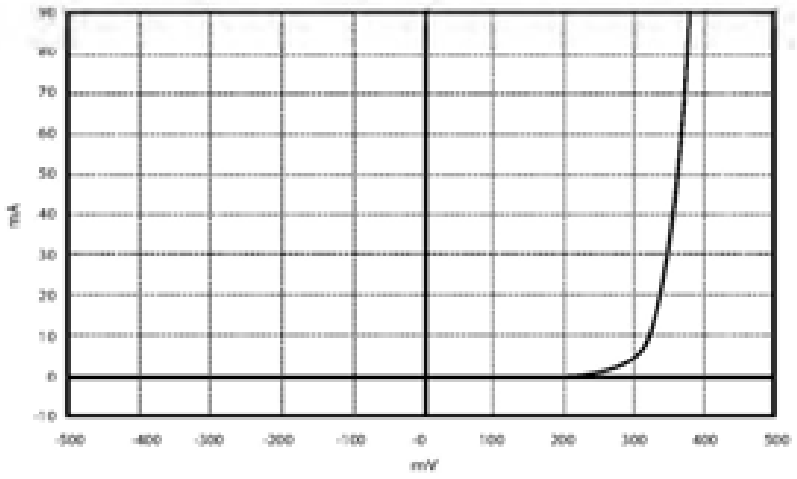


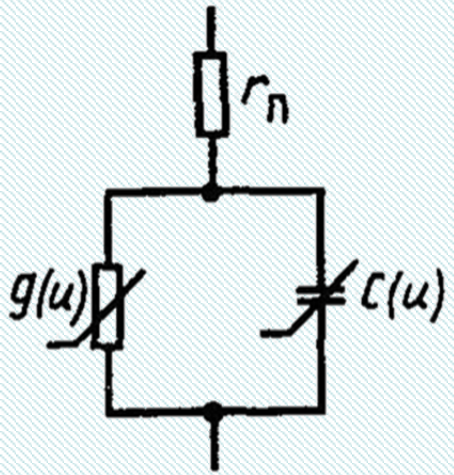

# Диод с барьером Шоттки (ДШ)




Диод с барьером Шоттки состоит из кристалла кремния с проводимостью n-типа, на который нанесена сетка металлических контактов. Для подключения к одному из этих контактов используется металлическая пружинка.
Конструкция ДШ обеспечивает высокую повторяемость, малое прямое напряжение , малое напряжение отсечки.




Эквивалентная схема смесительного диода

# Параметры смесителей СВЧ

- Потери преобразования

  $P_{\text{с}}$ – мощность входного СВЧ сигнала;

  $P_{\text{пч}}$ – мощность выходного сигнала на ПЧ

$$L_{\text{пс}} = 10\lg(P_{\text{с}} / P_{\text{пч}})$$

- Коэффициент шума
- Уровень фазовых шумов гетеродина
- Полоса рабочих частот
- Динамический диапазон $P_{\max}$ – максимальная мощность входного сигнала, не приводящая к амплитудным искажениям ;

  $P_{\min}$ – минимальная мощность входного сигнала, различимая на фоне шумов

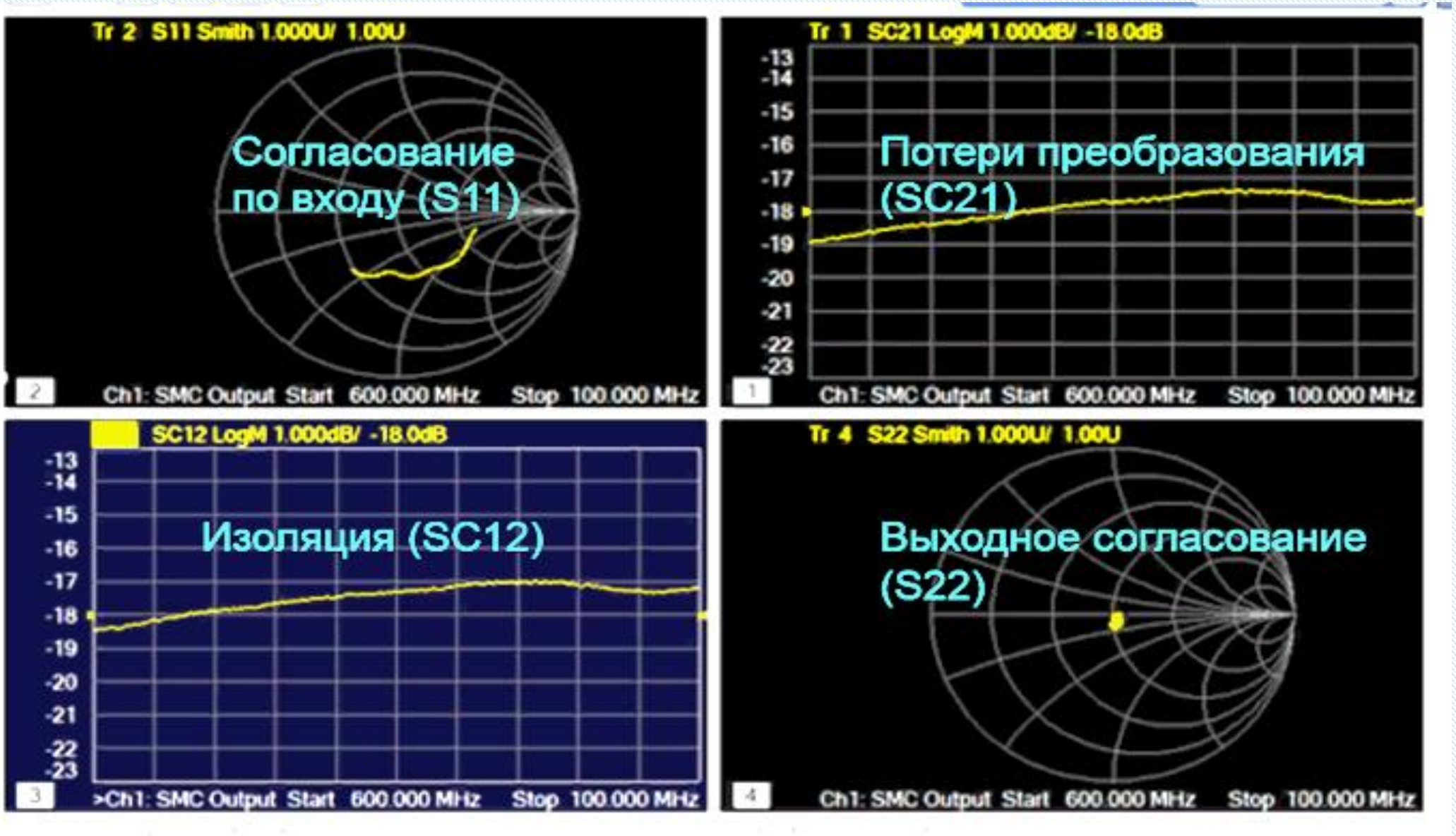
$$D = 10\lg(P_{\max} / P_{\min})$$

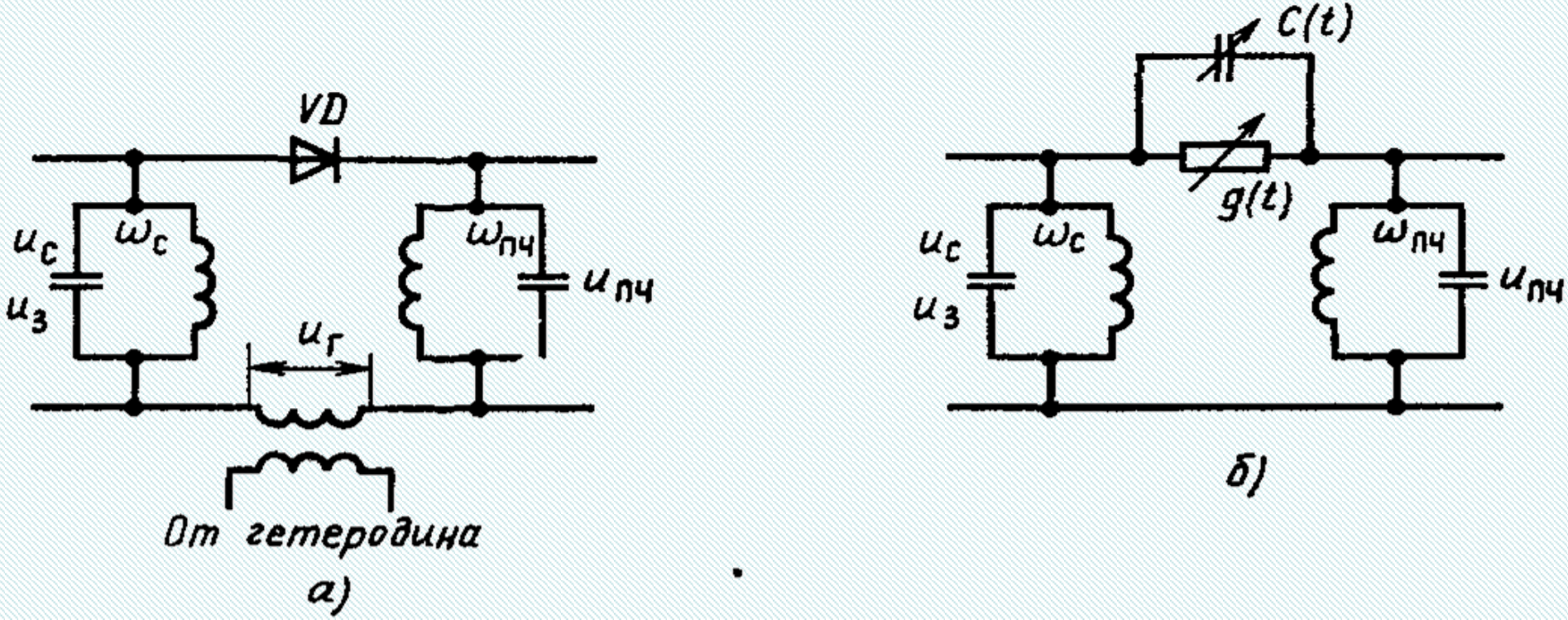
- Величина подавления гармоник входных сигналов и сигналов комбинационных частот $КП = 10\lg(P_{\text{пч}} / P_{\text{п}})$

  Рп – мощность паразитных (зеркальных, комбинационных и т.д.) составляющих на выходе смесителя (на ПЧ)

- Развязка между входами сигнала и гетеродина
- Требуемая мощность гетеродина
- КСВ по входам сигнала и гетеродина
- Параметры рассеяния по входам смесителя (на частотах сигннала, гетеродина и ПЧ)

# Измерение параметров СВЧ смесителя с помощью векторного анализатора цепей

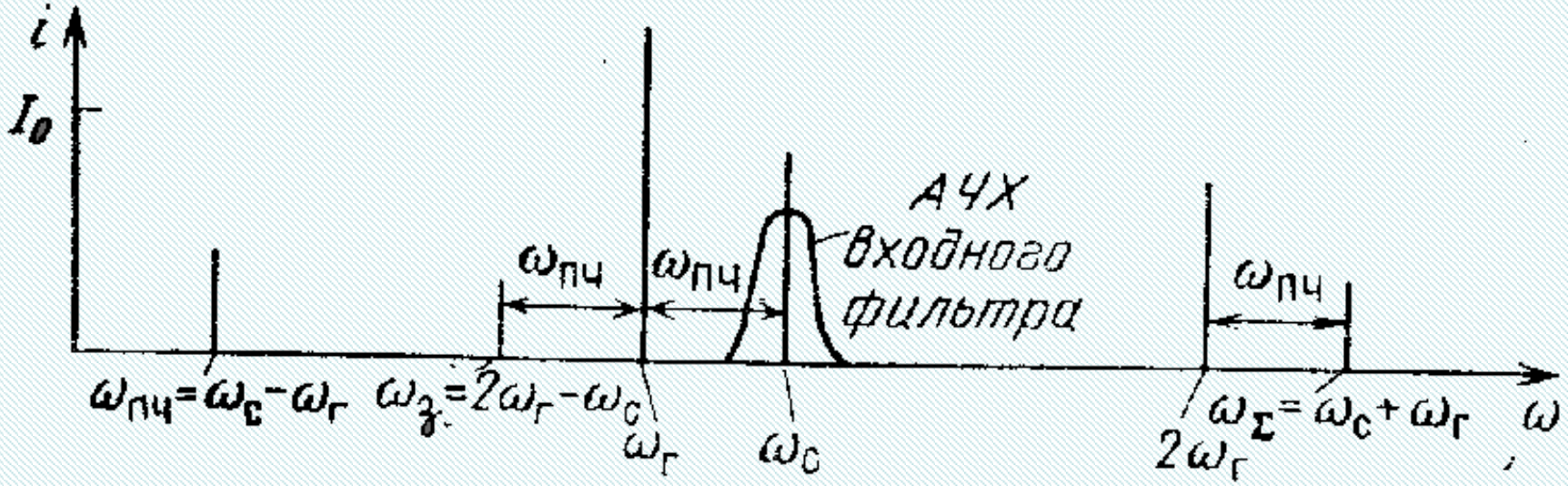





Принципиальная электрическая (а) и эквивалентная (б) схемы однодиодного смесителя

Для работы смесителя используют чаще всего активную  нелинейную проводимость запирающего (барьерного) слоя g(u) .

Спектральный состав колебаний в преобразователе частоты.




Частоты сигналов и комбинационных составляющих :

- Частота сигнала, частота зеркального канала
- Частота гетеродина
- Промежуточная частота ПЧ
- Удвоенная частота гетеродина
- Суммарная частота
- Зеркальная частота (совпадает с частотой зеркального канала)

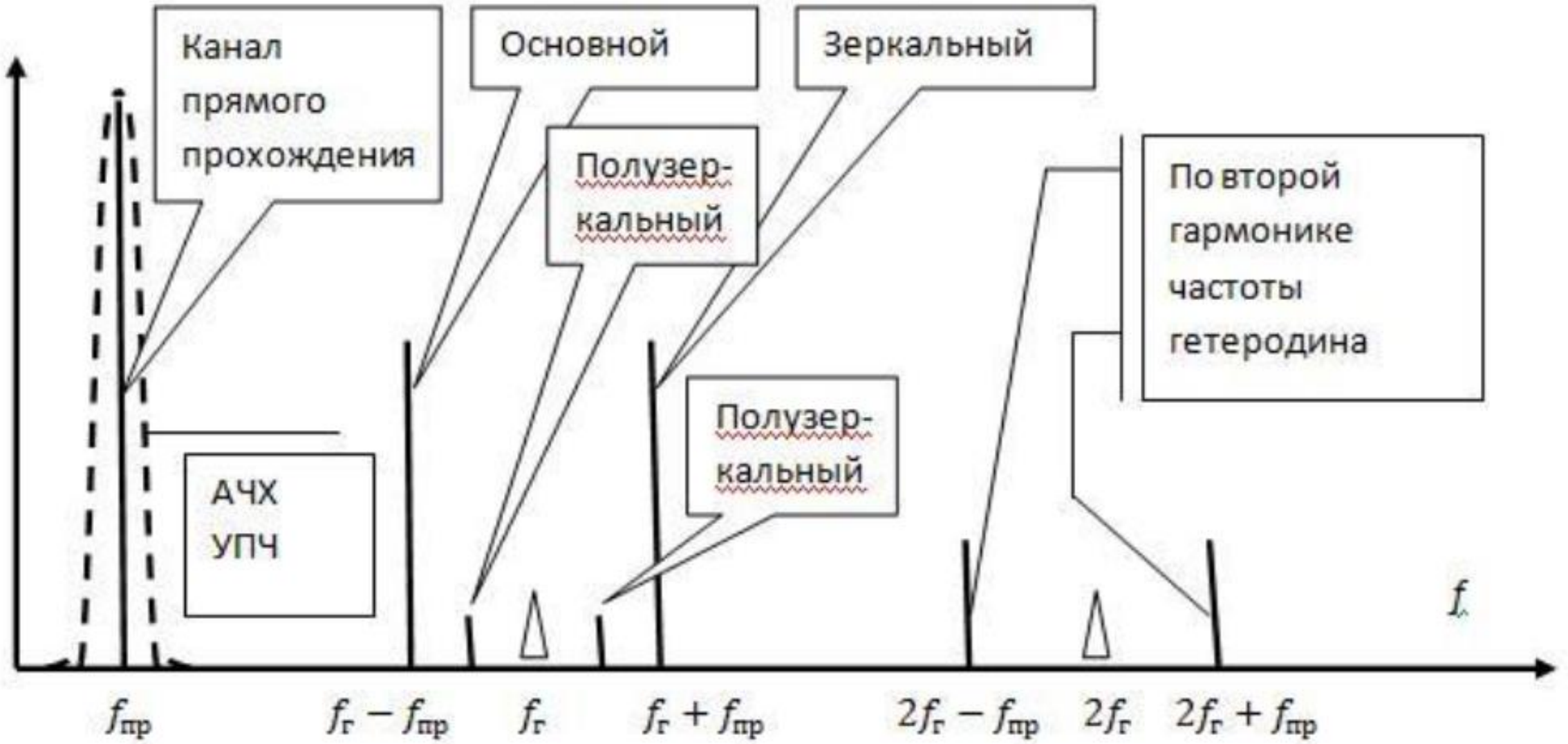
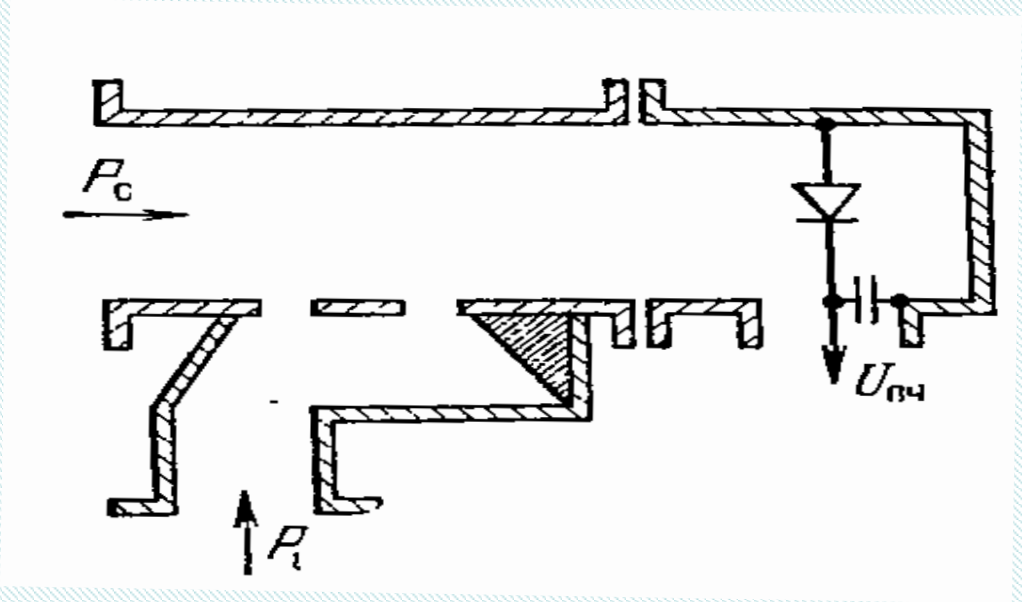
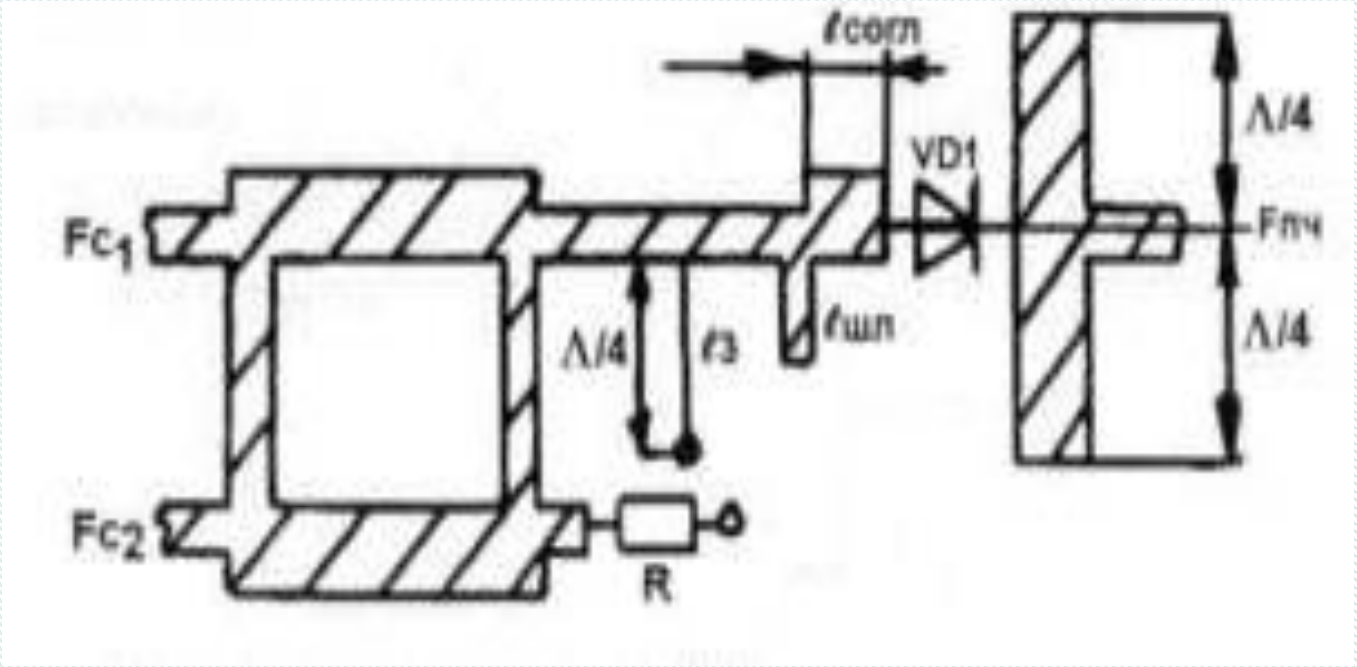



Рис. 5.4. Побочные каналы приема

# Однодиодный смеситель СВЧ




Реализация в волноводном варианте (связь гетеродина с помощью НО)

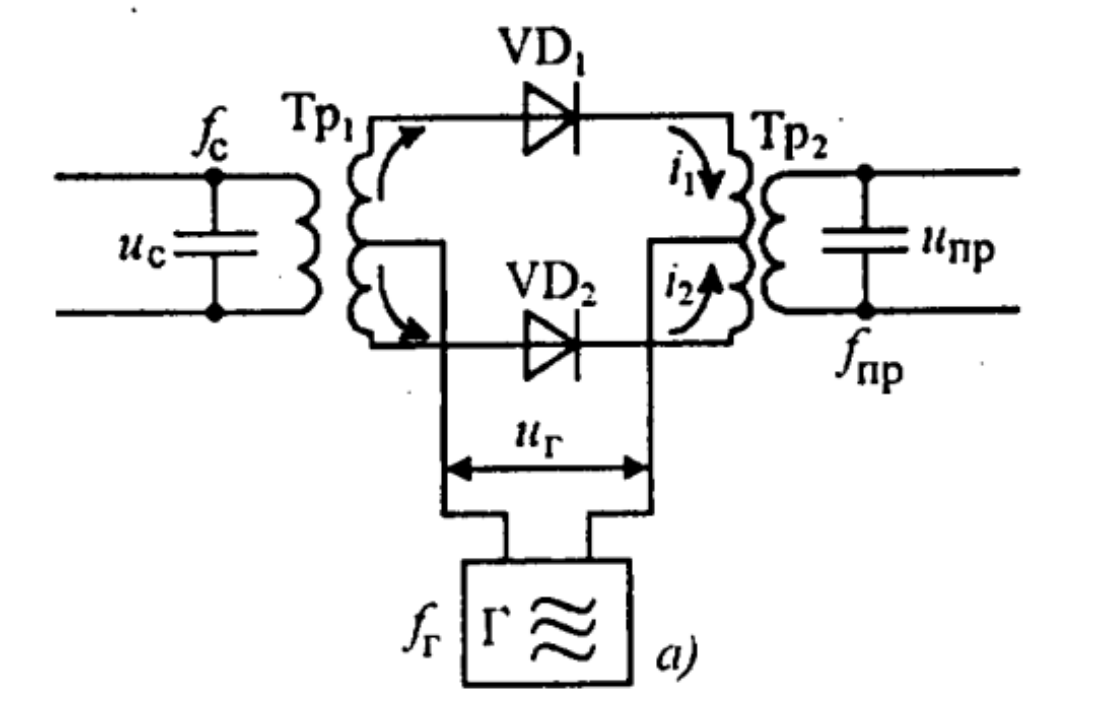



Микрополосковый вариант однодиодного СВЧ смесителя

# Однодиодный смеситель СВЧ

- Достоинства:
  - простота реализации
  - снижение требований к напряжению пробоя диода по сравнению с балансным смесителем
- Недостатки:
  - нет подавления шумов гетеродина
  - малый динамический диапазон и максимально допустимая мощность (≈ на 3дБ меньше балансного смесителя)
  - мощность гетеродина попадает  в сигнальный и ПЧ выходы
  - высокая относительная плотность сигналов комбинационных частот
  - высокий уровень собственных шумов, низкая чувствительность

# Балансный двухдиодный смеситель СВЧ

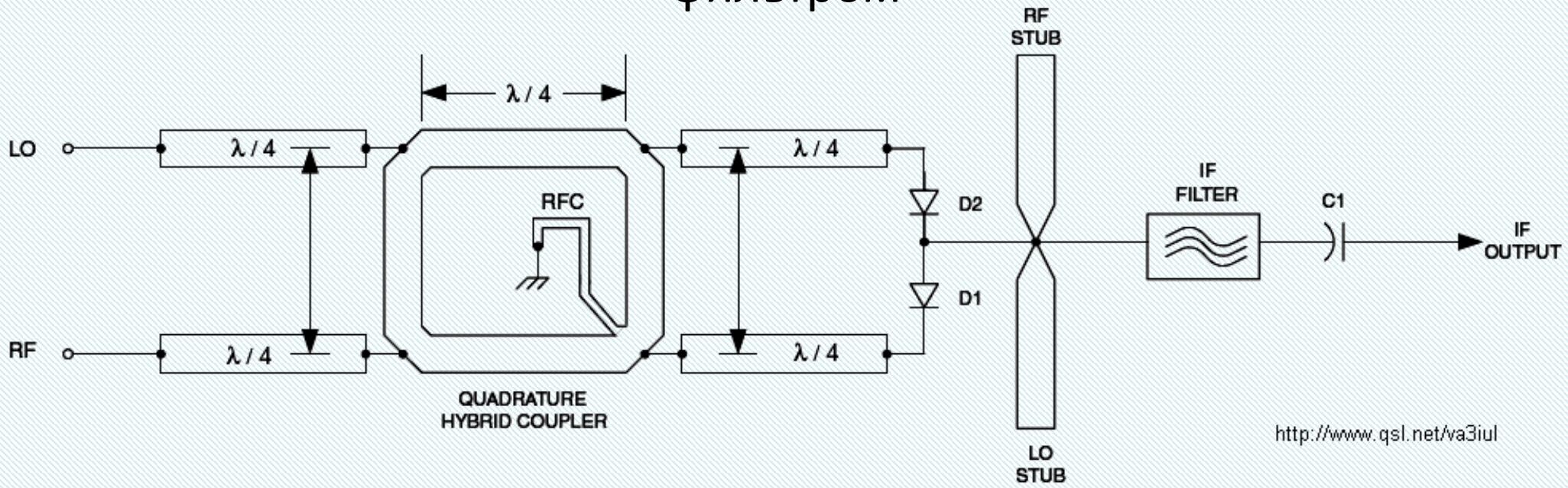



Принципиальная электрическая схема смесителя с синфазной подачей напряжения гетеродина

Смеситель содержит два диода, которые включены так, что их токи $i_{д1}$, и $i_{д2}$ протекают в первичной обмотке выходного трансформатора $WT_2$ во встречных направлениях. При этом синфазные составляющие магнитного потока взаимно компенсируются, а противофазные—складываются.

Достоинства: балансный смеситель позволяет уменьшить мощность гетеродина, просачивающуюся в антенну приемника. Не проходят шумы гетеродина, нет полузеркальных каналов прохождения (вторая гармоника сигнала и гетеродин)
Недостаток: в диапазоне СВЧ сложности реализации симметричного выходного трансформатора.

# Схема балансного смесителя с квадратурным мостом и режекторным фильтром

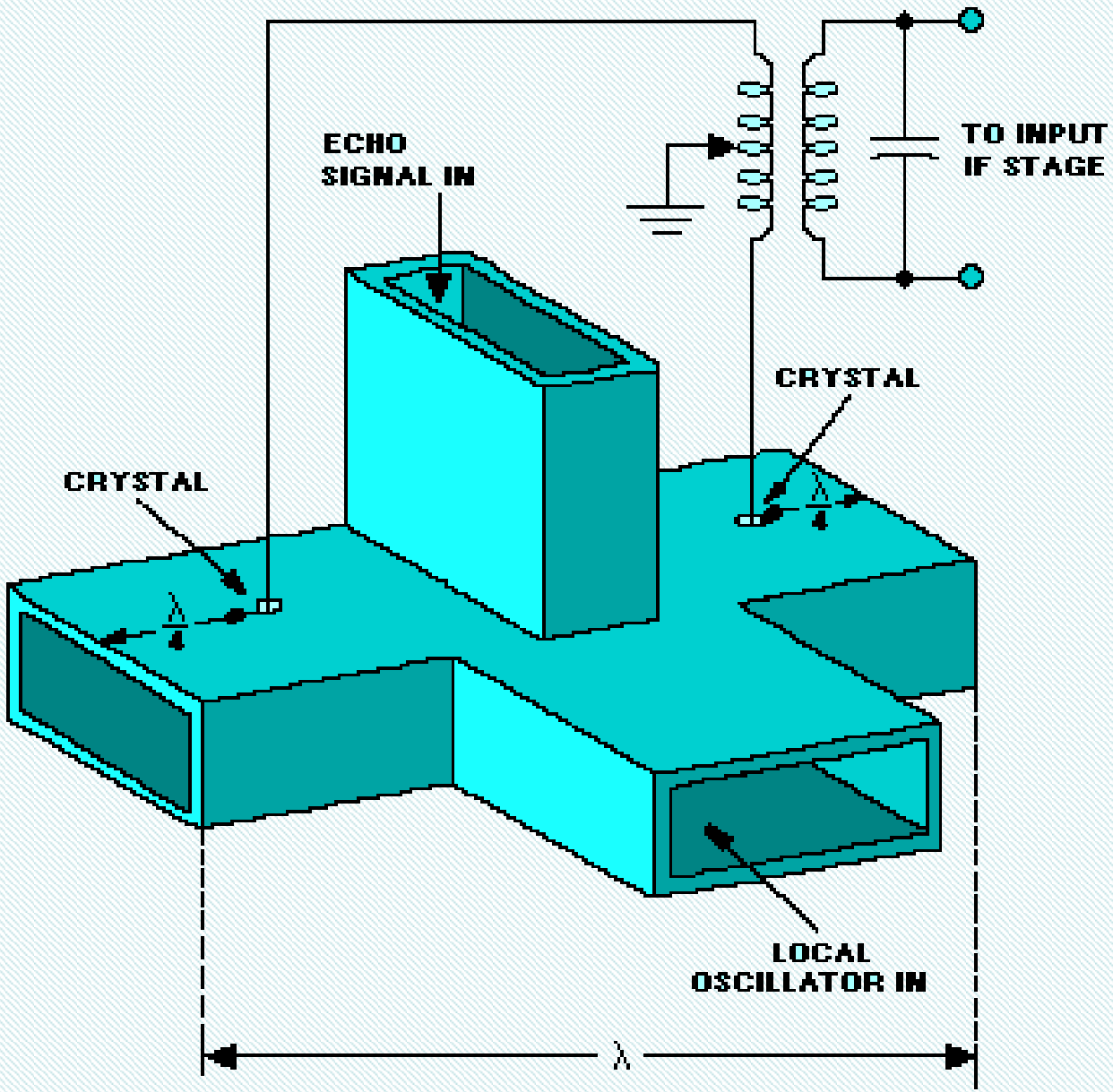



Развязка цепей входного сигнала и гетеродина обычно осуществляется с помощью направленных ответвителей.

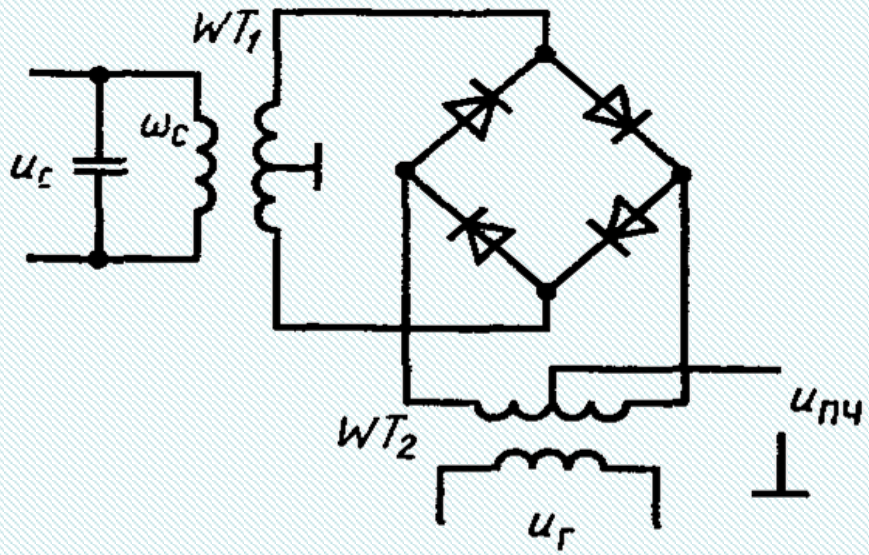
В смесителях необходимо обеспечить:

- согласование диода с подводящей МПЛ
- замыкание на «землю» по высокой частоте одного из выводов диода
- развязку между цепями сигнала, промежуточной частоты и постоянного тока диода
- замыкание на «землю» токов промежуточной частоты и постоянного тока диода.
- На выходе смесителя обычно включают режекторный фильтр,

# Схема балансного смесителя на основе двойного волноводного тройника




Из-за свойств двойного волноводного тройника на входах 1 и 2 имеем суммарный и разностный сигнал. В силу нелинейности детекторов на этих входах возникает спектр частот. Из этого спектра выделяется разностный сигнал. Затем он подается на усилитель промежуточной частоты (УПЧ). Входы 3 и 4 развязаны. Выбираем рабочий режим изменением мощности гетеродина.




Принципиальная схема двойного балансного смесителя по кольцевой схеме включения диодов

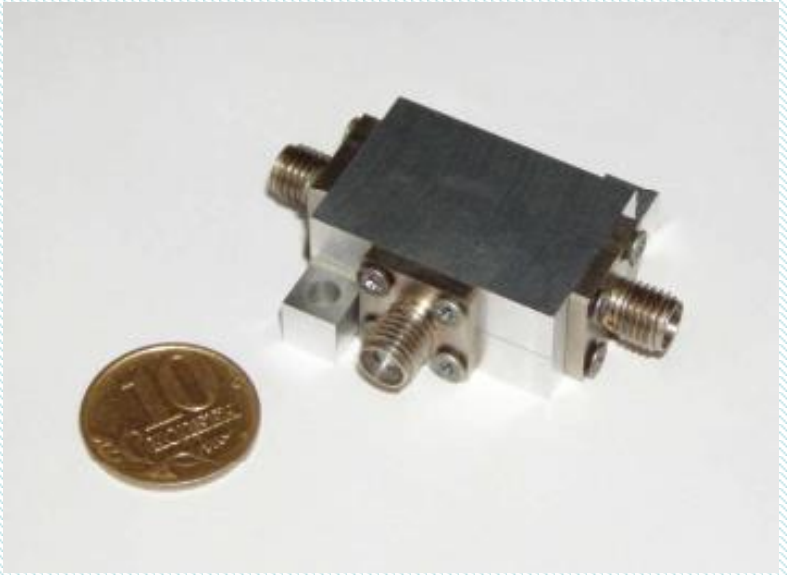
*Двойной балансный смеситель* по кольцевой схеме обладает более высокой избирательностью по каналу прямого прохождения. обеспечивается внутренняя взаимная развязка входов сигнала, гетеродина и выхода смесителя. исключается прохождение обоих входных сигналов смесителя (полезного сигнала и напряжения гетеродина) в нагрузку; обеспечивается подавление побочных каналов преобразования, вызванных не только четными гармониками частоты сигнала, но и четными гармониками частоты гетеродина;

# Показатели показатели балансного и кольцевого диодных преобразователей частоты

| Параметр | Балансный ПЧ | Кольцевой ПЧ |
|---|---|---|
| Вносимые затухания, дБ | 10 … 13 | 5 … 8 |
| Развязка цепей гетеродина и ПЧ, дБ | 20 | 40 |
| Развязка цепей сигнала и гетеродина, дБ | 20 | 30 |
| Развязка цепей сигнала и ПЧ, дБ | 6 | 25 |
| Динамиический диапазон, отн. ед. | 1 | 2 |
| Уровень высших гармоник, отн. ед. | 1 | 0,5 |
| Подавление шумов гетеродина, дБ | 20 … 30 | 30 … 50 |

# Смеситель SPM02 «Спектран» (Саратов)





Диапазон частот RF/LO 0.3 – 4 ГГц
Диапазон частот IF DC – 0.95 ГГц
Потери преобразования, не более
LO = 5 dBm => 9.1 дБ
LO = 10 dBm => 8.5 дБ
Развязка LO/RF, не менее
LO = 5 dBm => 25 дБ
LO = 10 dBm => 29 дБ
Входная мощность RF, не более 50 мВт

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 рассеяния методом разделения волн

**Санкт-Петербург**
**2025 г.**

# Физический смысл матрицы рассеяния – основа метода разделения волн

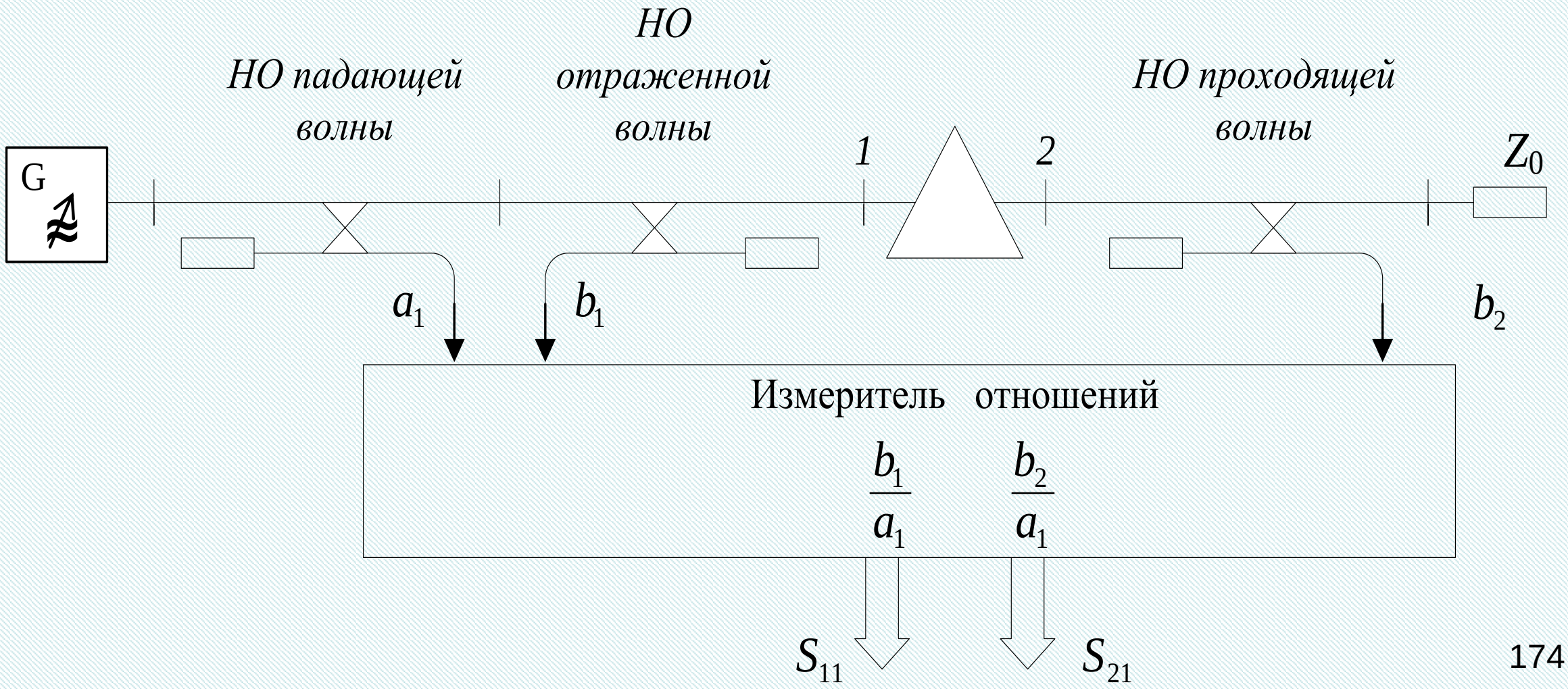
Для двухпортового узла:

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}$$

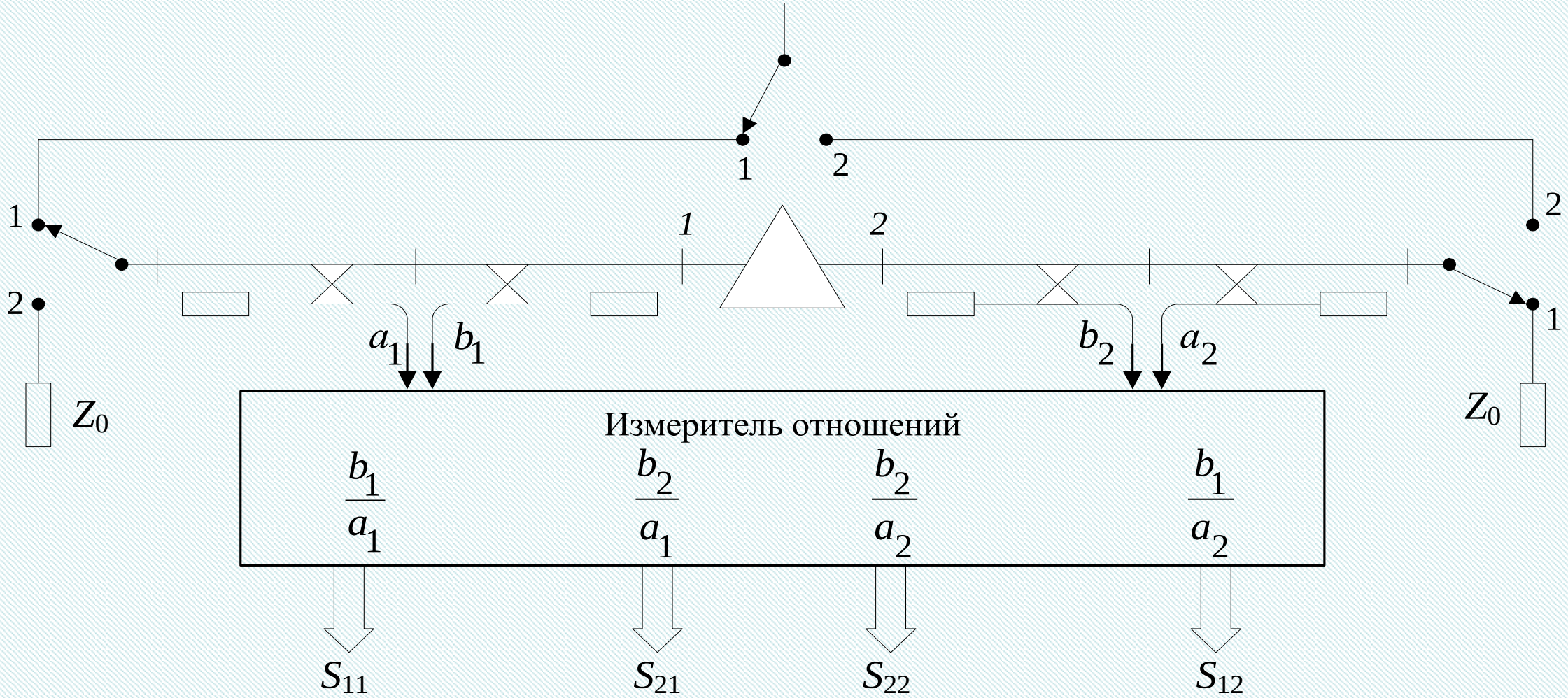
$$S_{11} = \left.\frac{b_1}{a_1}\right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left.\frac{b_2}{a_2}\right|_{a_1=0} \quad S_{21} = \left.\frac{b_2}{a_1}\right|_{a_2=0} \quad S_{12} = \left.\frac{b_1}{a_2}\right|_{a_1=0}$$

***Метод измерения*** цы рассеяния (метод «разделения волн»): подаем падающую волну известной амплитуды в один (активный) порт и определяем комплексные амплитуды отраженных (рассеянных) волн во всех пассивных портах. Требуется обеспечить *нулевые* падающие волны на всех портах, кроме активного (согласование **всех** портов, включая генератор).

# СВЧ тракт измерителя коэффициентов отражения/передачи (R/T)

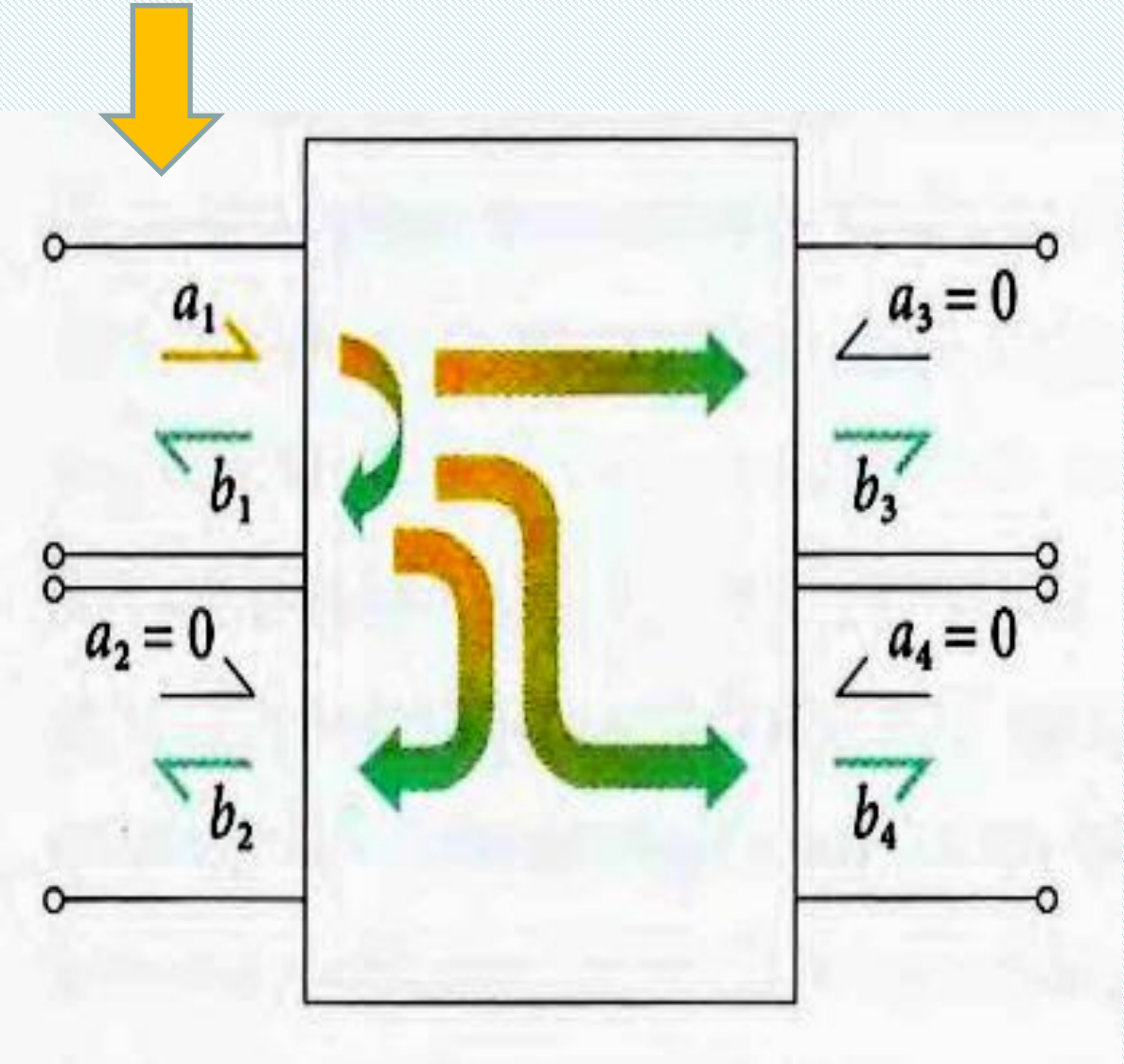


# Измерительный тракт автоматизированного анализатора цепей СВЧ (ANA)



# Режимы измерения автоматизированного анализатора

Текущий активный порт

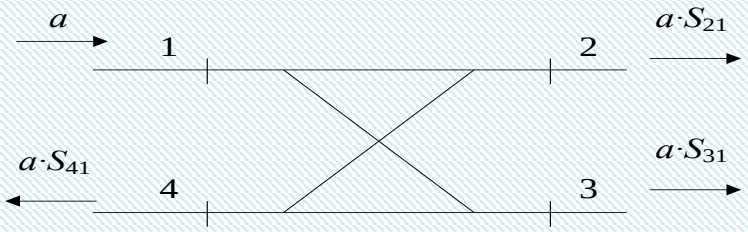



**Два режима коммутации портов:**

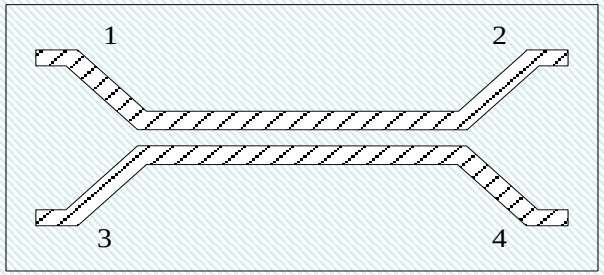
- режим **чередования (**alternating mode) –измерение элементов матрицы с выбранным активным портом во **всем** частотном диапазоне;
- режим **прерывания** (chopping mode) – измерение **всей** матрицы в каждой частотной точке

*Твердотельные* переключатели имеют неограниченное время работы, но выше, чем у механических, потери. *Механические* переключатели имеют низкие потери и более высокие мощности сигналов. Количество переключений ограничено (порядка 5 миллионов циклов). Используются в режиме чередования.

# Направленные ответвители, применяемые в измерителях параметров рассеяния



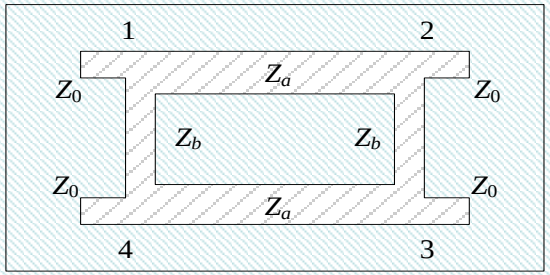

$$[S]=\begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{42} & S_{43} & 0 \end{bmatrix}$$




а)

Переходное ослабление $C = A_{31} = -20\lg(|S_{31}|) = -10\lg(\frac{P_3}{P_1})$ , дБ

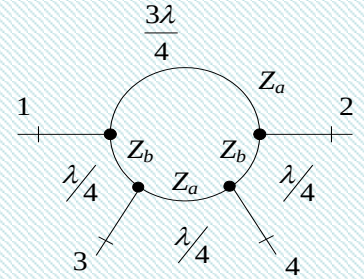
Рабочее затухание $A = A_{21} = -20\lg(|S_{21}|) = -10\lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$ , дБ




б)

Развязка $A_{41} = -20\lg(|S_{41}|) = -10\lg\left(\frac{P_4}{P_1}\right)$ , дБ

Направленность $D = -20\lg(|S_{43}|) = -10\lg(\frac{P_4}{P_3})$ , дБ




в)

# Трансформаторный рефлектометр (частотный диапазон 40 кГц …4 ГГц)



# Широкополосный волноводный многощелевой направленный ответвитель

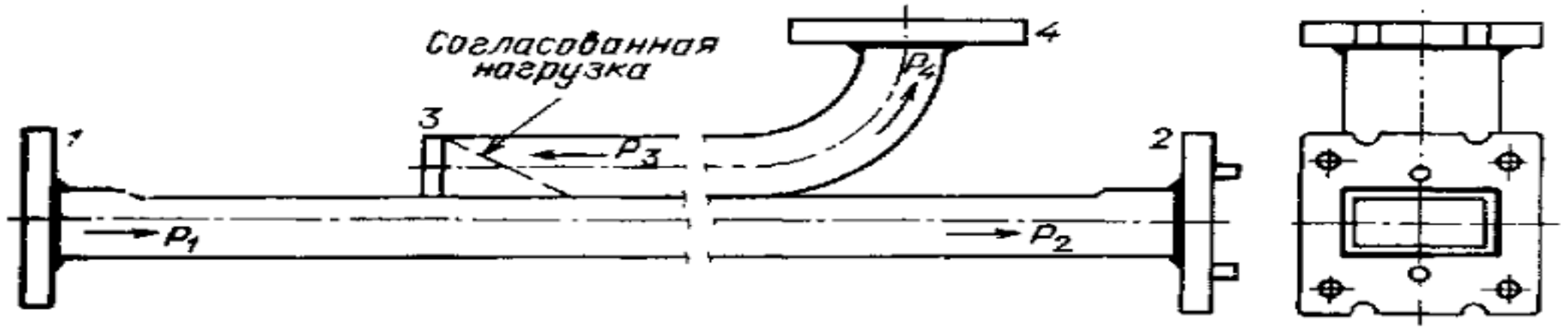
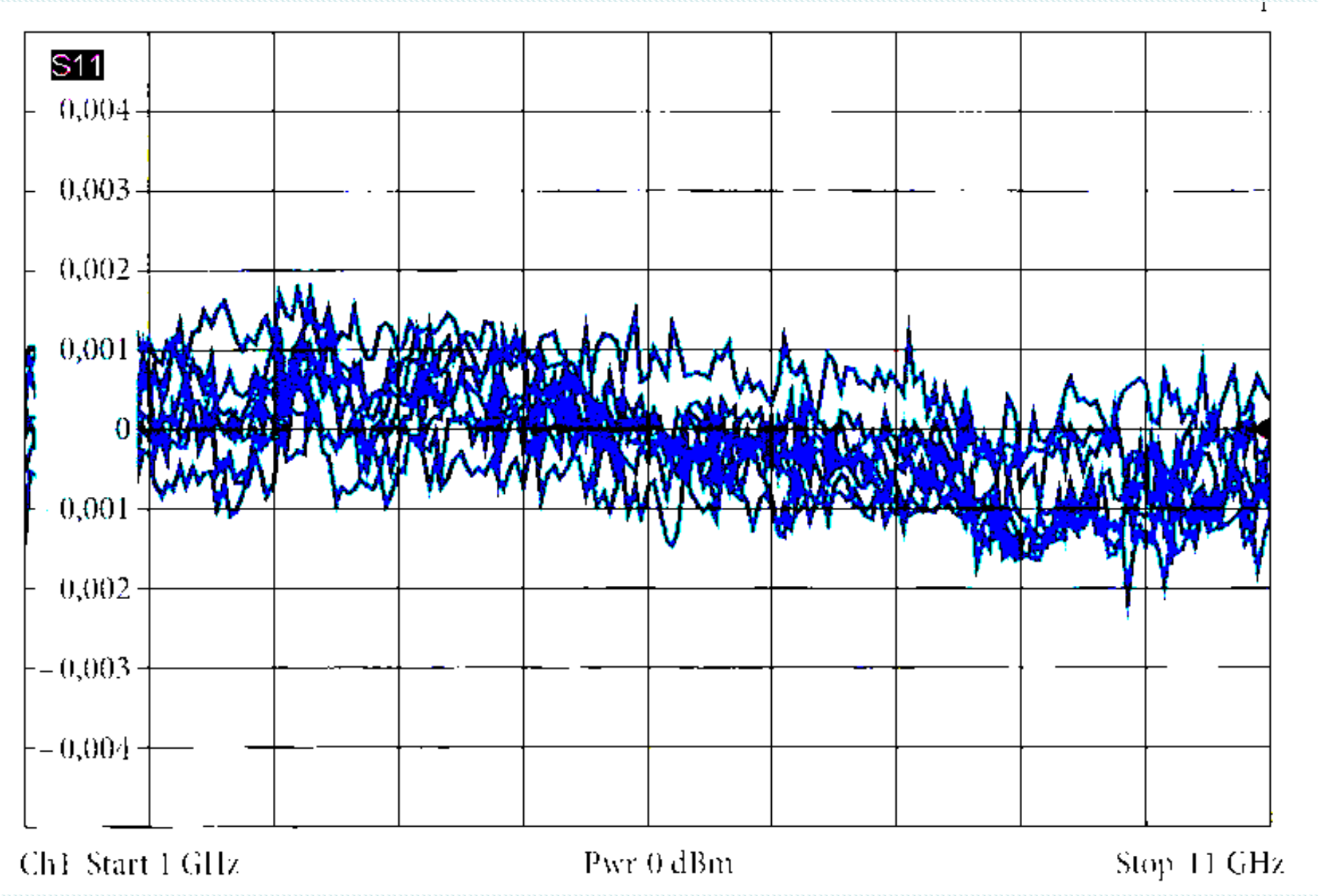



Рис. 7. Многоэлементный направленный ответвитель

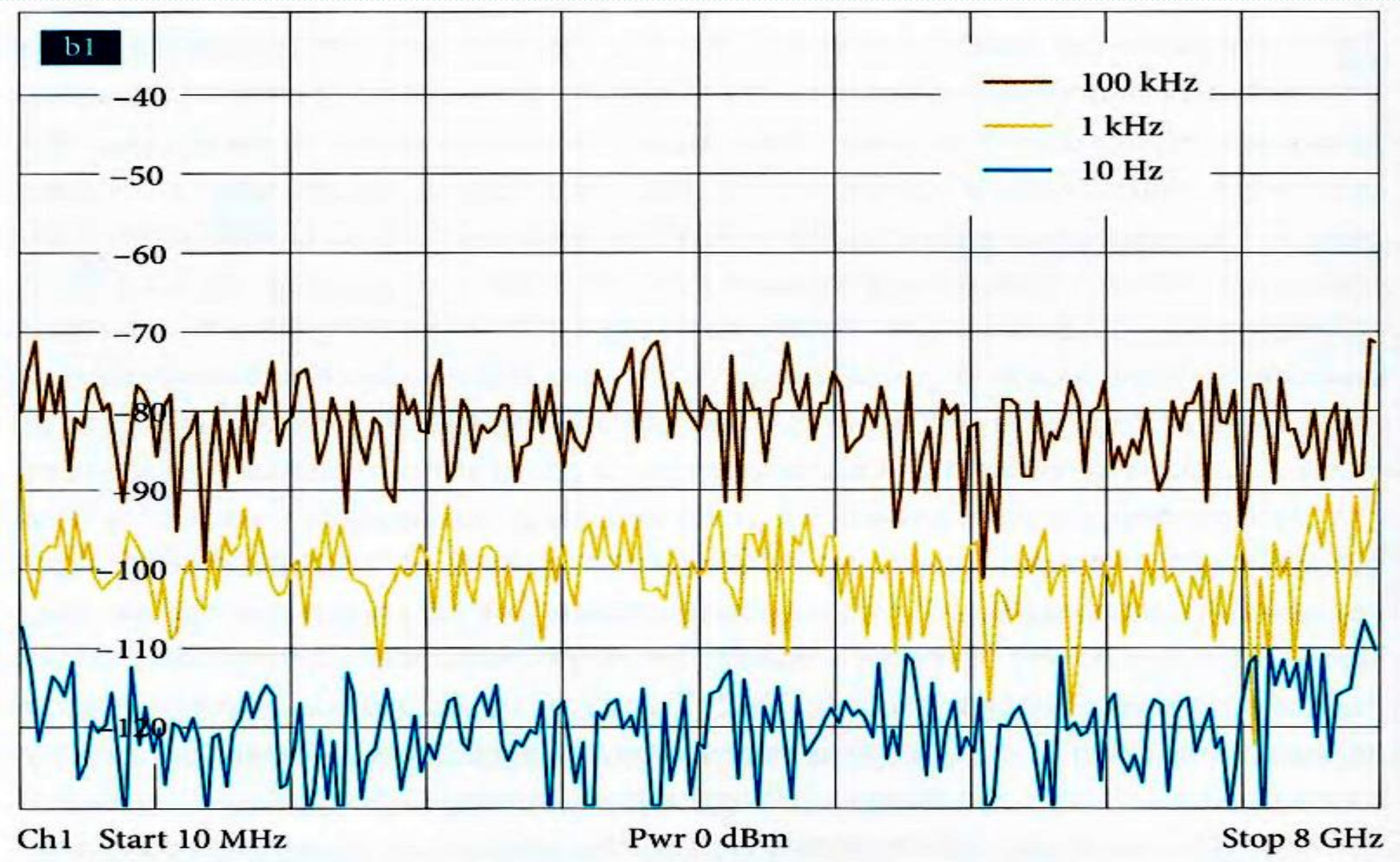



Погрешности анализаторов цепей СВЧ
Систематические
Случайные
Дрейф параметров
Конечная направленность НО
Рассогласование НО
Частотная зависимость параметров НО
Перекрестные связи между НО
Внутренние шумы
Неповторяемость параметров соединителей
Нестабильность частоты генератора
Температурная зависимость параметров тракта
Старение элементов тракта

# Влияние неповторяемости соединителя SMA на результаты измерения КЗ нагрузки



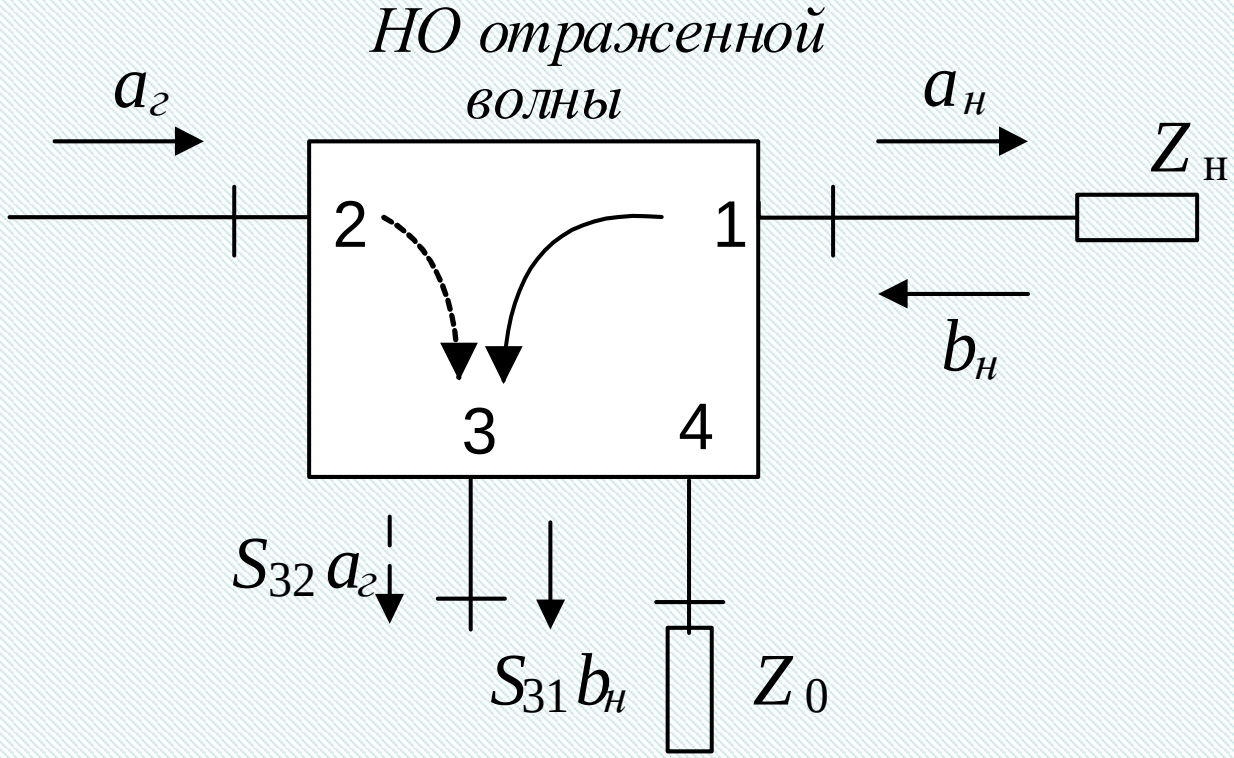
# Влияние шумов приемного тракта при разной полосе пропускания ПЧ



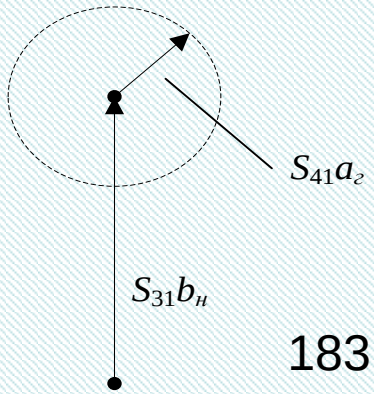
# 1. Погрешность из-за неидеальной направленности НО отраженной волны (Directivity error)

В плечо 3 поступает часть отраженной волны **S31b$_н$**. *З*а счет неидеальной развязки туда же попадает часть волны генератора **$S_{32}$ $a_г$** (паразитная волна).

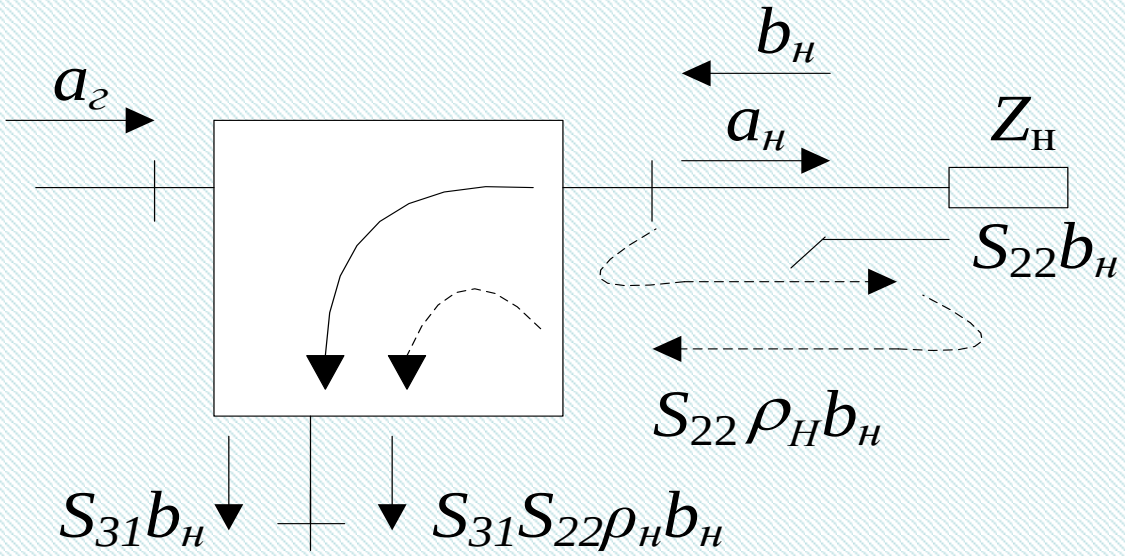
ПРИМЕР: При развязке НО =35 дБ амплитуда паразитной волны равна 1,78% амплитуды падающей волны.




Для коэффициента отражения |ρ|=0.1 , КСВН=1,22 (хорошая нагрузка!!!) соотношение амплитуд отраженной и паразитной волн примерно 15 дБ, что дает вариации измеренного модуля отражения от 18,58 дБ до 21,7 дБ (погрешность в пределах 18%).



# 2. Рассогласование рабочего плеча ответвителя (Source/ Load Mismatch)



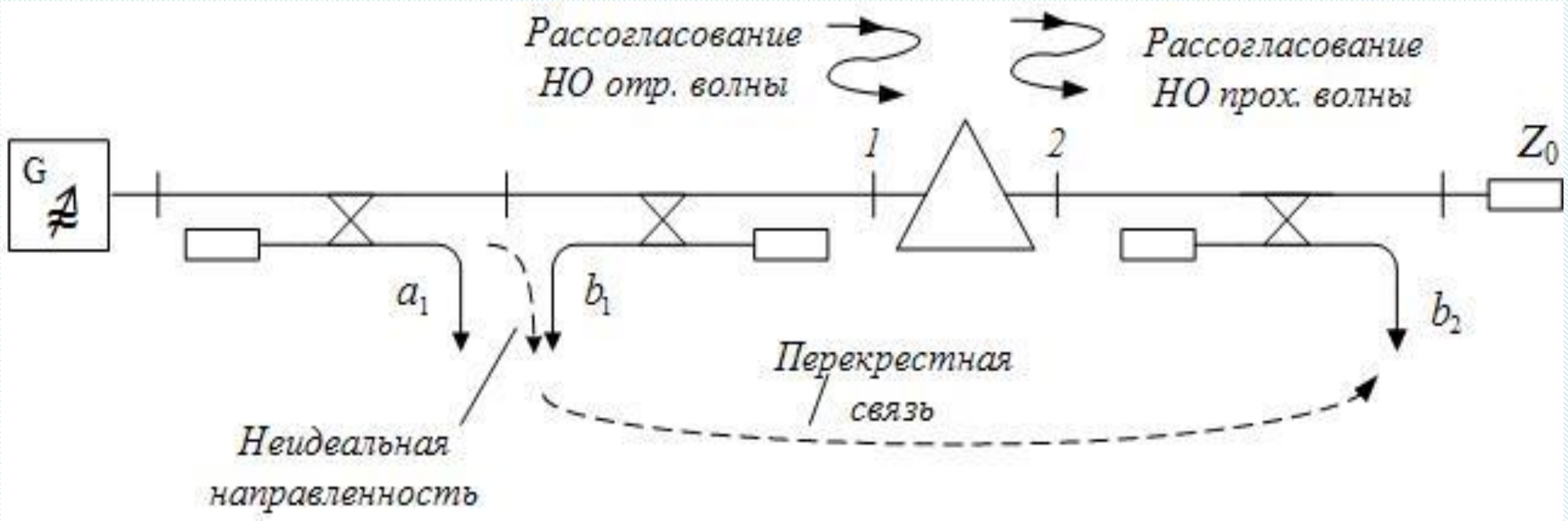

Отражения от рабочего плеча НО вызывает переотражения волн между НО и исследуемой нагрузкой. Приближенно можно считать, что в измерительное плечо поступает две интерферирующие волны – одна полезная , а вторая – переотраженная. При полном отражении (|ρн|=1) и КСВН НО =1.25 суммарный сигнал может варьироваться в пределах от -0,92 дБ до 1,03 дБ.

Еще две причины погрешностей :

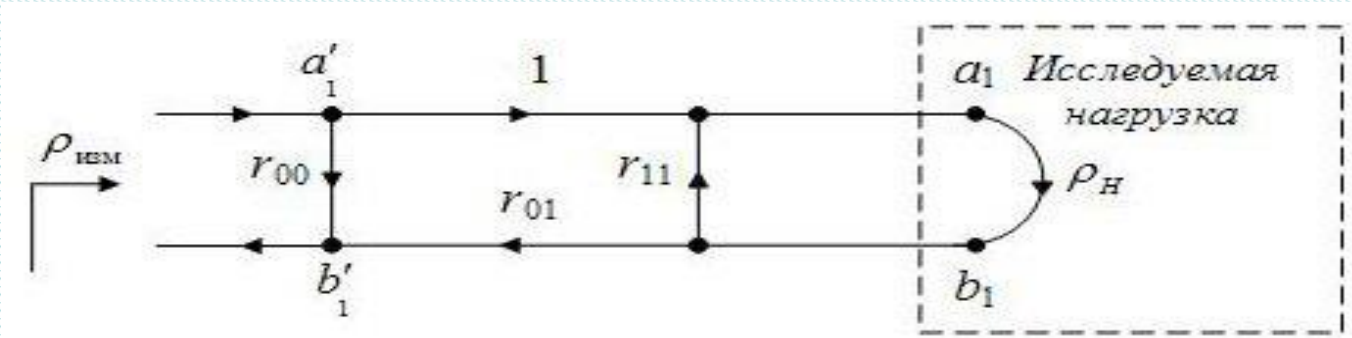
3. *Различие АЧХ и ФЧХ* НО падающей и отраженной/проходящей волн;

4. *Перекрестная связь* НО отраженной и проходящей волн.

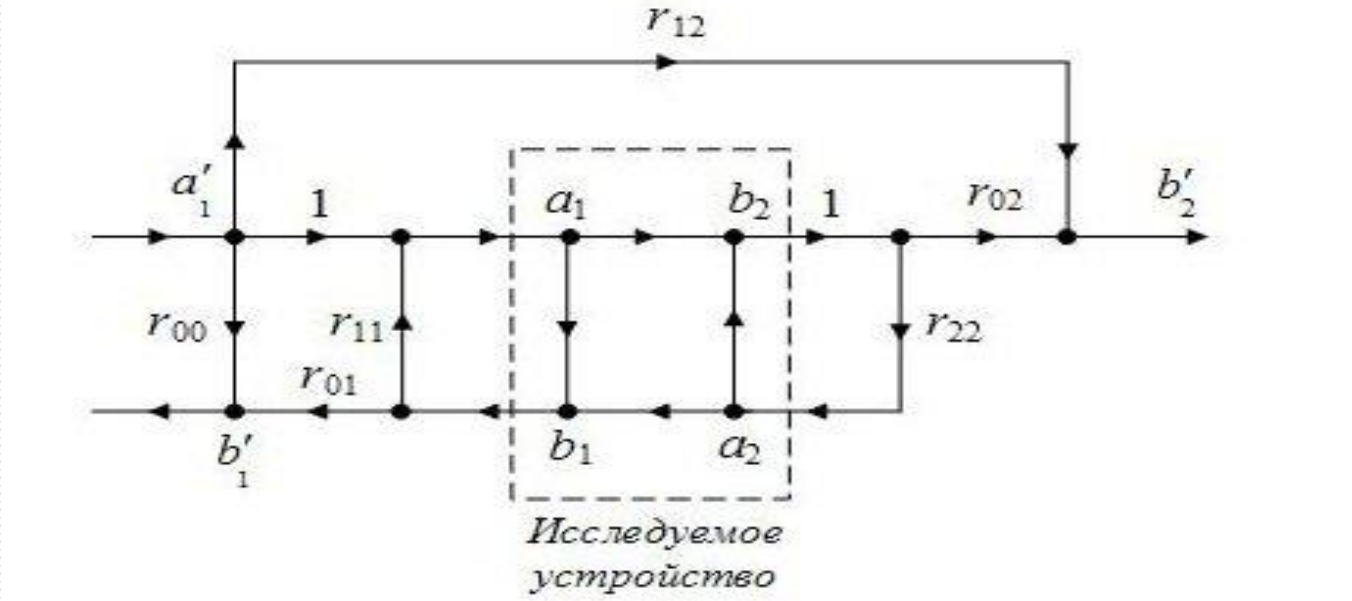
# Основные систематические погрешности анализатора цепей СВЧ



# *Направленные графы погрешностей*




Направленный граф погрешностей рефлектометра: $r_{00}$ – неидеальная развязка НО отраженной волны; $r_{11}$ – рассогласование выхода НО отраженной волны; $r_{01}$ - частотные отличия НО падающей и отраженной волн

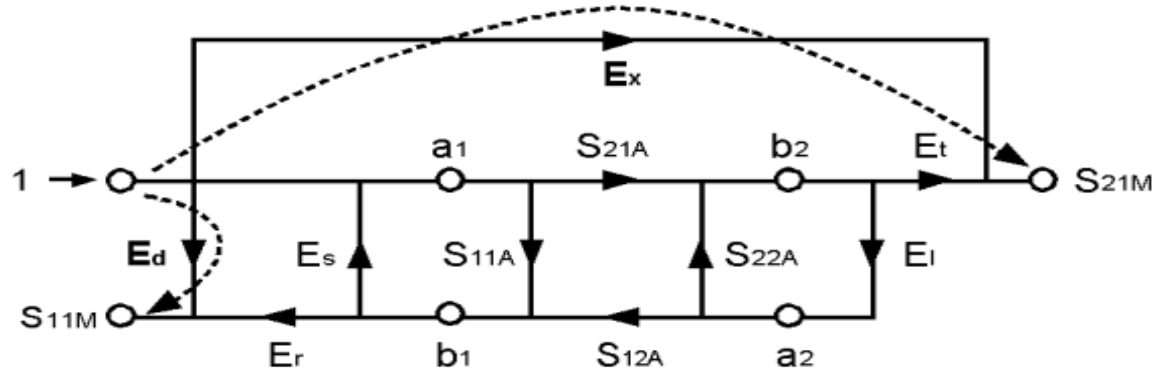



Направленный граф погрешностей измерения коэффициента передачи:

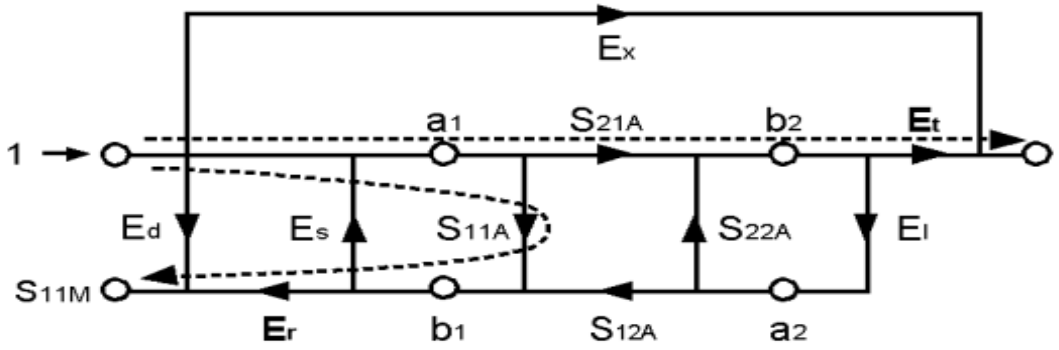
$r_{22}$ –расогласование входа НО проходящей волны;

$r_{02}$ - частотные отличия НО падающей и проходящей волн

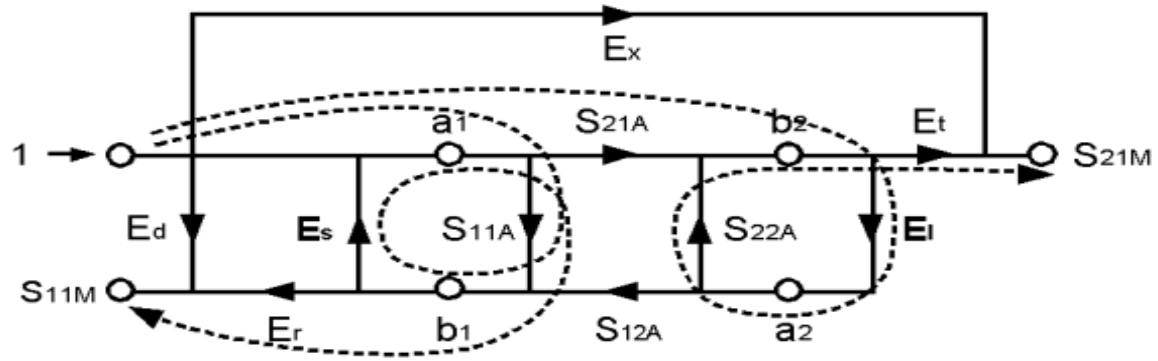
# Графы погрешностей (англоязычная терминология)




Isolation




Frequency Response



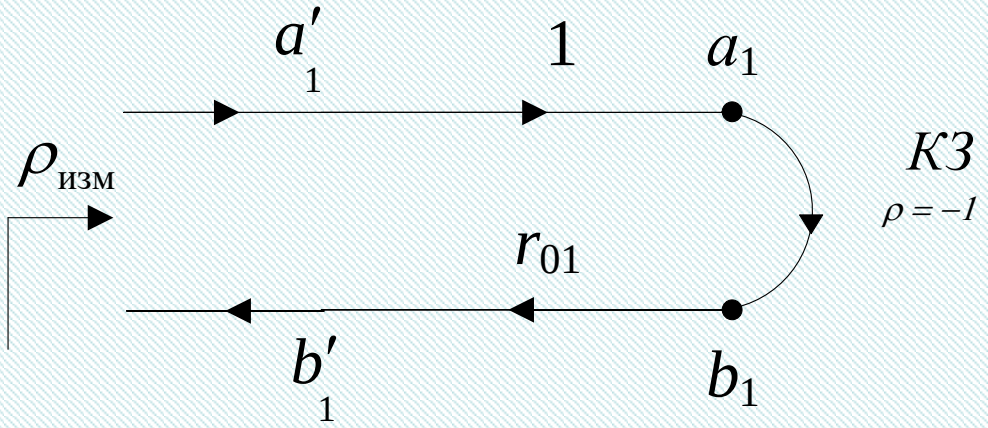

Reflection

Ed : Directivity
Es : Source match
Er : Reflection tracking
Et : Transmission tracking
Ex : Isolation (Crosstalk)
El : Load match

# Скалярная калибровка измерителей R/T

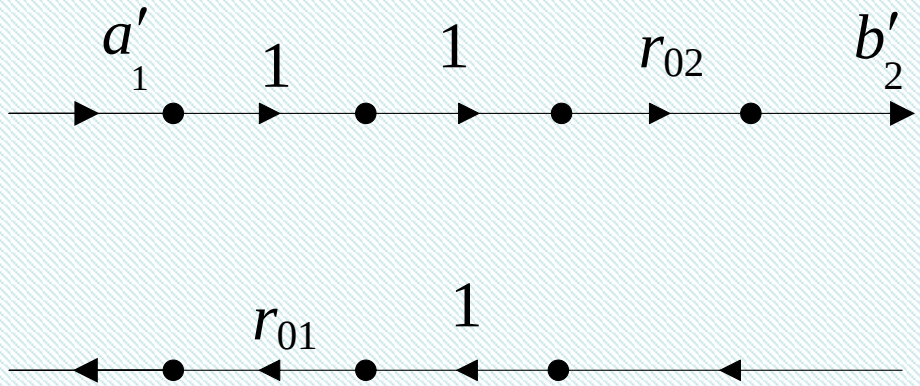
1. Однопортовая калибровка по уровню с КЗ (или ХХ) при r00=r11=0

$$|r_{01}| = \left|\frac{b_1'}{a_1'}\right|, \qquad |\rho_H| = \frac{|\rho_{изм}|}{|r_{01}|}$$

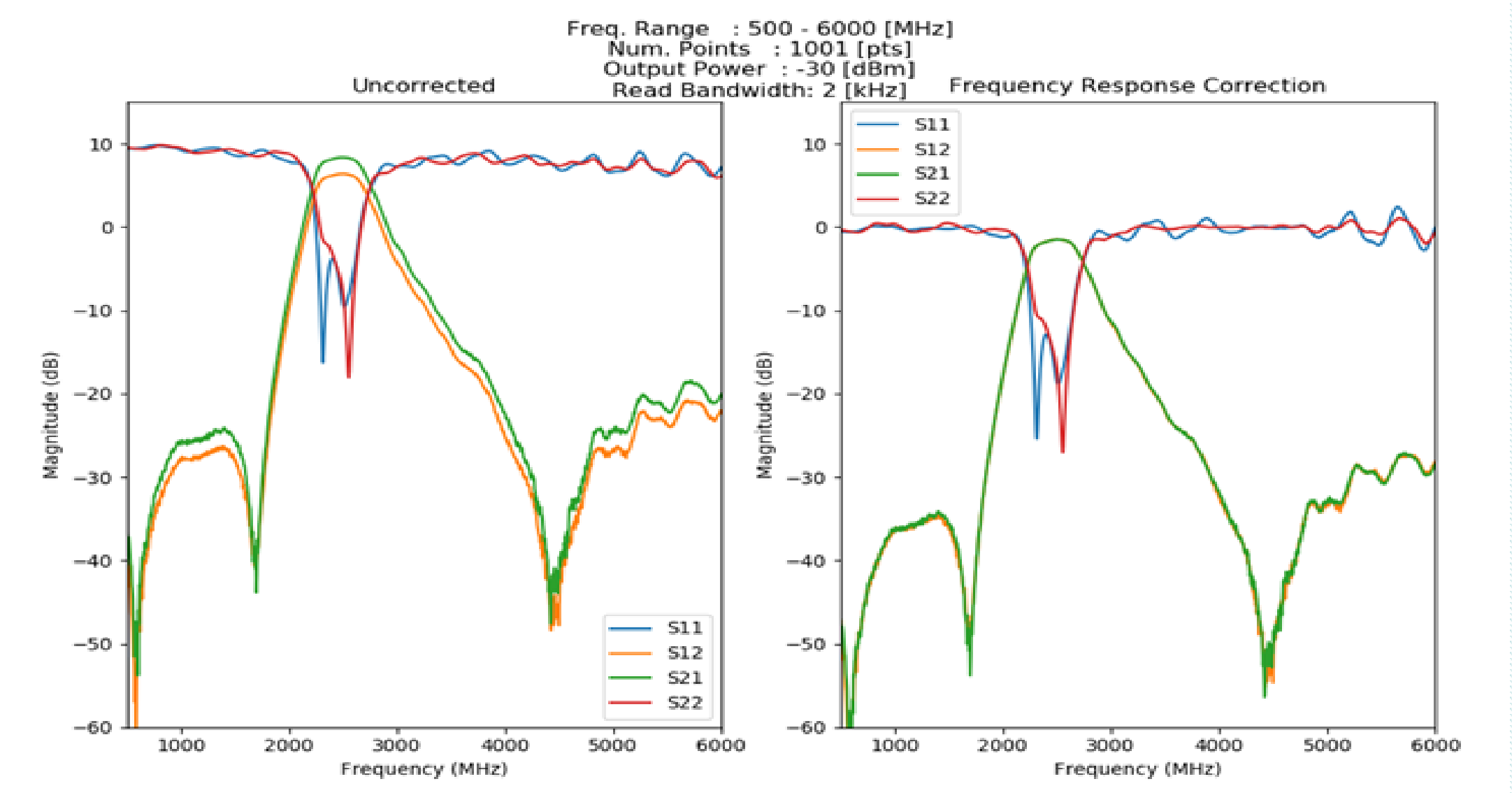



2. Калибровка передачи поуровню с перемычкой нулевой длины: r22=0

$$|r_{02}| = \left|\frac{b_2'}{a_1'}\right|, \qquad |\tau_{узла}| = \frac{|\tau_{изм}|}{|r_{02}|}$$



# Пример измерения АЧХ ППФ при калибровке по уровню



# Калибровка измерителей R/T по фазе (калибровка фазометров)

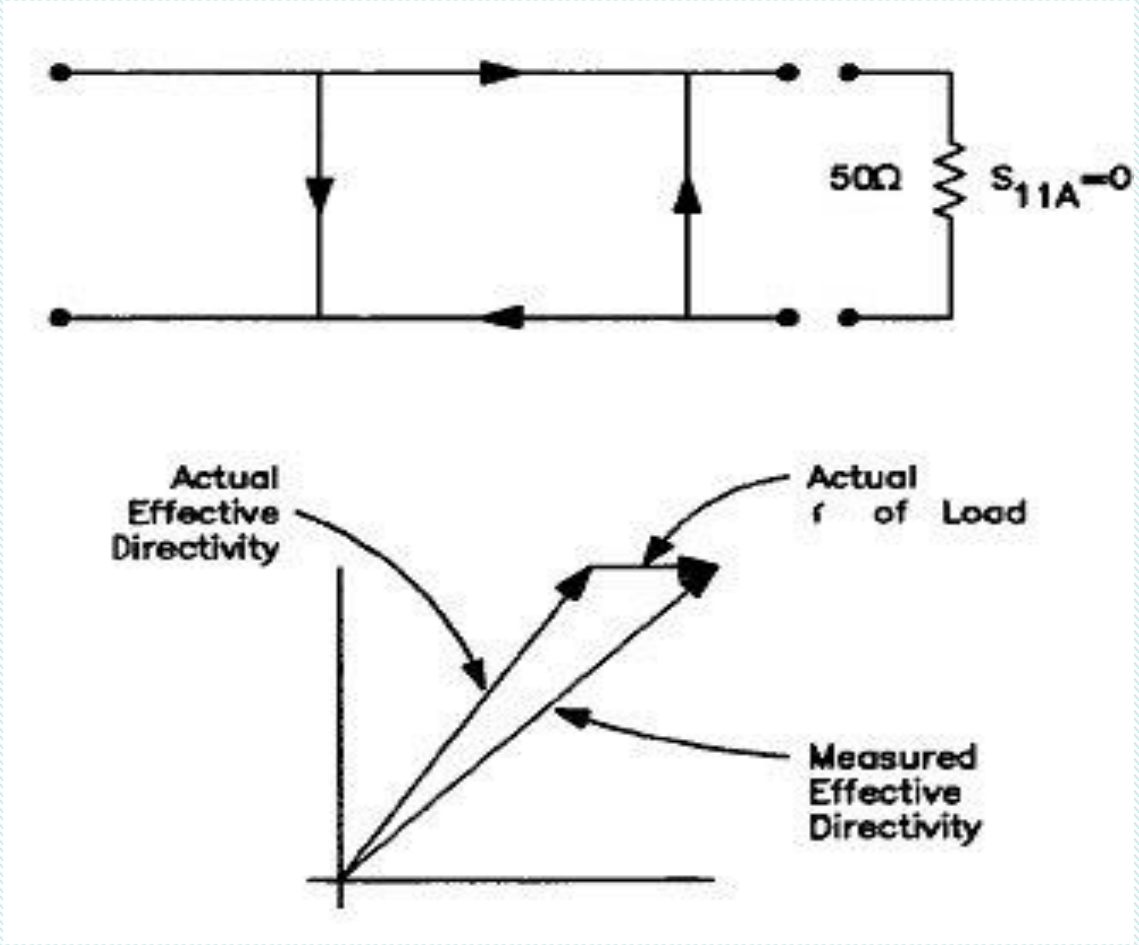
1. Однопортовая  калибровка отражения по фазе  при установке КЗ (фаза КЗ =180 градусов)

$$\angle r_{01} = \angle b_1^{'} - \angle a_1^{'} - 180^0, \qquad \angle \rho_H = \angle \rho_{изм} - \angle r_{01}$$

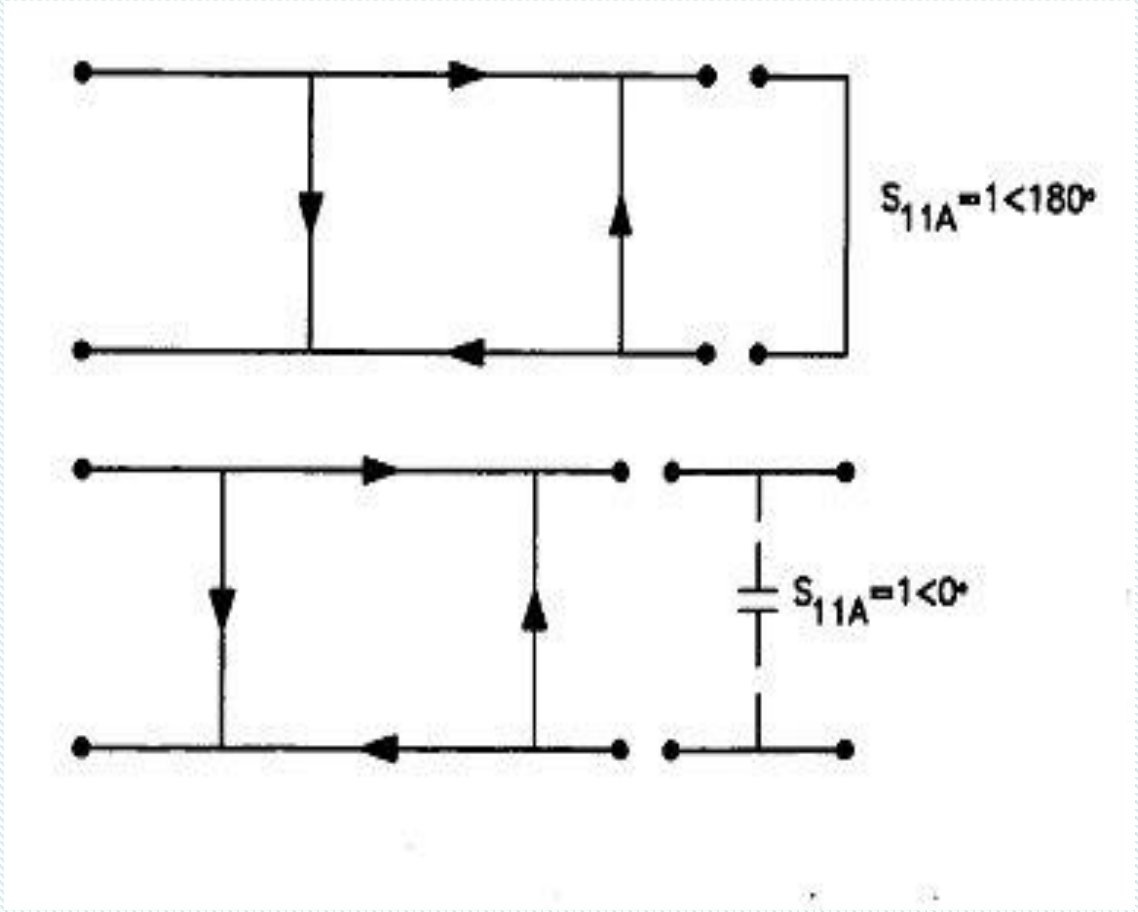
2. Калибровка нуля фазы коэффициента передачи по перемычке нулевой длины  (фаза коэффициента передачи = 0)

$$\angle r_{02} = \angle b_2^{'} - \angle a_2^{'}, \qquad \angle \tau_{узла} = \angle \tau_{изм} - \angle r_{02}$$

# **Векторная** калибровка анализатора цепей СВЧ (*однопортовая* калибровка рефлектометра **SOL**)

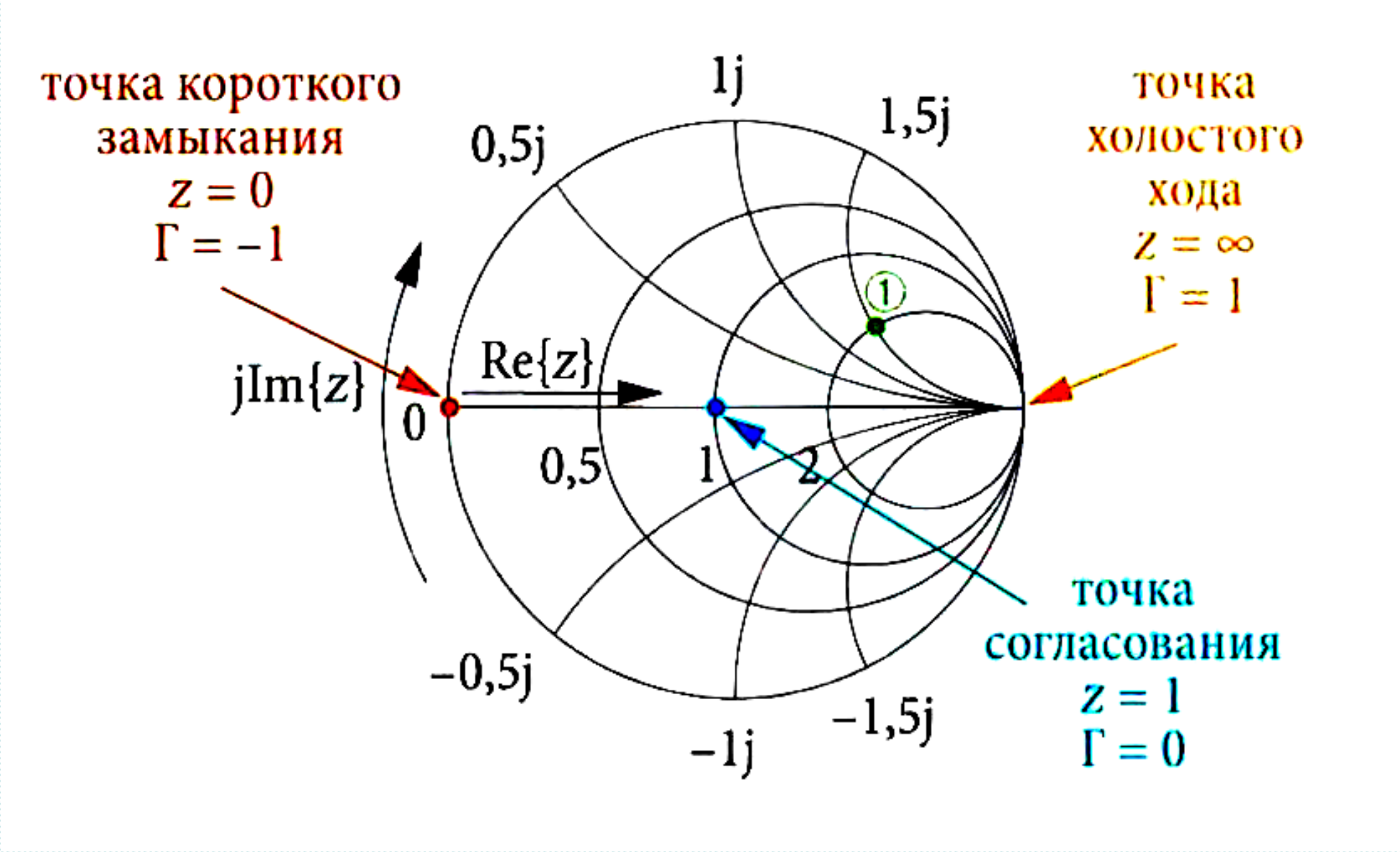



Калибровка по СН

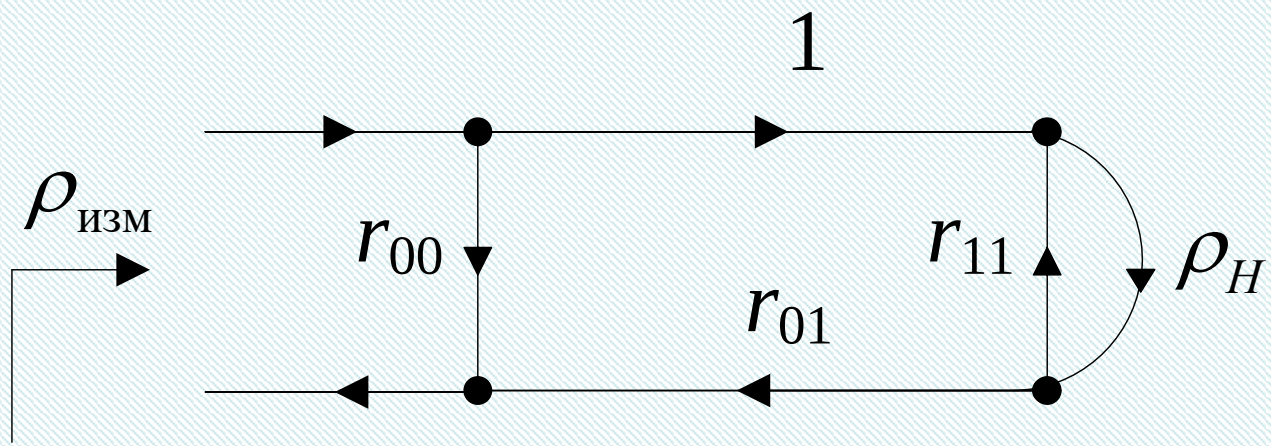



Калибровка по КЗ и ХХ

# Характерные точки однопортовой калибровки на диаграмме Смита



# Расчетные формулы для погрешностей рефлектометра




$$\rho_{изм}^{кал} = \{\rho_{XX}, \rho_{КЗ}, \rho_{СН}\}$$

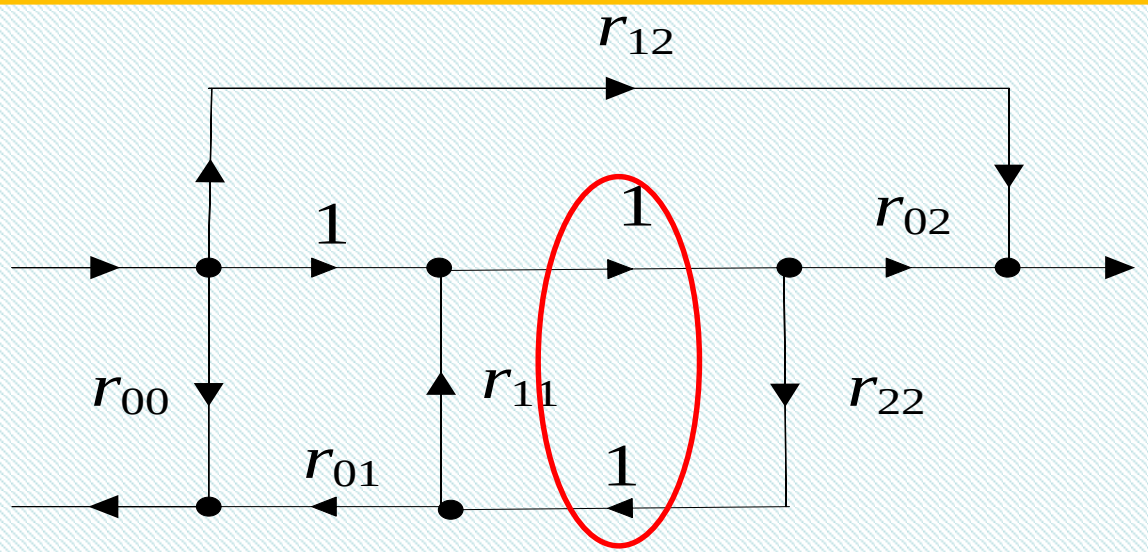
$$r_{00} = \rho_{СН}$$

$$r_{11} = \frac{(\rho_{XX} + \rho_{КЗ} - 2\rho_{СН})}{\rho_{XX} - \rho_{КЗ}},\ r_{01} = 2\frac{(\rho_{XX} - \rho_{СН})(\rho_{СН} - \rho_{КЗ})}{\rho_{XX} - \rho_{КЗ}}$$

$$\rho_H = \frac{(\rho_{изм} - r_{00})}{r_{11}(\rho_{изм} - r_{00}) + r_{01}}$$

Корректировка результата измерения

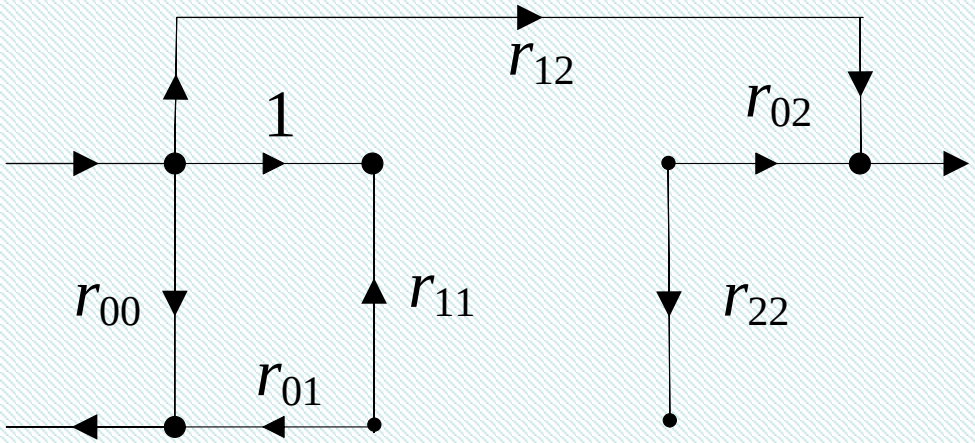
# Расчет погрешностей тракта передачи по данным двухпортовой SOLT калибровки




$$r_{02} = (\tau_{кал} - r_{12})(1 - r_{11} r_{22})$$

$$\rho_{кал} = S_{11изм}, \quad \tau_{кал} = S_{21изм}$$

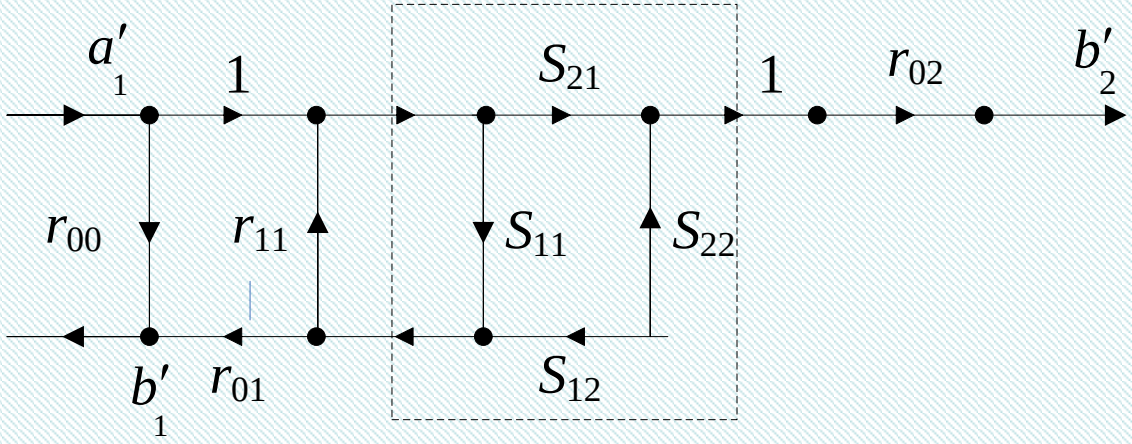
$$r_{22} = \frac{(\rho_{кал} - r_{00})}{r_{01} + r_{11}(\rho_{кал} - r_{00})}$$




Калибровка изоляции портов (опционально)

$$r_{12} = S_{21изм}$$

# Упрощенные формулы для корректировки результатов измерения S11 и S21 исследуемого устройства в векторном анализаторе R/T



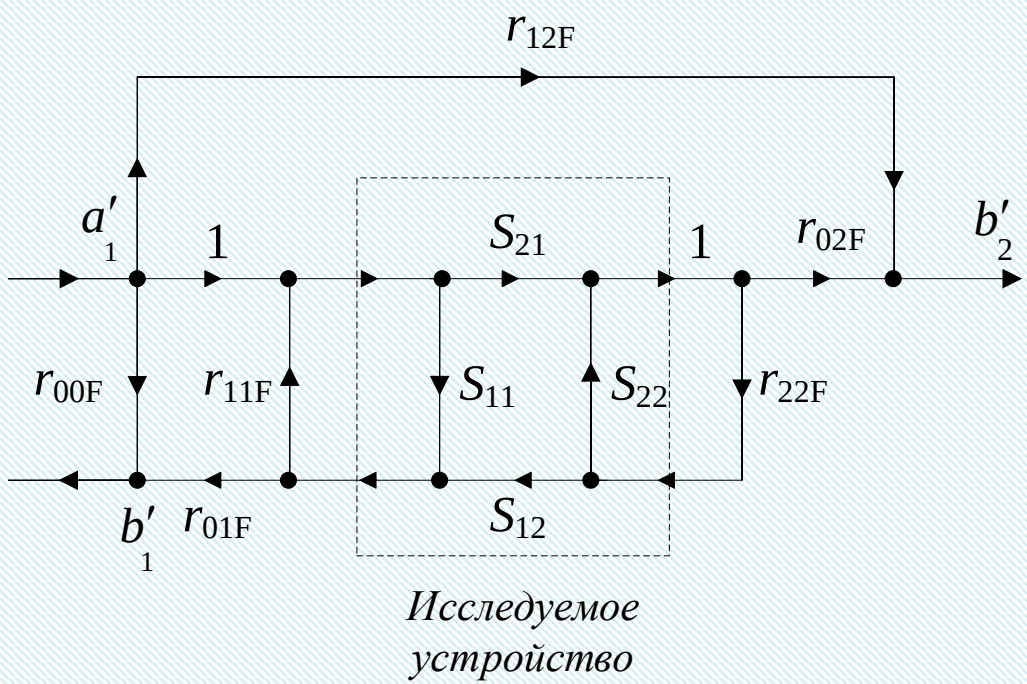

*Исследуемое устройство*

Измерение S11 и S21 делаем в прямом прохождении сигнала от порта 1 в порт 2. Пренебрегаем погрешностями *r22 и r12* и измеряем коэффициенты отражения и передачи. Для S22 и S12 меняем местами порты устройства

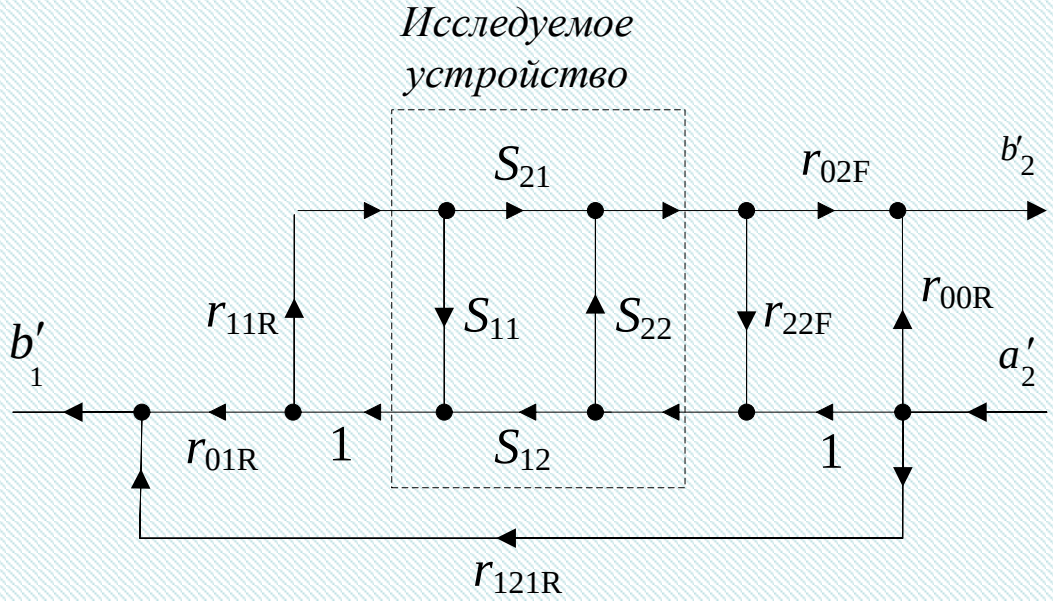
$$\rho_{изм} = \frac{b_1'}{a_1'} = r_{00} + \frac{S_{11} r_{01}}{1 - S_{11} r_{11}}, \quad \tau_{изм} = \frac{b_2'}{a_1'} = \frac{S_{21} r_{02}}{1 - S_{11} r_{11}}$$

$$S_{11} = \frac{\rho_{изм} - r_{00}}{r_{01} + r_{11}\left(\rho_{изм} - r_{00}\right)}, \quad S_{21} = \frac{\tau_{изм}\left(1 - S_{11} r_{11}\right)}{r_{02}}$$

# Полная 12-элементная модель погрешностей автоматизированного анализатора цепей СВЧ с коммутацией портов




а)




б)

Сигнальный граф погрешностей при измерении:
а) в прямом направлении (F); б) – в обратном направлении (R)

# Измерения матрицы рассеяния исследуемого устройства при прямом (F) и обратном (R) направлении передачи

Опытные данные: коэффициенты отражения и передачи с измеряемым устройством

$$\rho_{изм}^{F},\ \tau_{изм}^{F},\ \rho_{изм}^{R},\ \tau_{изм}^{R}$$

Нормированные к-ты отражения и передачи:

$$\rho_N^F = \frac{\rho_{изм}^F - r_{00F}}{r_{01F}},\quad \tau_N^F = \frac{\tau_{изм}^F - r_{12F}}{r_{02F}},$$

$$\rho_N^R = \frac{\rho_{изм}^R - r_{00R}}{r_{01R}},\quad \tau_N^R = \frac{\tau_{изм}^R - r_{12R}}{r_{02R}}$$

# Расчетные формулы для измеренных параметров двухпортового СВЧ узла в прямом (F) и обратном (R) направлении передачи

$$\rho_N^F = \frac{S_{11}\left(1 - S_{22} r_{22F}\right) + S_{21} S_{12} r_{22F}}{D_F} \qquad \tau_N^F = \frac{S_{21}}{D_F}$$

$$D_F = 1 - S_{11} r_{11F} - S_{22} r_{22F} - r_{11F} S_{21} S_{12} r_{22F} + S_{11} r_{11F} S_{22} r_{22F}$$

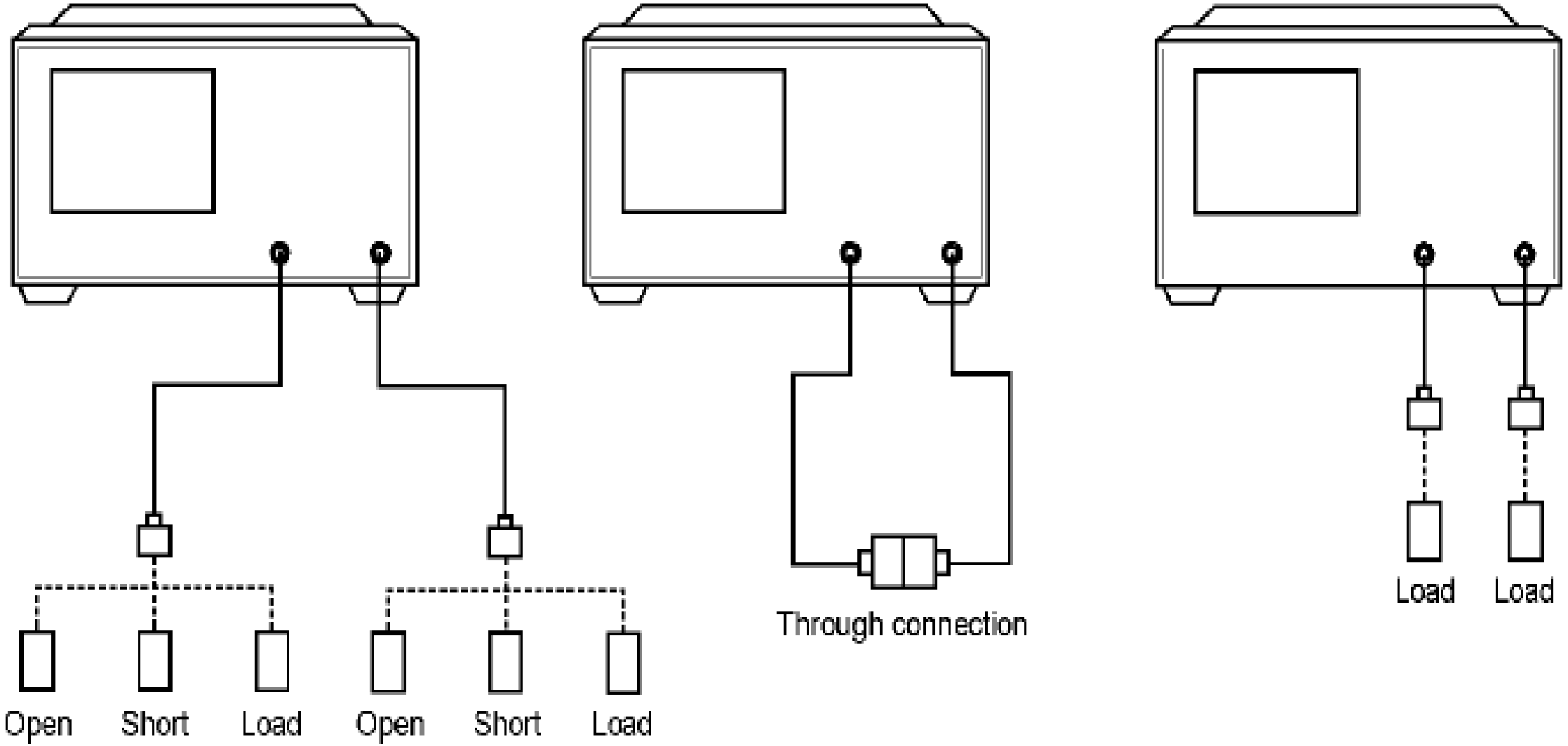
$$\rho_N^R = \frac{S_{22}\left(1 - S_{11} r_{22R}\right) + S_{21} S_{12} r_{22R}}{D_R} \qquad \tau_N^R = \frac{S_{12}}{D_R}$$

$$D_R = 1 - S_{22} r_{11R} - S_{11} r_{22R} - r_{11R} S_{21} S_{12} r_{22R} + S_{11} r_{11R} S_{22} r_{22R}$$

Решение уравнений относительно S11,S12,S21,S22 дает матрицу рассеяния узла

$$S_{11},\ S_{21},\ S_{12},\ S_{22}$$

# Подключения нагрузок для полной SOLT- калибровки



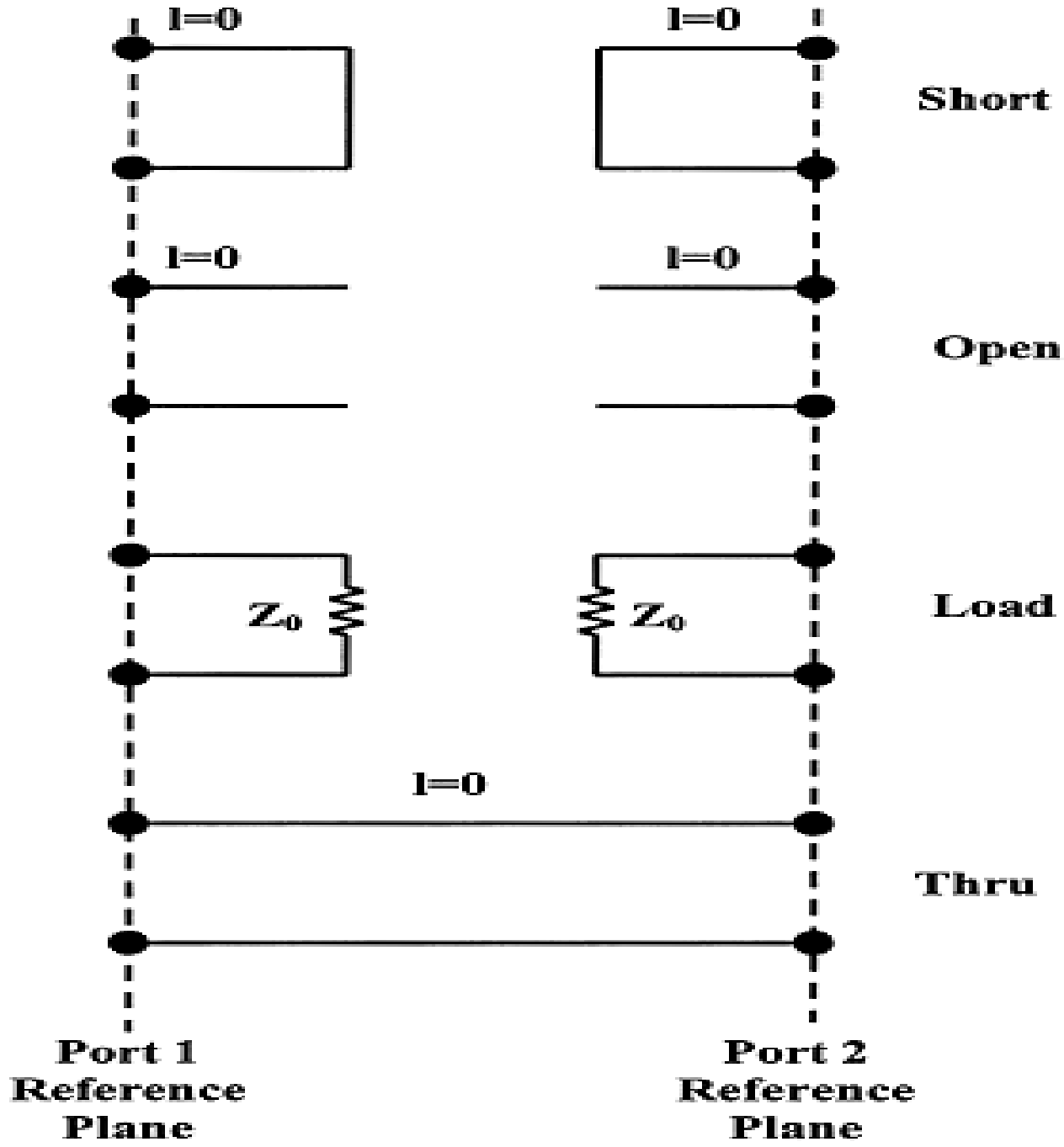
## Матрицы эталонных нагрузок для полной 12-элементной SOLT-калибровки

$$S = \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

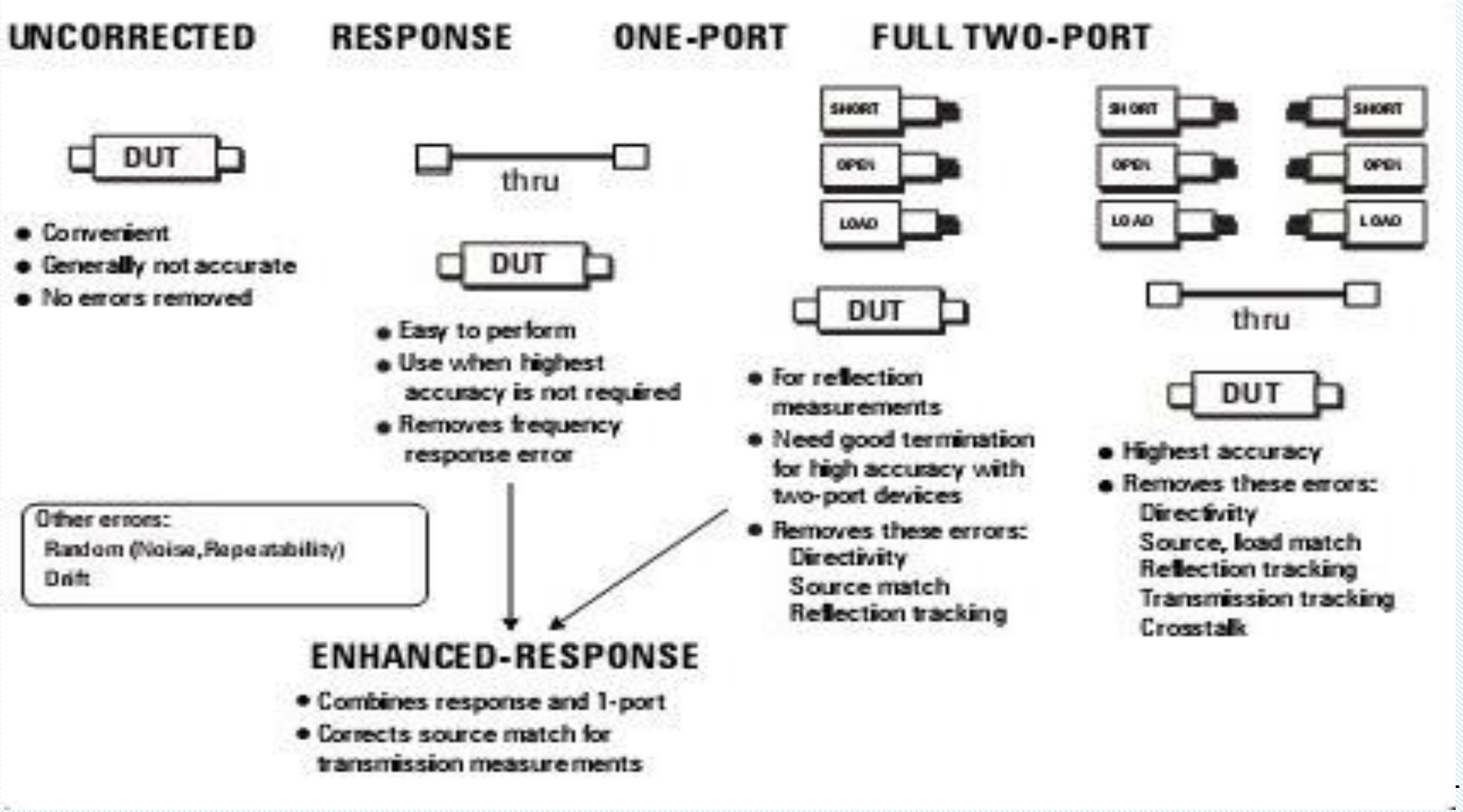
$$S = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$S = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

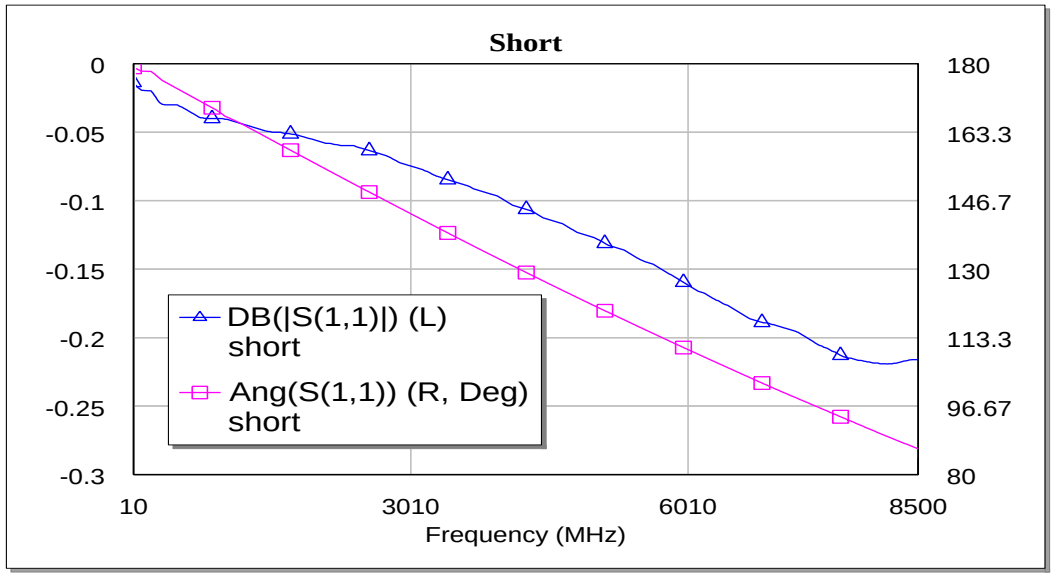
$$S = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

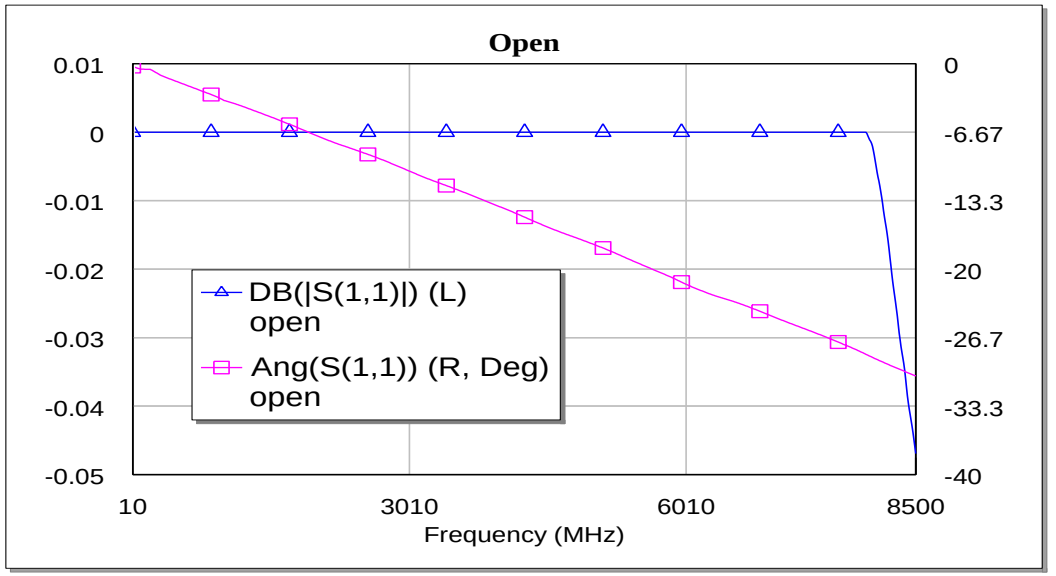


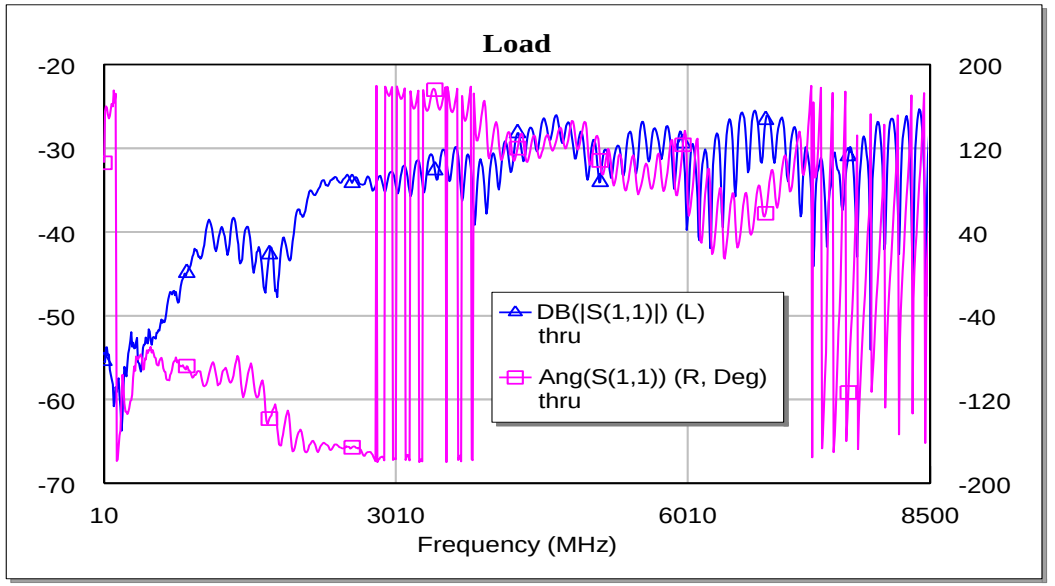
# Набор образцовых мер (Calibration Kit) для разных уровней калибровки

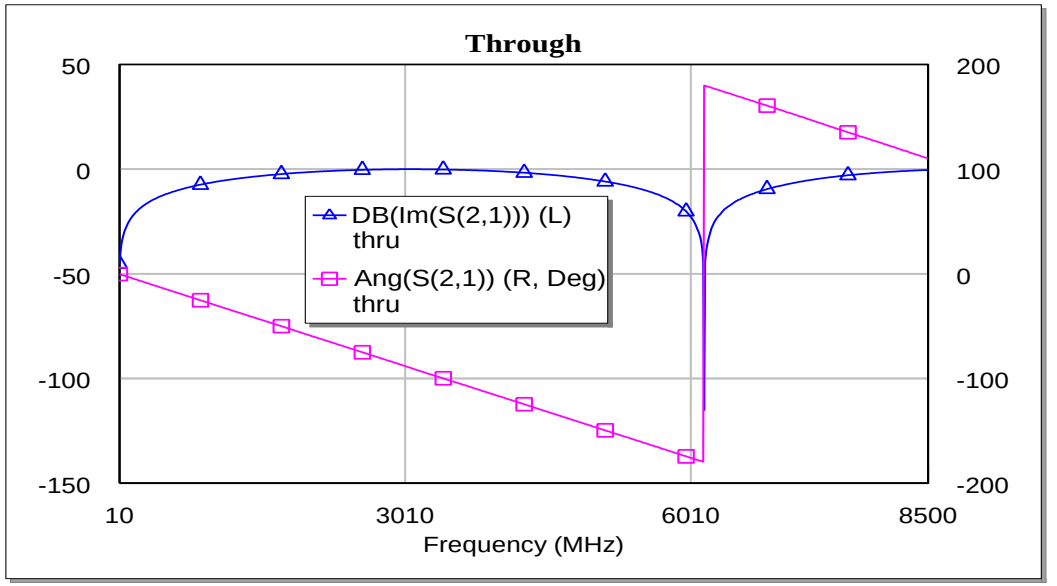


# Пример: данные образцовых мер (без калибровки)

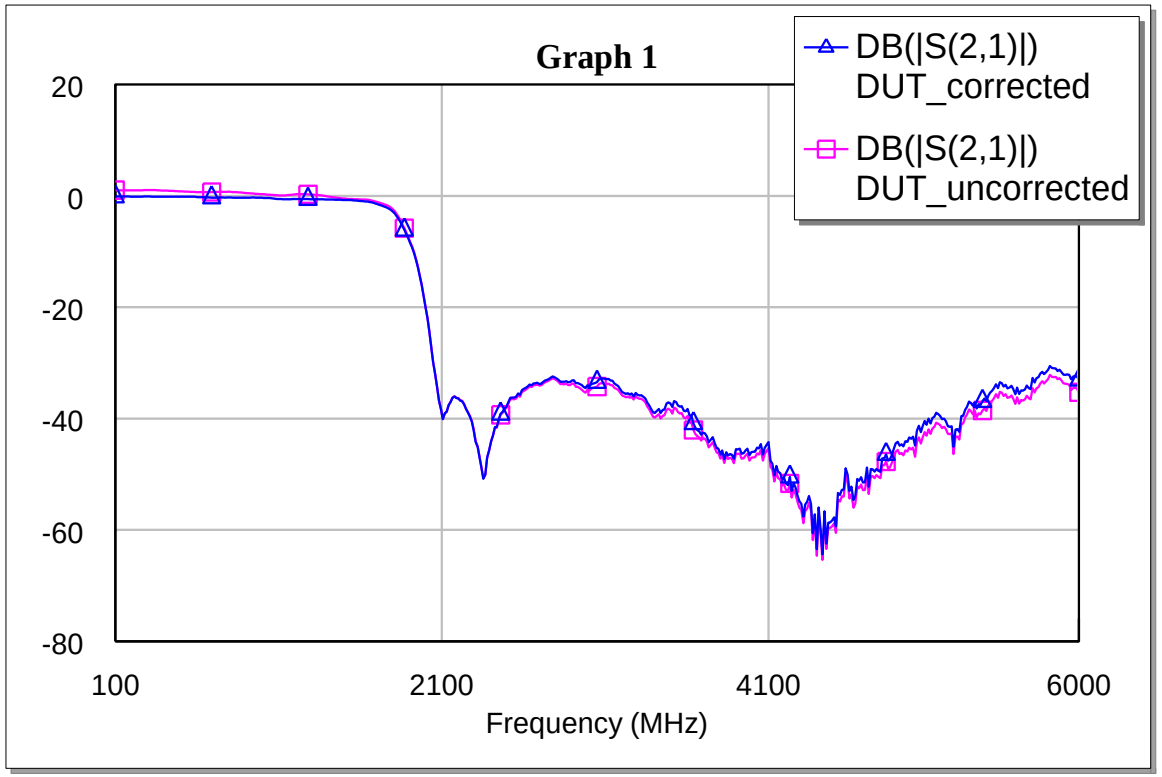


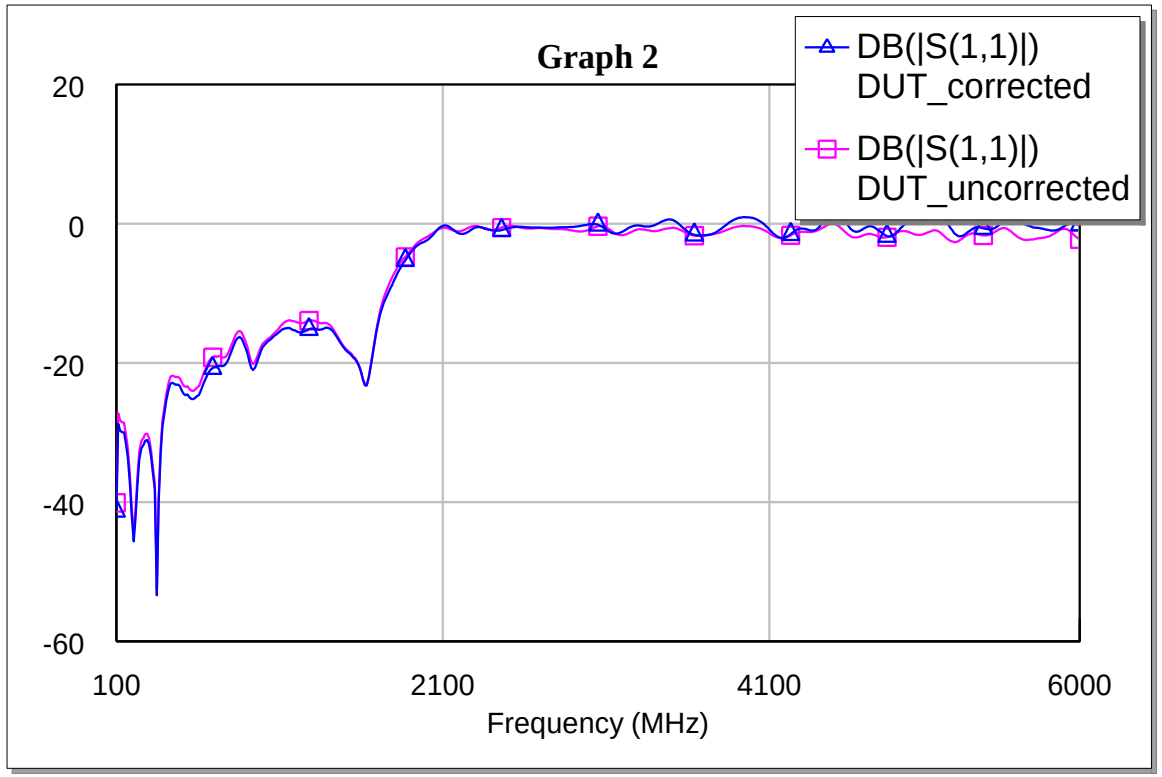



# Полная 12-элементная калибровка - сравнение с некалиброванным результатом (uncorrected) для ФНЧ

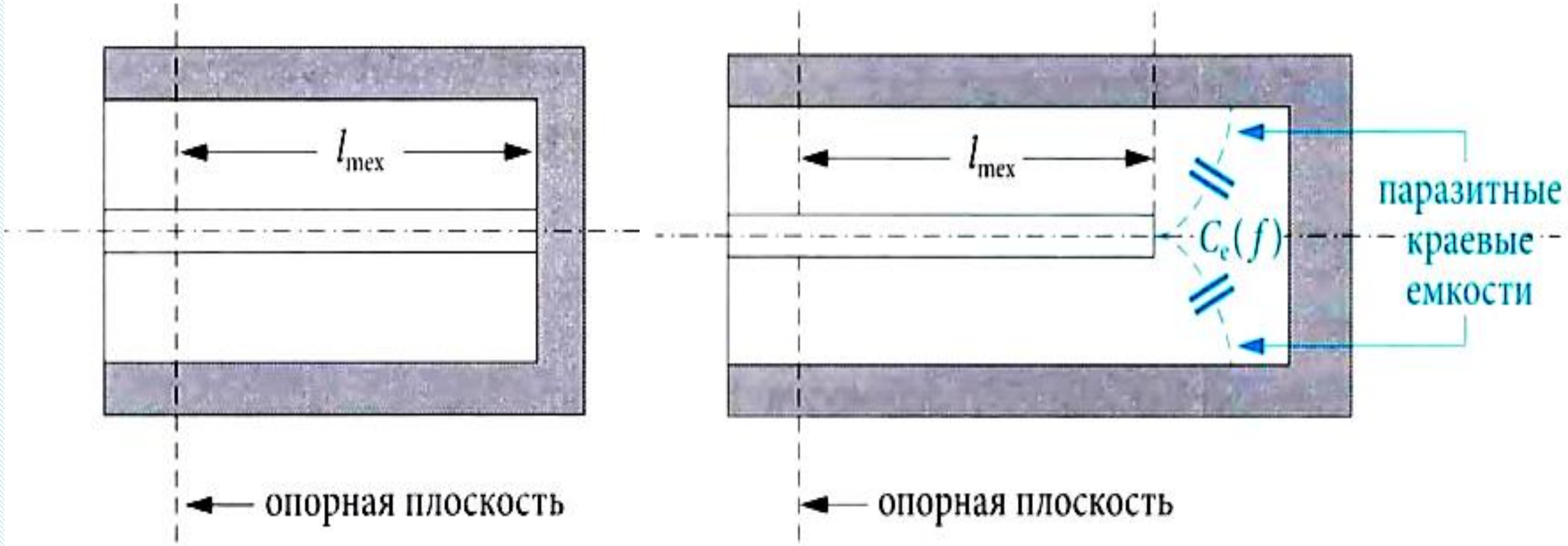


# Сравнение АЧХ ППФ: без калибровки, при калибровке только «на проход» (response) и при полной двухпортовой калибровке



# Коаксиальные конструкции эталонных нагрузок КЗ и ХХ



# Расположение отсчетных плоскостей в стандартных разъемах




***Рис. 3.2.3***
*Расположение опорной плоскости в разъеме N-типа.*

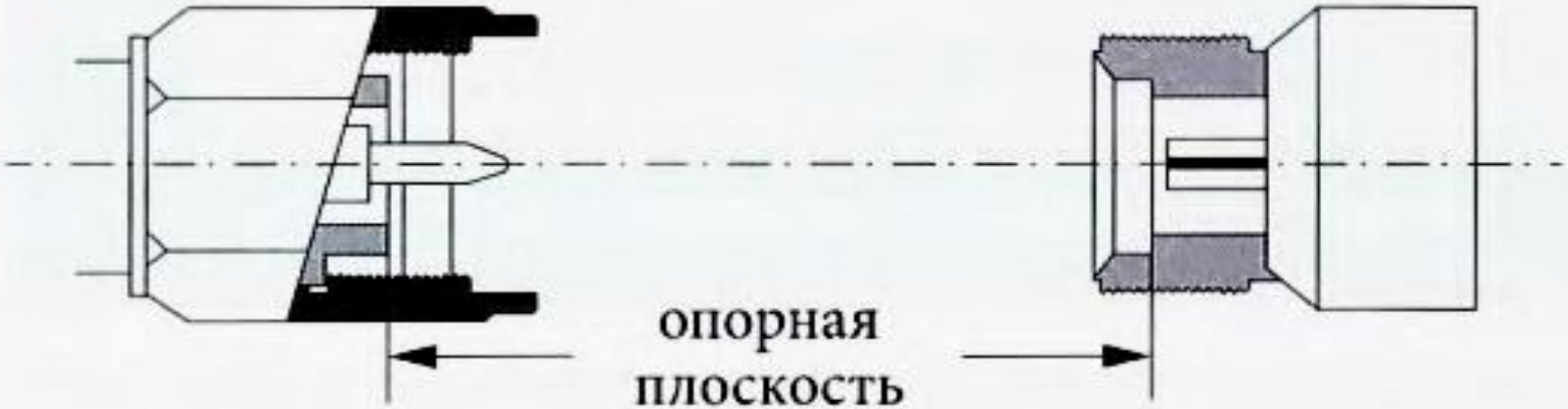
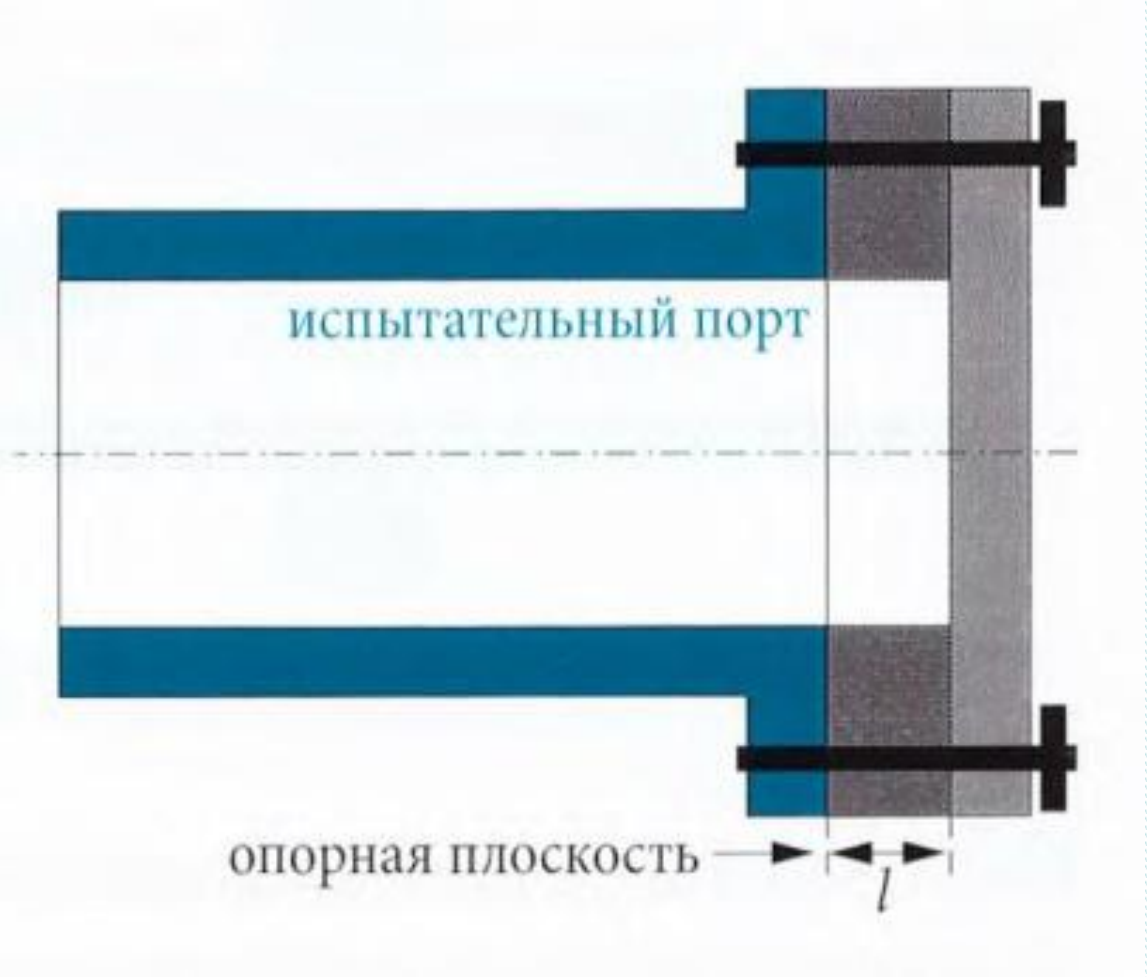



***Рис. 3.2.4***
*Расположение опорной плоскости в разъеме типа PC3.5, 2,4 мм и 1,85 мм.*

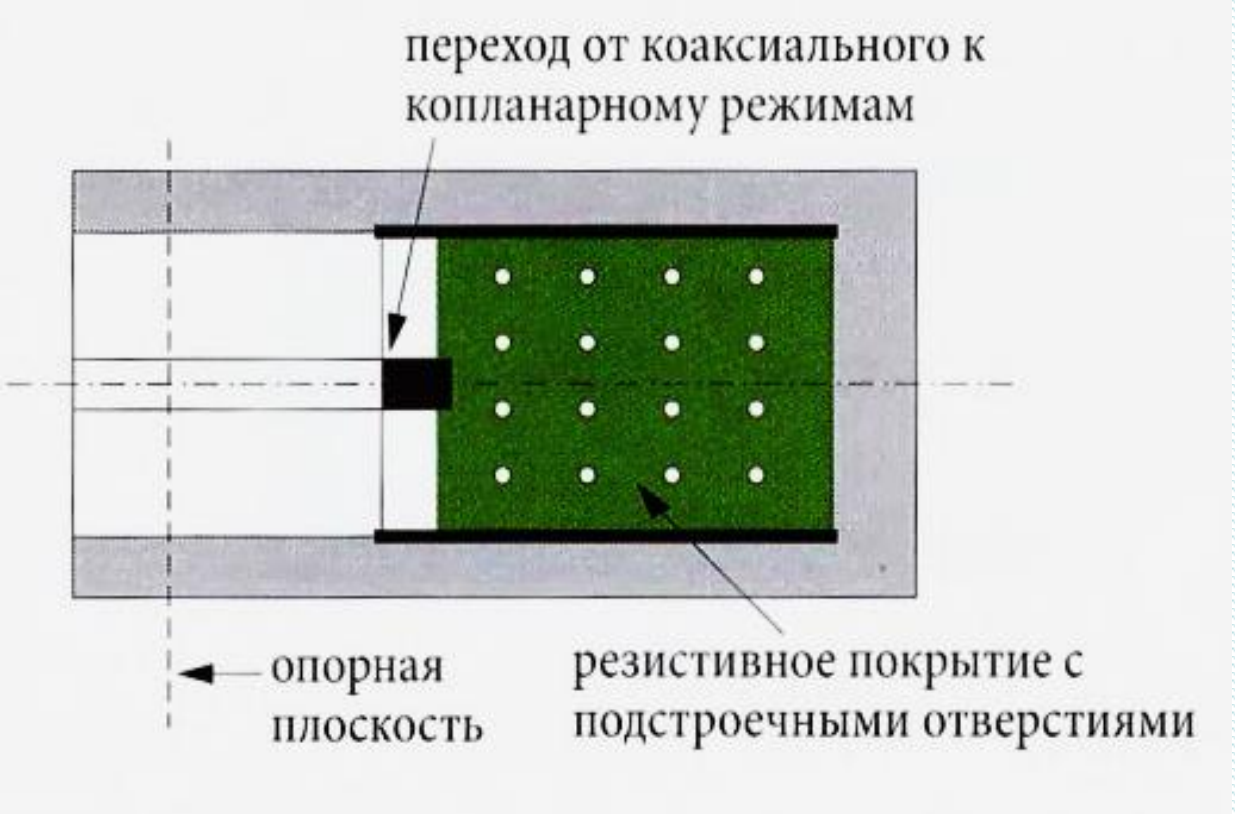
# Волноводные конструкции эталонных нагрузок КЗ и ХХ

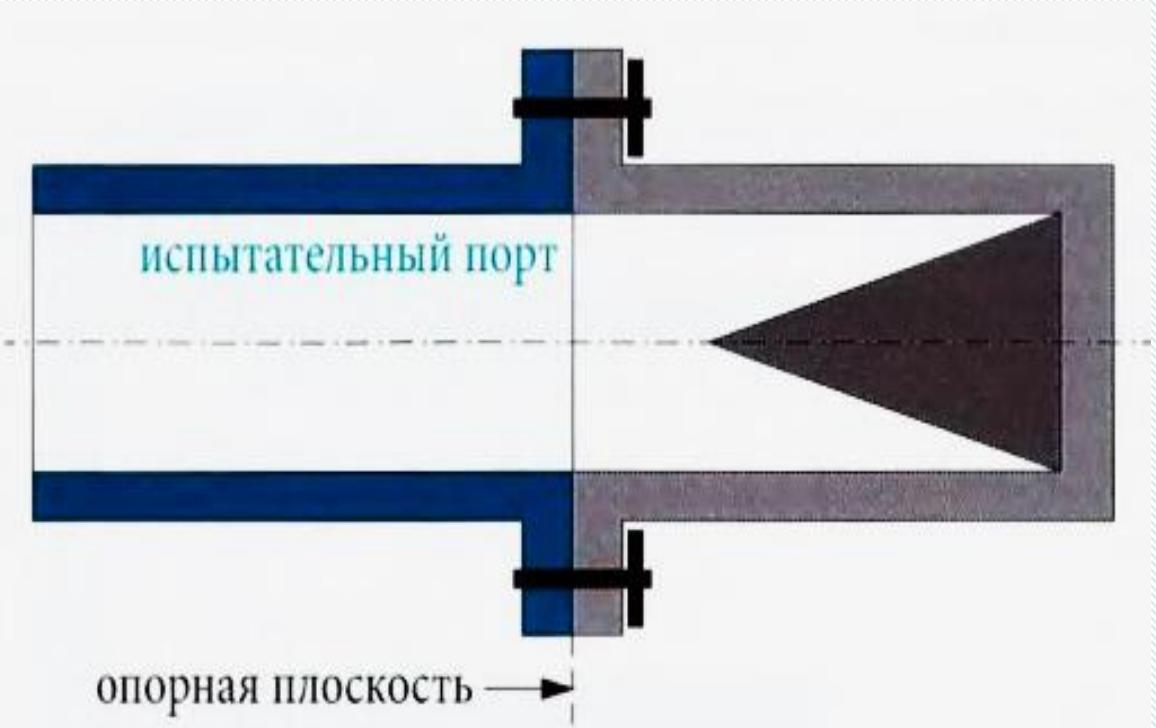


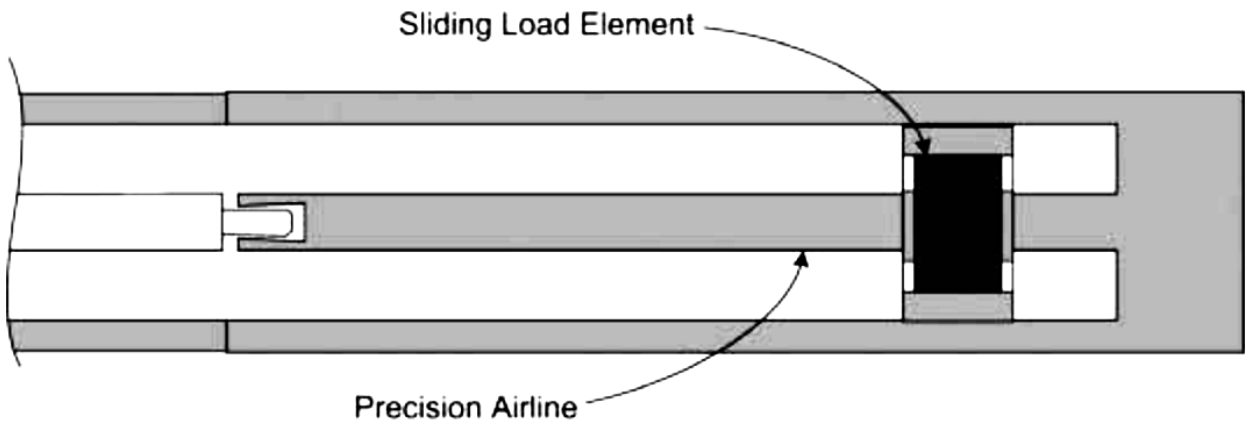

Открытый конец волновода использовать как меру ХХ нельзя. Вместо него используют отрезок КЗ волновода длиной четверть длины волны в волноводе!!!

# Конструкции образцовой меры СН (коаксиальной и волноводной)

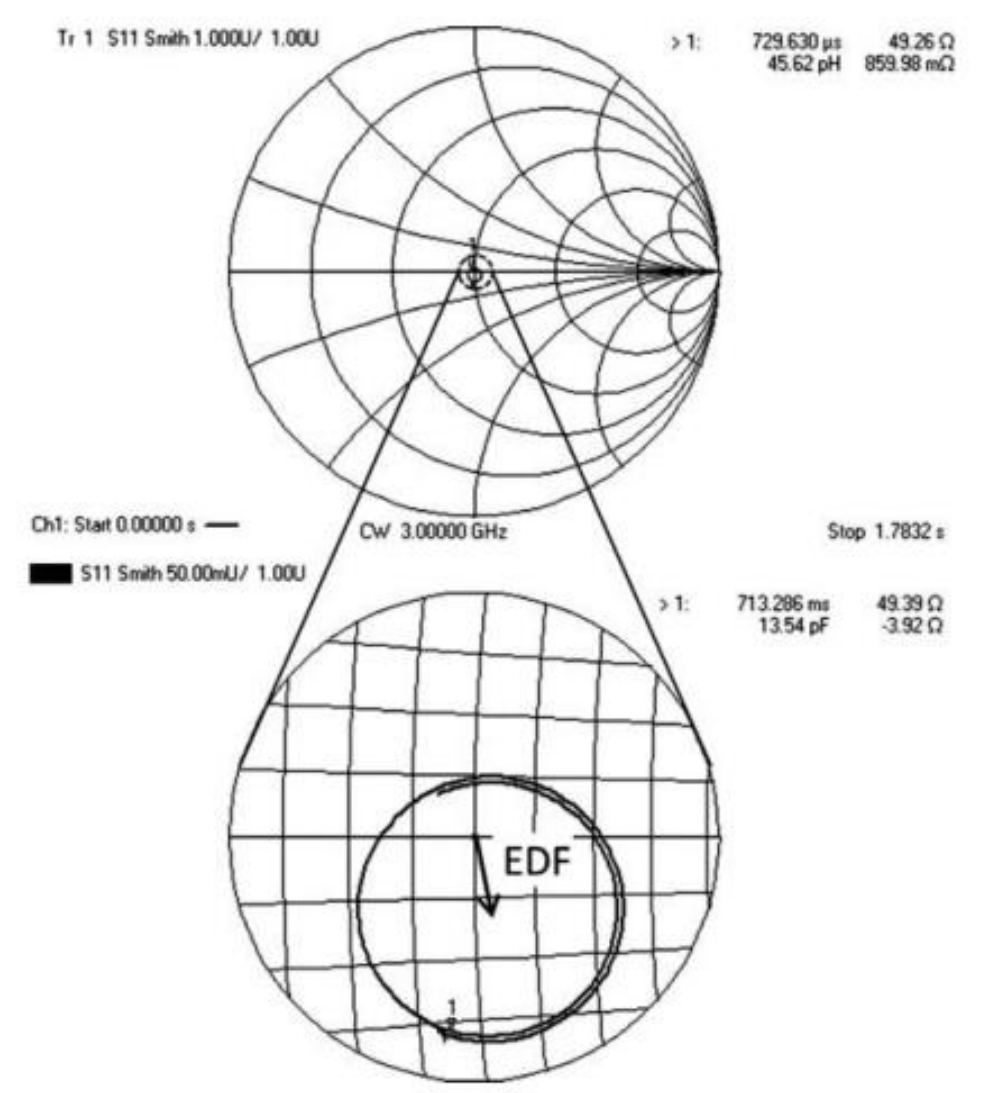


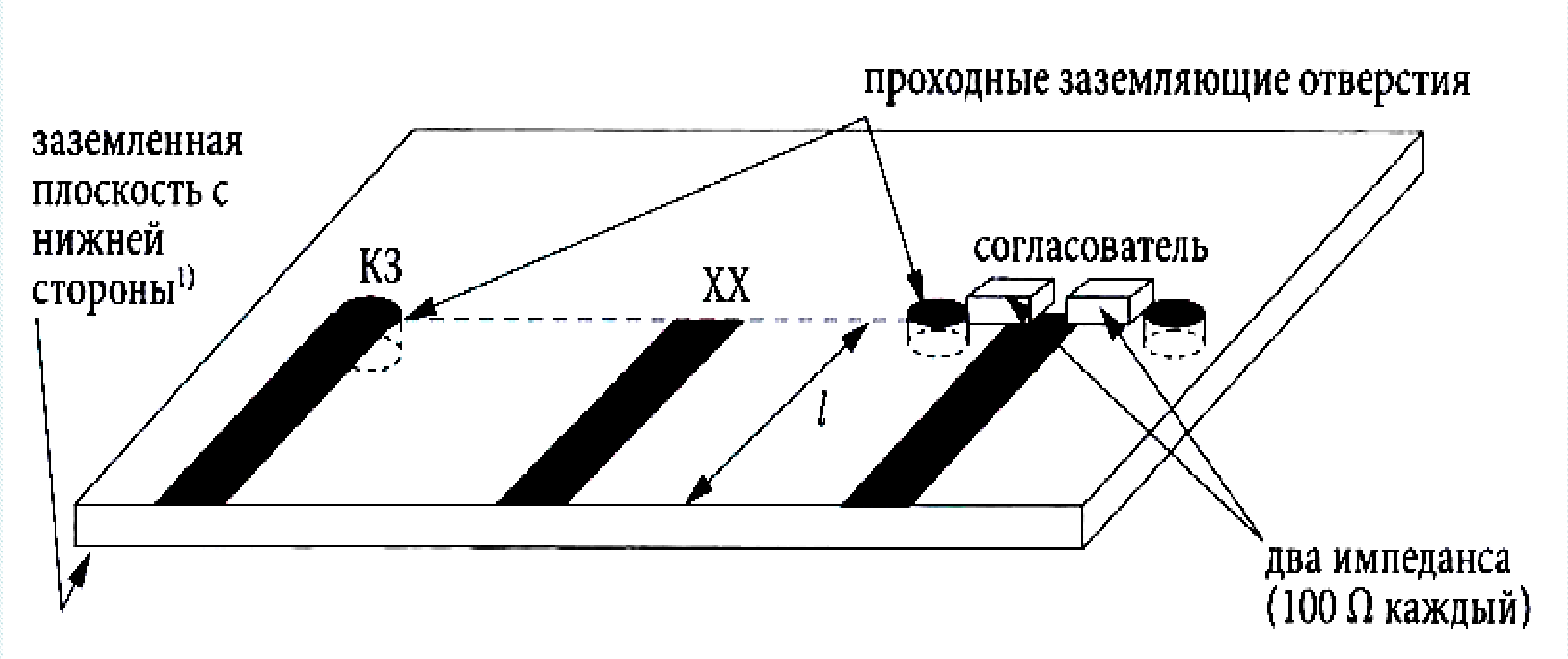
# Использование слайдера для уточнения меры СН




Калибровка по согласованной нагрузке с использованием РАССОГЛАСОВАННОГО слайдера – меры подвижной нагрузки с КСВН >1 (например, 1.4, 2.0). Калибровка по СН проводится путем РАСЧЕТА положения центра окружности по результатам усреднения измерения S11 в нескольких положениях слайдера (порядка 6…8  точек)



# Микрополосковые эталонные нагрузки для однопортовой калибровки



# Набор согласованных и рассогласованных нагрузок




Предназначен для поверки приборов для измерения параметров элементов и трактов с соединителем типа III по ГОСТ 13317, ГОСТ РВ 51914 в диапазоне 4 -18 ГГц.

Состоит из меры волнового сопротивления (согласованная нагрузка Э9-145) и мер полного сопротивления (рассогласованные нагрузки Э9-146 … Э9-154).

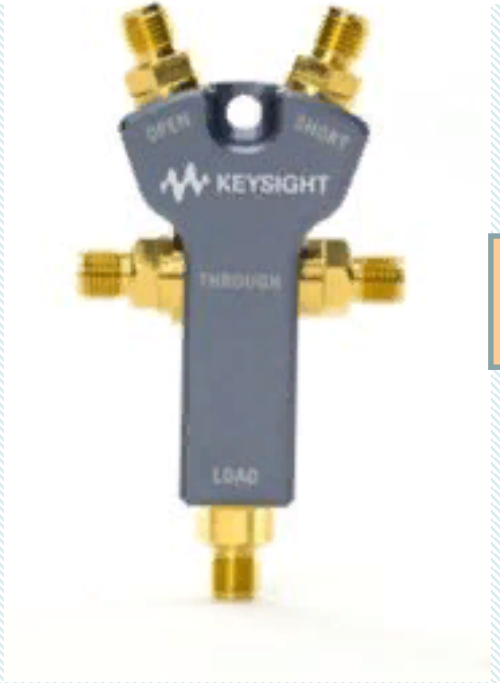
## Технические характеристики нагрузок:

| Тип отрезка | Значение волнового сопротивления коаксиального волновода | КСВН | Пределы допускаемой погрешности измерения КСВНн |
|---|---|---|---|
| Э9-145 | (50±0,35) Ом | 1,007 | ±0,7 % |
| Э9-146 | | 1,2±0,05 | ±1 |
| Э9-147…Э9-150 | | 1,4±0,05 | |
| Э9-151…Э9-154 | | 2,0±0,05 | |




**Нагрузка Keysight XX, К3, CH, перемычка (THRU) с соединителями типа N (розетка), 50 Ом, частотный диапазон: от 0 до 18 ГГц**

*Рассогласование по фазе (XX): менее 2,0° (на частоте от 0 до 6 ГГц), менее 3,0° (на частоте от 6 ГГц до 9 ГГц), менее 4,0° (на частоте от 9 ГГц до 18 ГГц) Рассогласование по фазе (К3): менее 1,5° (на частоте от 0 до 6 ГГц), менее 2,5° (на частоте от 6 ГГц до 9 ГГц), менее 3,0° (на частоте от 9 ГГц до 18 ГГц) Обратные потери (CH): более 42 дБ (на частоте от 0 до 6 ГГц), более 35 дБ (на частоте от 6 ГГц до 9 ГГц), более 32 дБ (на частоте от 9 ГГц до 18 ГГц)*

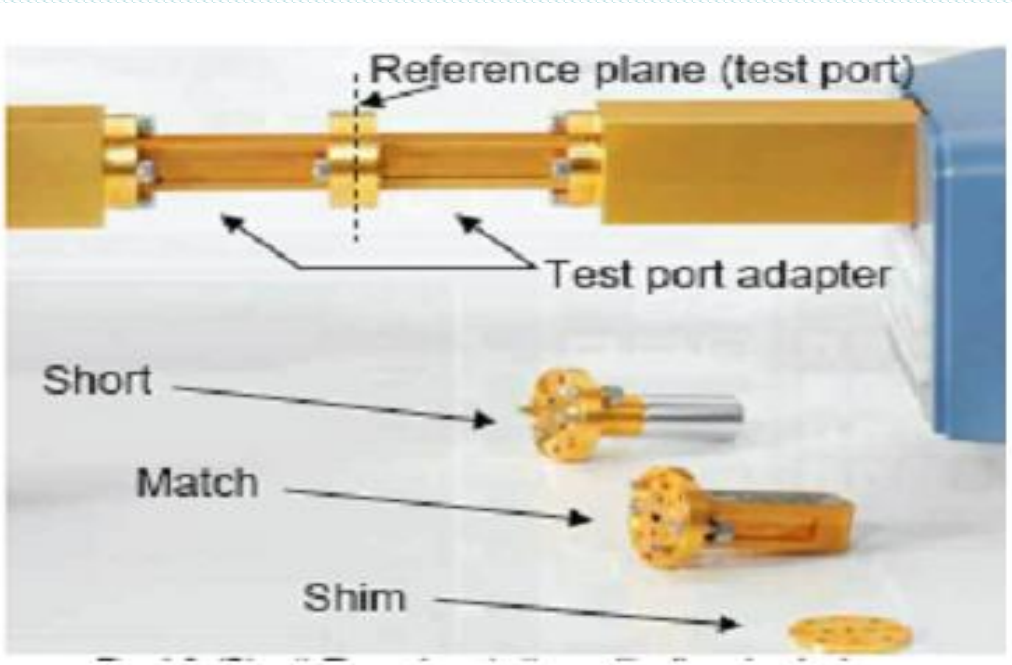



***Частотный диапазон: от 0 до 26,5 ГГц,***

*рассогласование по фазе (XX): менее 1,5° (на частоте от 0 до 5 ГГц), менее 3,0° (на частоте от 5 ГГц до 15 ГГц), менее 4,5° (на частоте от 15 ГГц до 26,5 ГГц). Рассогласование по фазе (К3): менее 1,0° (на частоте от 0 до 5 ГГц), менее 2,5° (на частоте от 5 ГГц до 15 ГГц), менее 4,0° (на частоте от 15 ГГц до 26,5 ГГц). Обратные потери (CH): более 42 дБ (на частоте от 0 до 5 ГГц), более 36 дБ (на частоте от 5 ГГц до 15 ГГц), более 32 дБ (на частоте от 15 ГГц до 26,5 ГГц)*

# Волноводные калибровочные наборы Rohde & Schwarz ZV-WR15/10/03





# Калибровка в волноводе до ТГц

- **Стандартный волноводный калибровочный набор от VDI для WR-3.4 и больше**
  - 2 нагрузки
  - 2 КЗ
  - 3 1/8 –волновые вставки
  - 2 четверть-волновые вставки

    Для TRL калибровки:
  - 1 прецизионная стандартная секция
  - Калибровка: TRL, SOLT, КЗ со смещением, Нагрузка со смещеием, …
- **Калибровочный набор VDI для WR-2.2 и меньше**
  - Четвертьволновые вставки становятся хрупкими → используется SOLT с прецизионной нагрузкой
  - 2 Нагрузки
    - Прецизионные, обратные потери 50дБ
  - 2 КЗ
  - 2 КЗ со смещением на ¼ волны
  - 1 прецизионная стандартная секция
  - Калибровка: SOLT



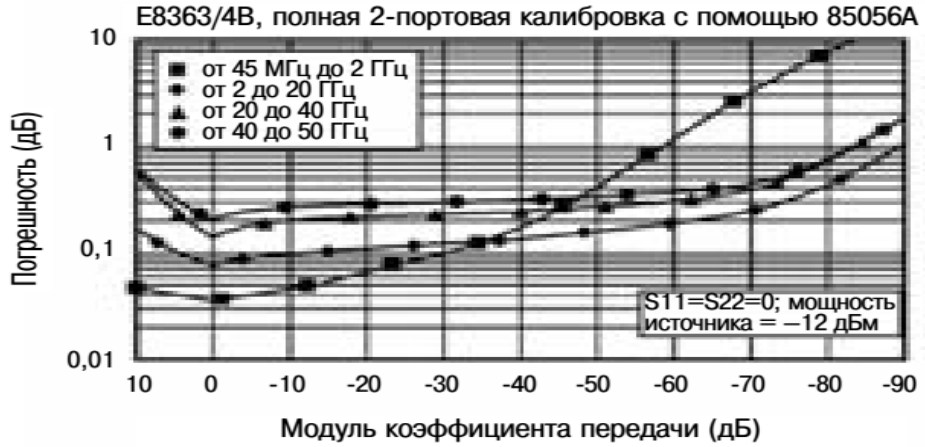

¼-волновая вставка



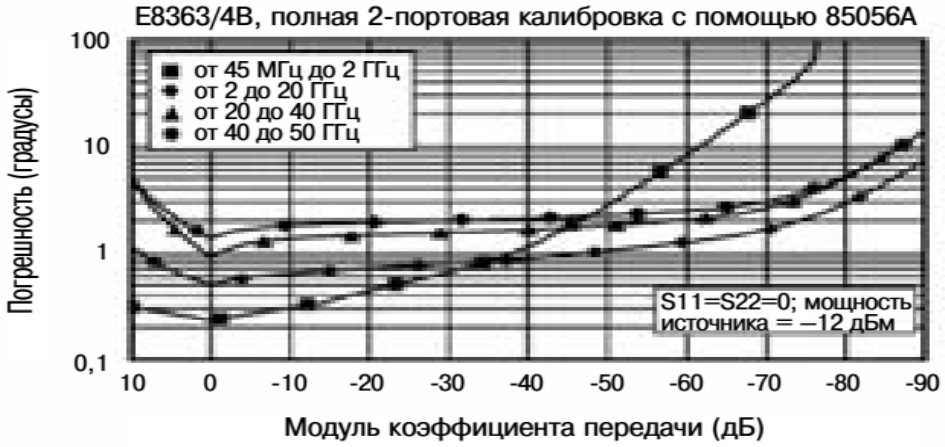
СВЧ анализатор цепей E8363/4B серии PNA, комплект калибровочных мер 85056A (2,4 мм), комплект гибких кабелей измерительных портов 85133F и полная 2-портовая калибровка.

**Погрешность измерения коэффициента передачи (гарантированная)**

Модуль

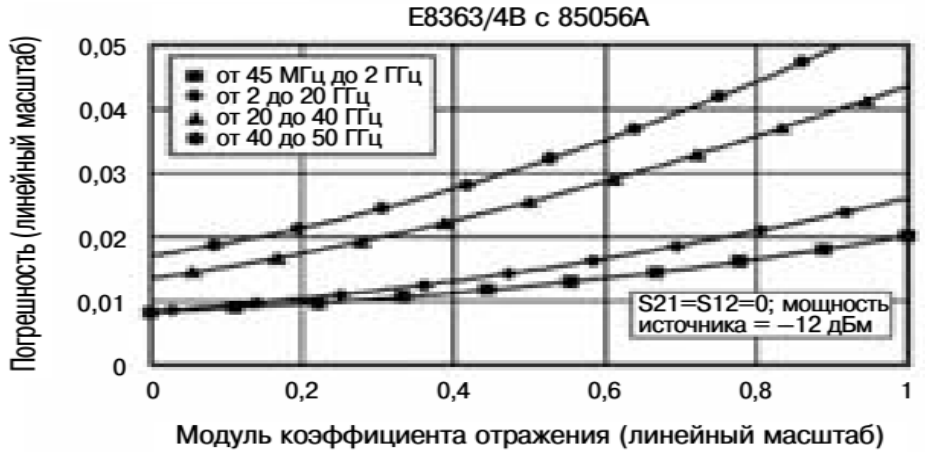



Фаза

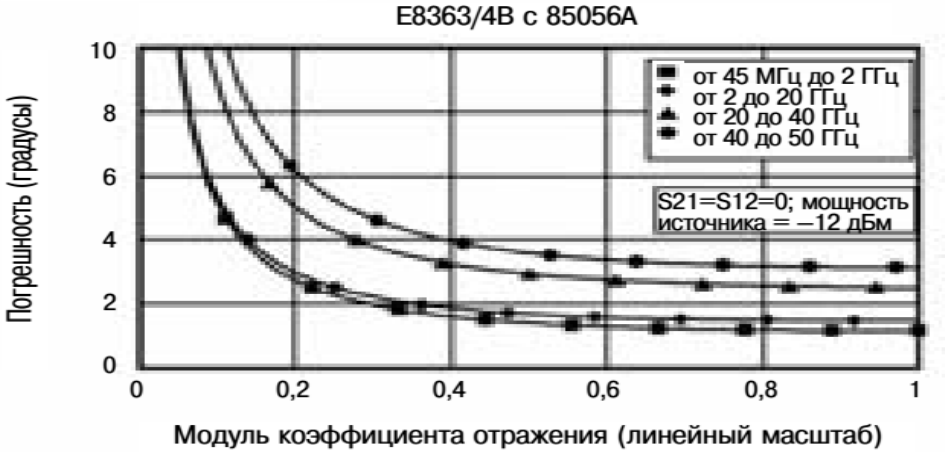



**Погрешность измерения коэффициента отражения (гарантированная)**

Модуль




Фаза

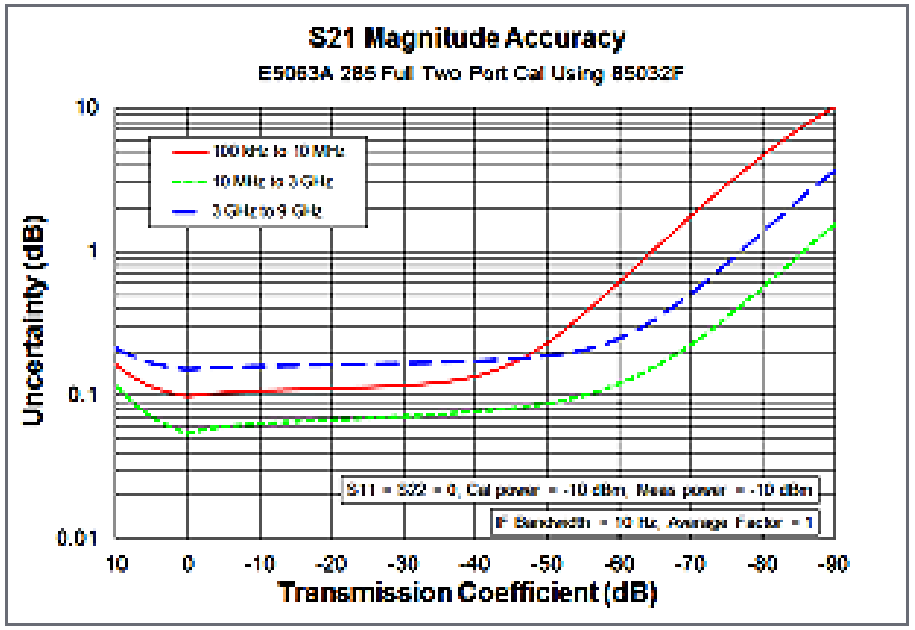


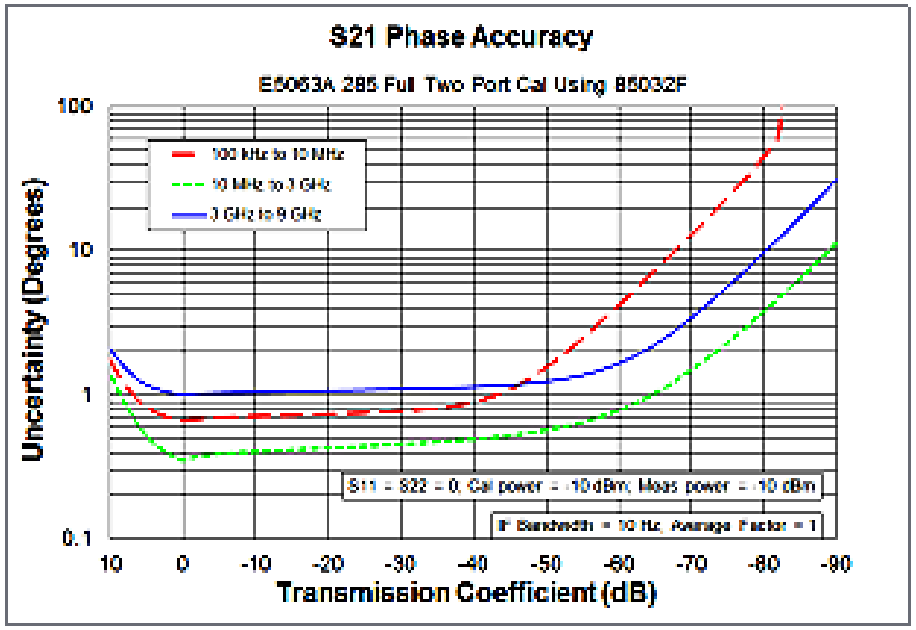
**Vector network analyzer : E5063A**

**Calibration kit : 85032F (Type-N, 50 Ω)**

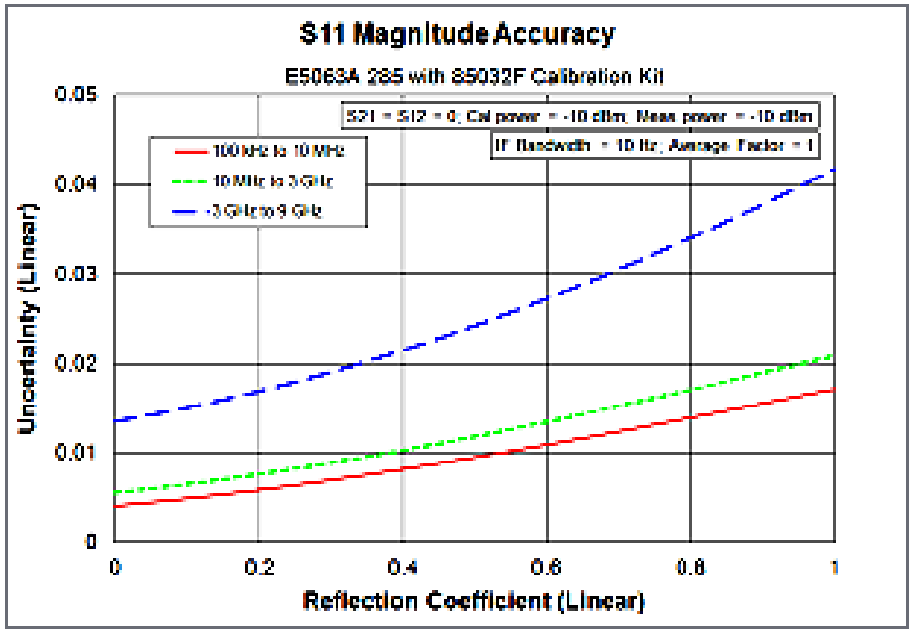
**Calibration : Full 2-port**

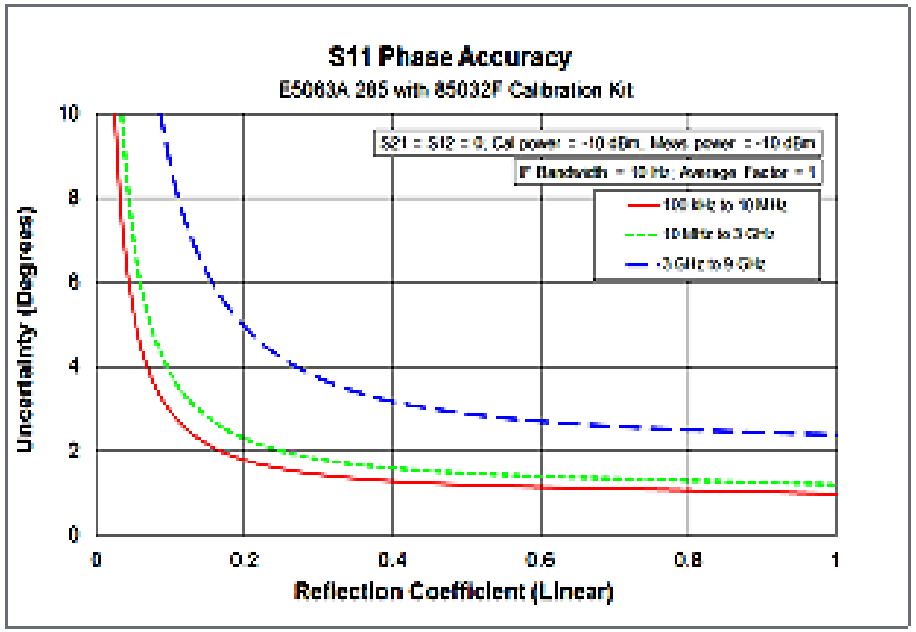
**Corrected system performance with type-N device connectors, 85032F calibration kit**




Reflection uncertainty (specification)[2]



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**

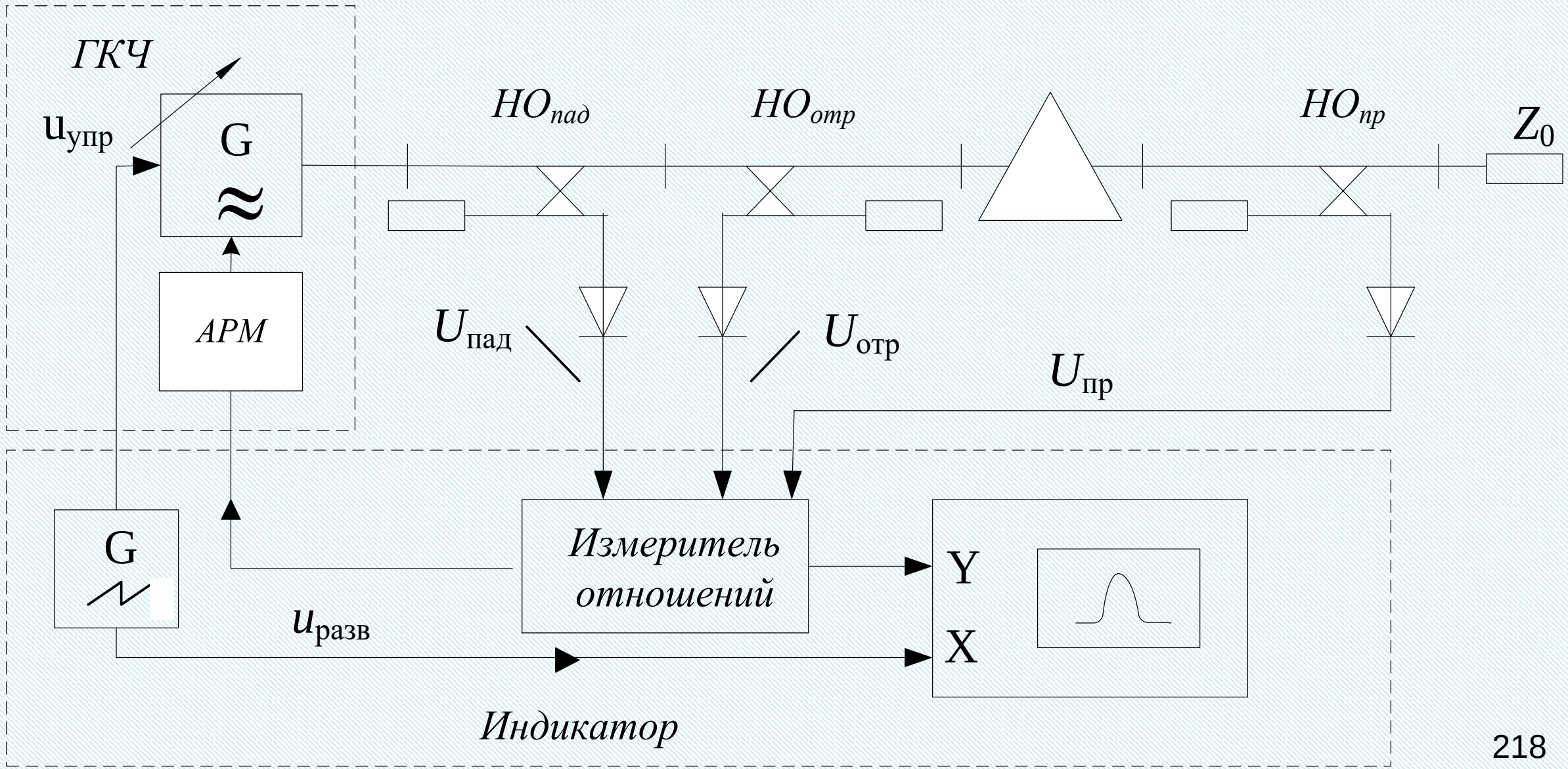
***А.А. Данилин***

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

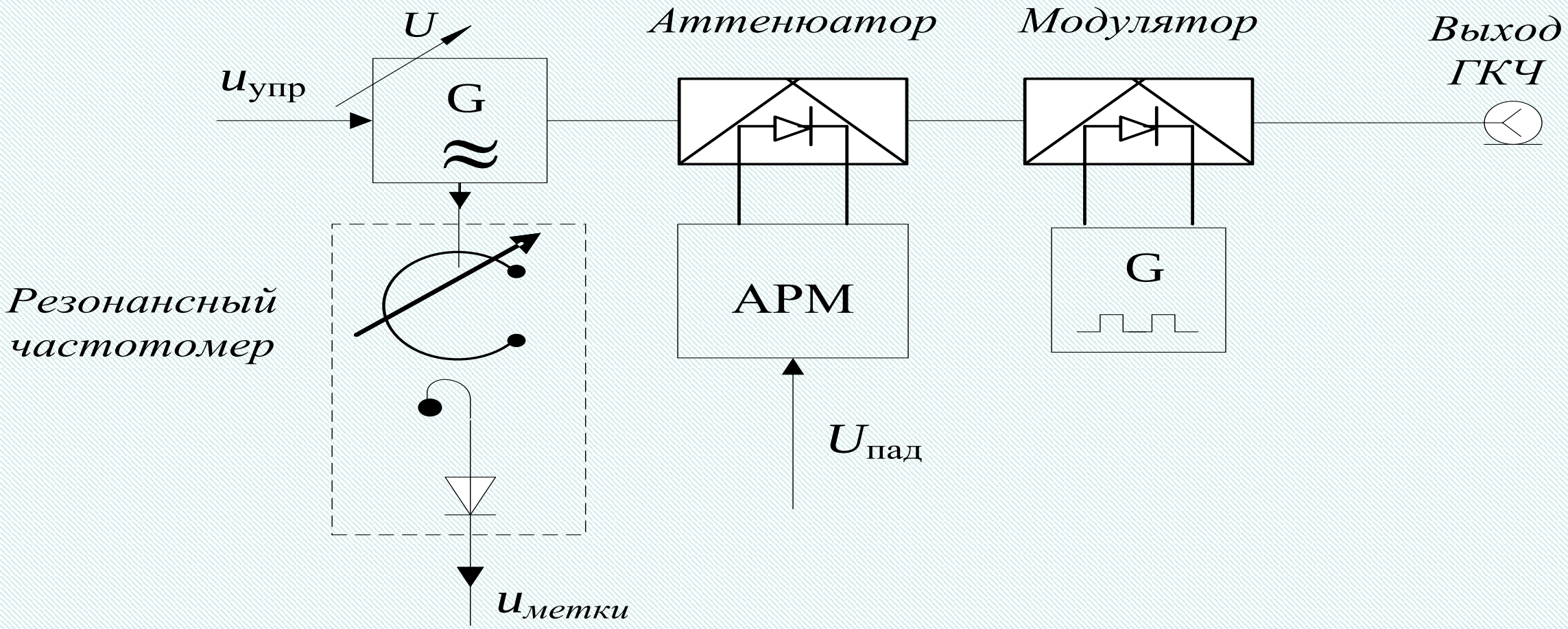
# Анализаторы цепей СВЧ

**Санкт-Петербург
2025 г.**

# Типовая схема скалярного панорамного измерителя КСВН и ослабления (Р2-61 и пр.)

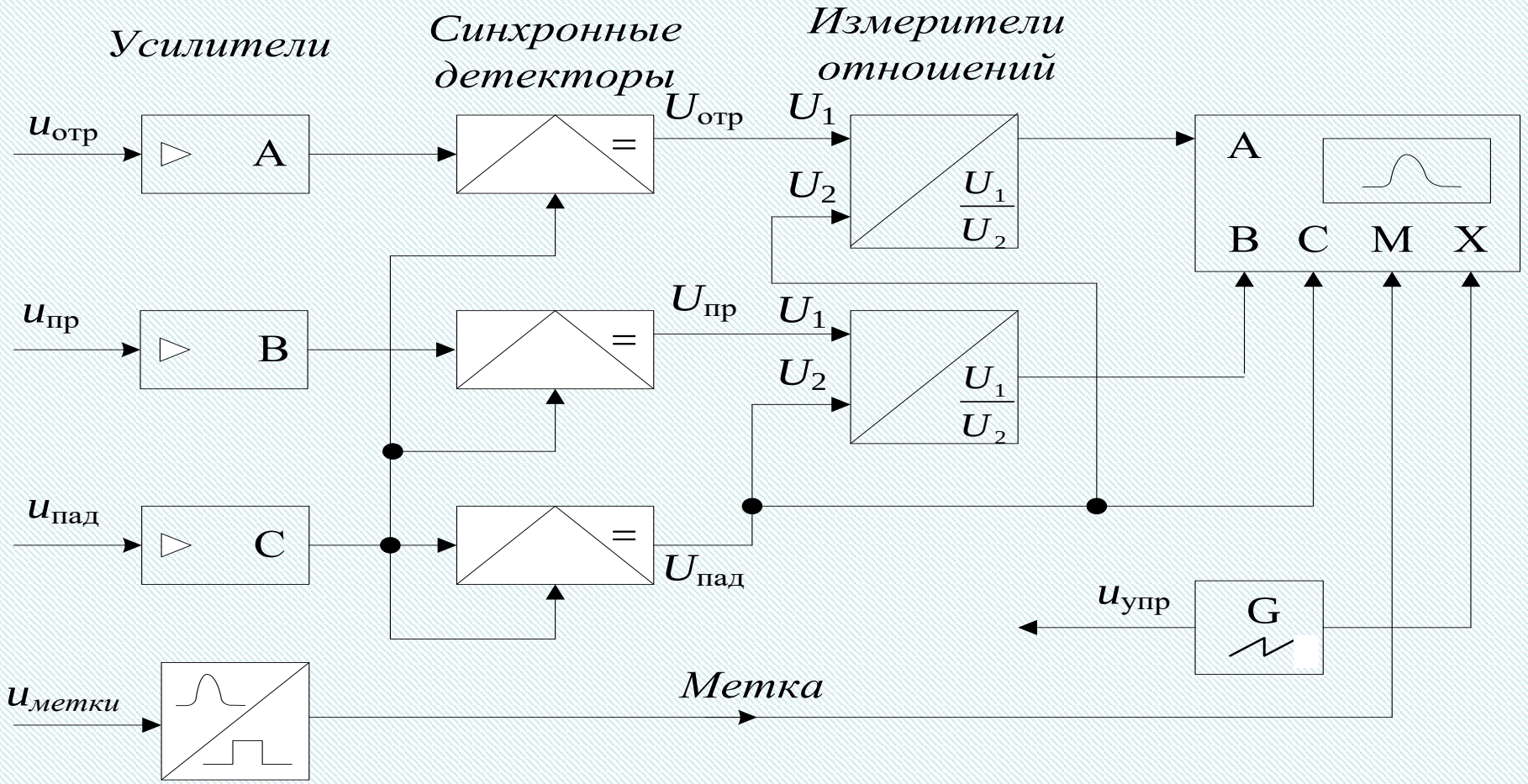


# Схема ГКЧ измерителя КСВН и ослабления




Предусмотрены: управление мощностью системой АРМ, АМ (манипуляция) выходного сигнала и измерение частоты резонансным частотомером (частотная метка)

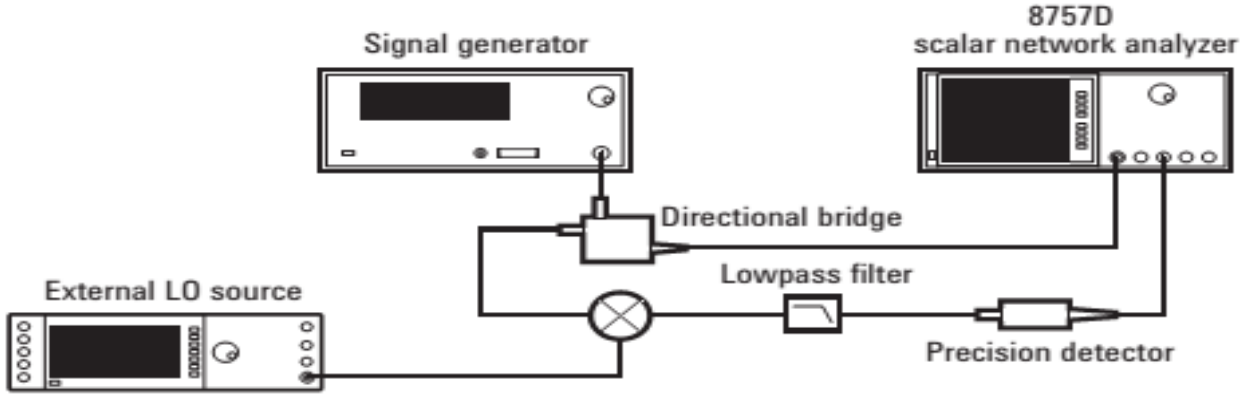
# Двухканальный индикаторный блок измерителя КСВН и ослабления




Опорный сигнал для синхронных детекторов – из канала падающей волны. Формирование метки – из импульса на выходе частотомера. Управление частотой ГКЧ – напряжением развертки индикатора

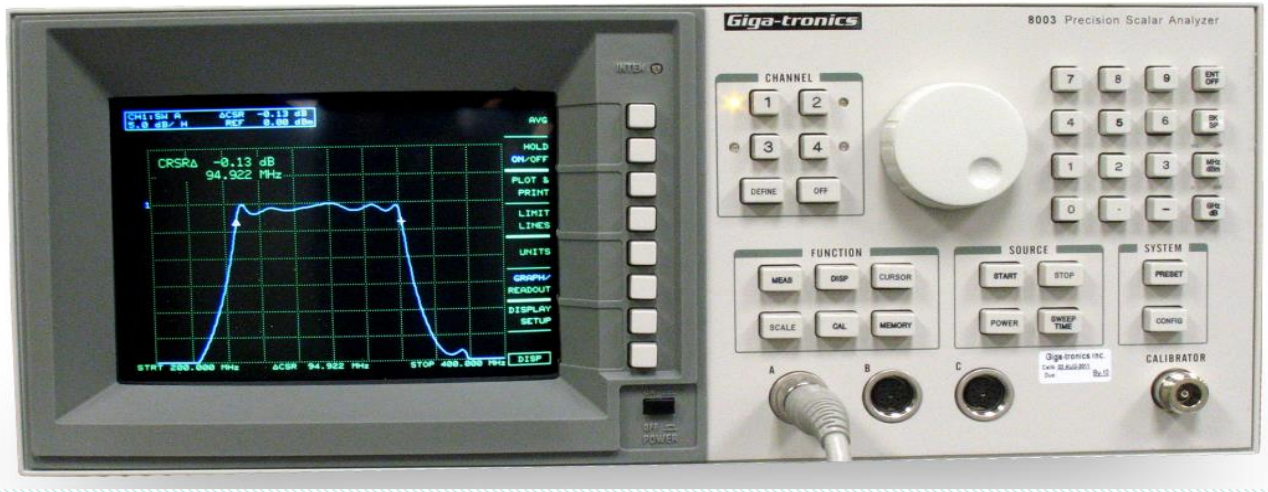
# Скалярный измеритель параметров цепей СВЧ Agilent 8757D






| | |
|---|---|
| **Диапазон частот** | от 10 МГц до 110 ГГц, зависит от конфигурации |
| **Число портов** | 2 |
| **Балансные измерения** | нет |
| **Волновое сопротивление системы** | 50 Ом |
| **Динамический диапазон системы** (на частоте 20 ГГц) | 75 дБ/70 дБ (режимы детектирования по переменному/постоянному току) |
| **Мощность на измерительном порте** (на частоте 20 ГГц) | Зависит от источника сигнала: +10 или +17 дБм (до 26,5 ГГц) +6 дБм (до 40 ГГц) |
| **Диапазон свипирования по мощности** | 25 дБ |
| **Типы свипирования** | линейный, по мощности, НГ |

# Скалярный анализатор цепей Giga-tronics 8003





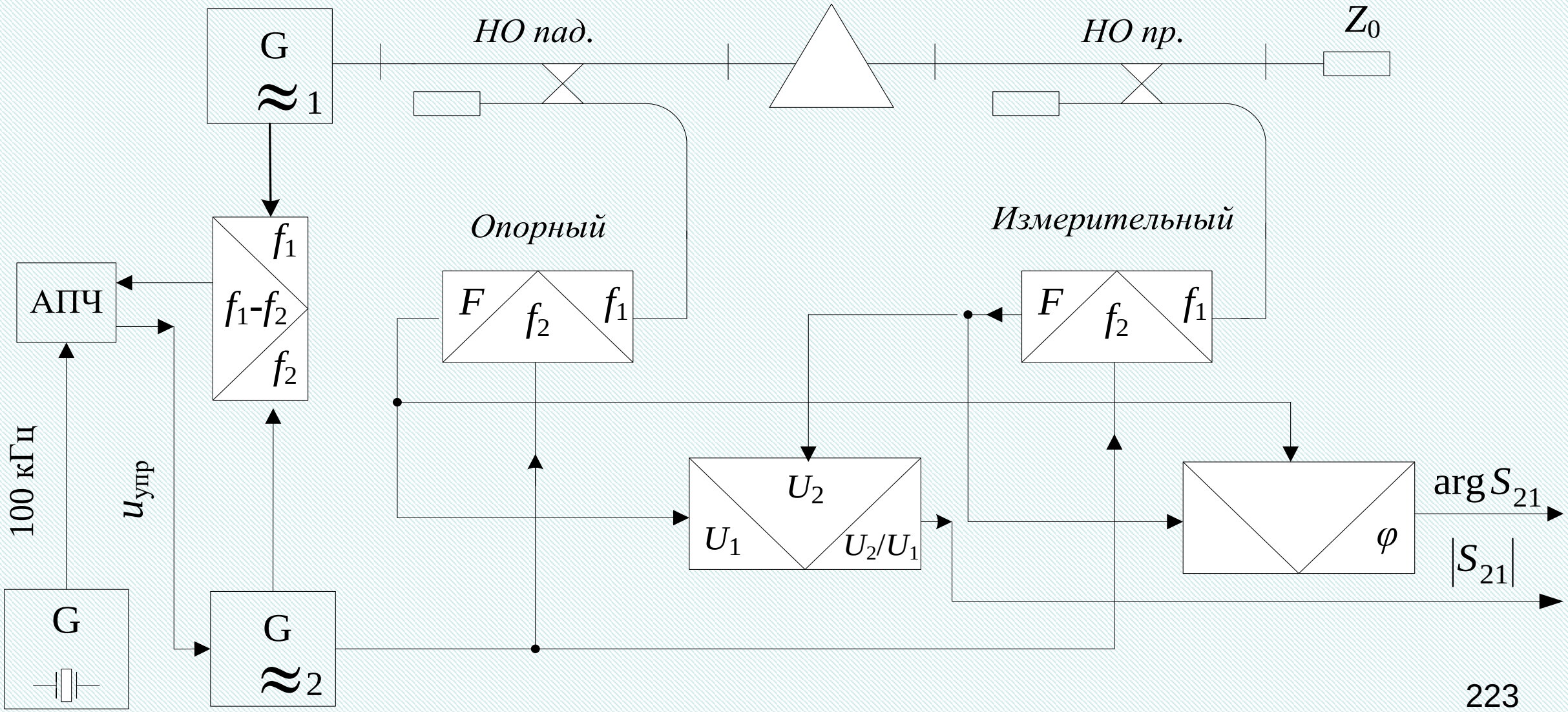


***8003 Precision Scalar Network Analyze***r - frequency range of 10 MHz to 40 GHz with a dynamic range of –70 to +20 dBm. Погрешность ±0.02 dB (±0.5%) over any 20 dB range from +16 to -70 dBm

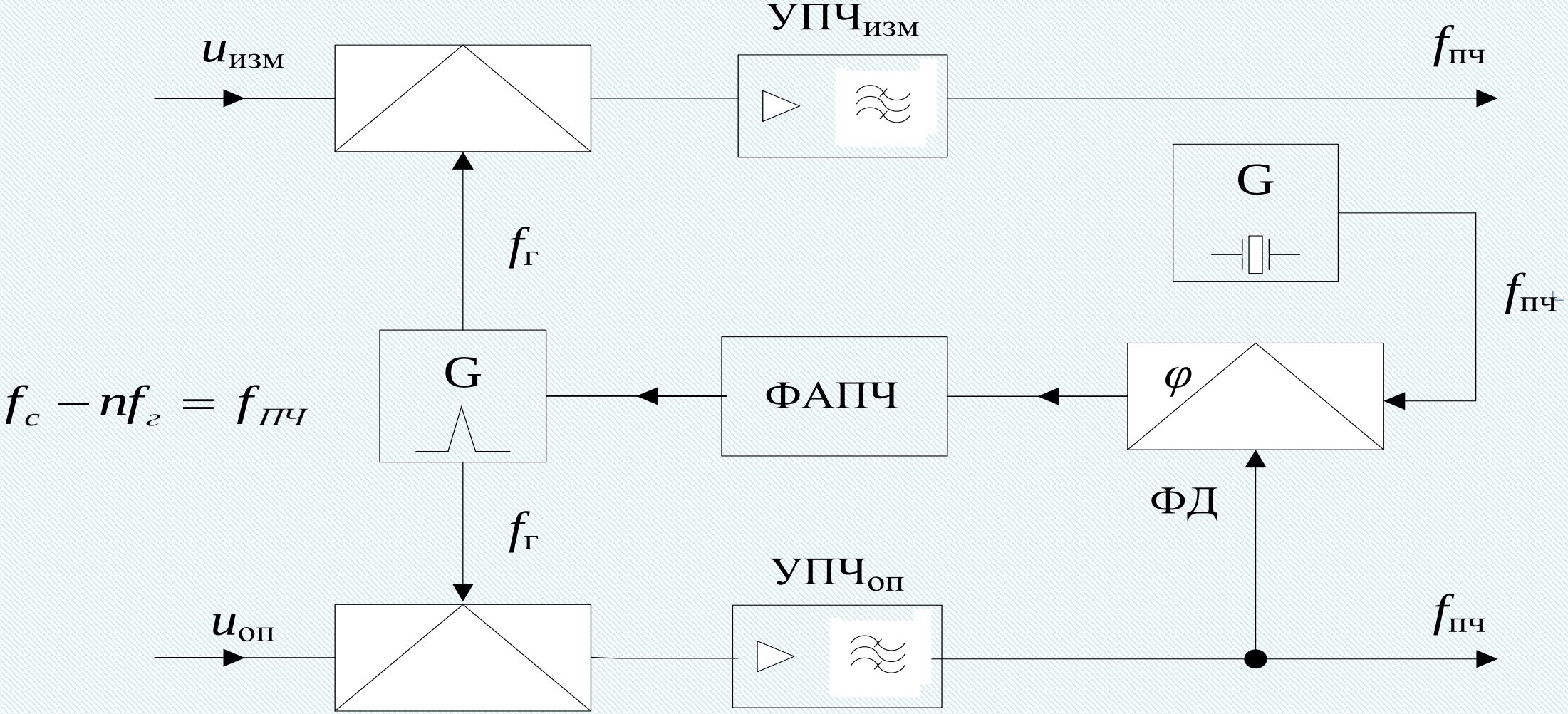
**Giga-tronics CW Power Sensor Selection Guide**

| | Frequency Range / Power Rangee | Maximum Power | Power Linearity [1] (Frequency > 8 GHz) | RF Connector |
|---|---|---|---|---|
| **200 mW CW Power Sensors** | | | | |
| 80301A | 10 MHz to 18 GHz<br>-70 to +20 dBm | +23 dBm (200 mW) | -70 to -20 dBm: ±0.00 dB<br>-20 to +20 dBm: ±0.05 dB/10 dB | Type N(m)<br>50 Ω |
| 80302A | 10 MHz to 18 GHz<br>-70 to +20 dBm | +23 dBm (200 mW) | -70 to -20 dBm: ±0.00 dB<br>-20 to +20 dBm: ±0.05 dB/10 dB | APC-7<br>50 Ω |
| 80303A | 10 MHz to 26.5 GHz<br>-70 to +20 dBm | +23 dBm (200 mW) | -70 to -20 dBm: ±0.00 dB<br>-20 to +20 dBm: ±0.1 dB/10 dB | Type K(m) [2]<br>50 Ω |
| 80304A | 10 MHz to 40 GHz<br>-70 to 0 dBm | +23 dBm (200 mW) | -70 to -20 dBm: ±0.00 dB<br>-20 to 0 dBm: ±0.2 dB/10 dB | Type K(m) [2]<br>50 Ω |

# Типовая схема аналогового векторного измерителя комплексных коэффициентов передачи (S-параметров) (Р4-11, Р4-23 и пр.)

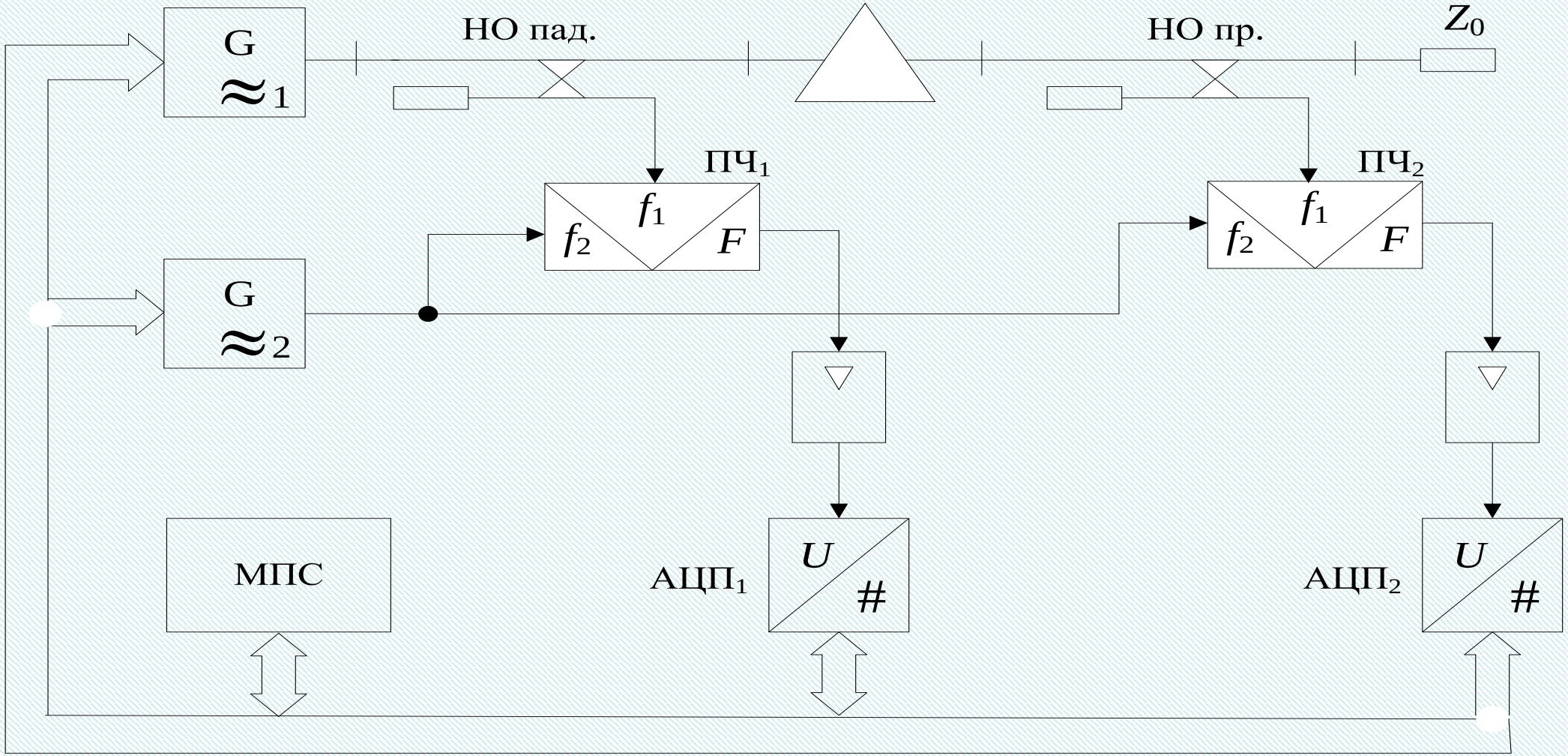


# Схема двухканального стробоскопического преобразователя частоты




Гетеродин- генератор коротких импульсов с широким спектром гармоник. Смесители-диодные ключи, осуществляющие амплитудно-импульсную модуляцию измерительного и опорного сигналов. Частота гетеродина подстраивается по выходному сигналу УПЧ системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ):

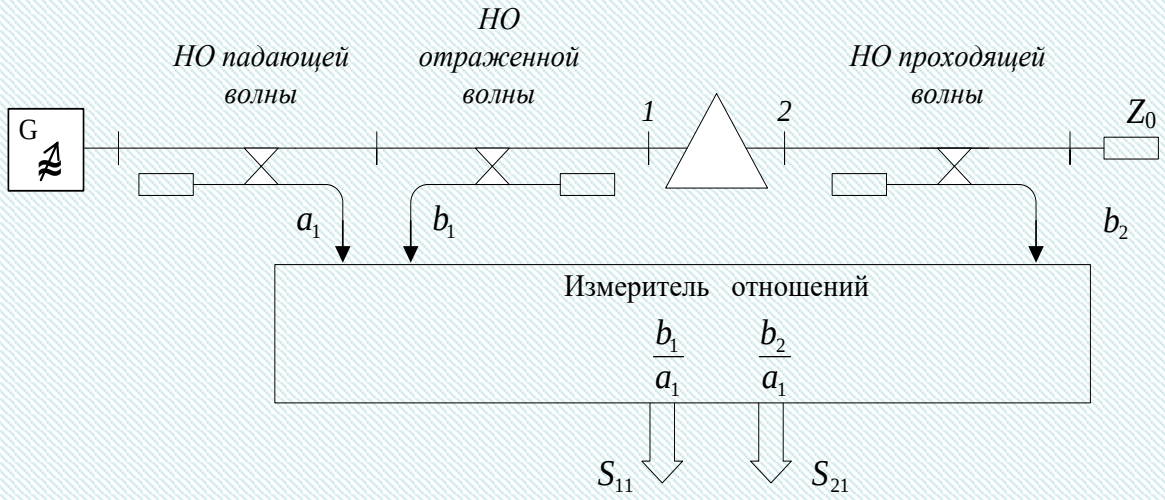
# Микропроцессорный векторный анализатор цепей в режиме измерения коэффициента передачи

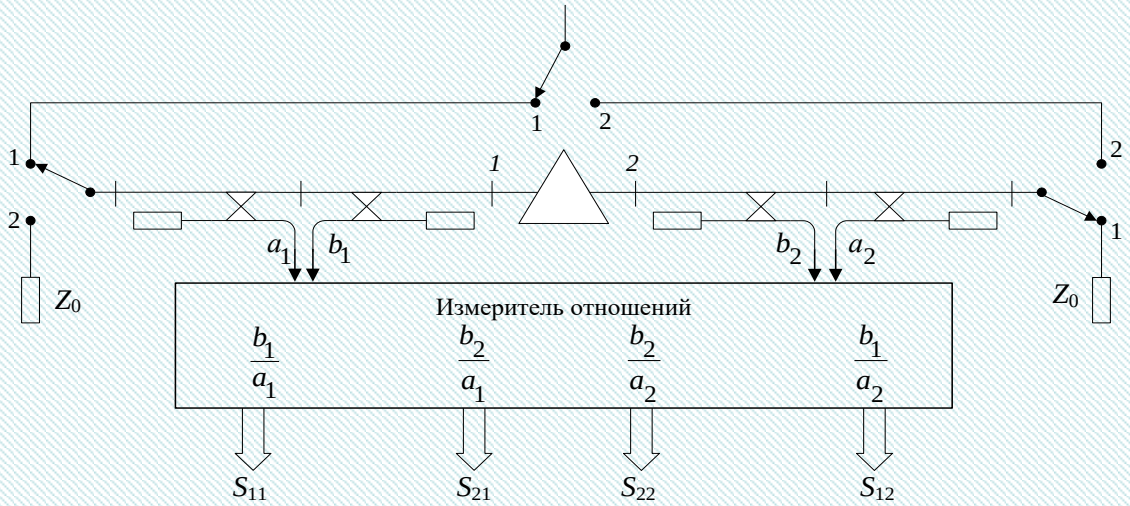



Гетеродин и основной ГКЧ - синтезаторы с фиксированным частотным сдвигом.

Автоматизированные анализаторы цепей СВЧ (**ANA**) или **векторные анализаторы цепей (ВАЦ) – это** измерители параметров матрицы рассеяния, позволяющие получить частотные зависимости комплексных коэффициентов отражения и передачи одно-, двух- и многопортовых СВЧ узлов с предварительной калибровкой измерительного тракта.

Два варианта – без коммутации (измерители R/T) и с коммутацией измерительного тракта



# Векторные анализаторы цепей СВЧ HP: история


Рис. 1. Анализатор цепей 8410


Рис. 3. Анализатор цепей 8510

В 1967 году компания Hewlett-Packard, предшественница Agilent Technologies, выпустила анализатор цепей **8410**, в котором достигнут **диапазон качания частоты 12 ГГц**. В середине 80-х годов разработка широкополосных твердотельных генераторов СВЧ, быстродействующих АЦП и мощных микропроцессоров позволило выпустить векторный анализатор цепей **HP8510** (а также его варианты 8753 и 8720). Прибор 8510 стал метрологическим эталоном для измерений в СВЧ-диапазоне.







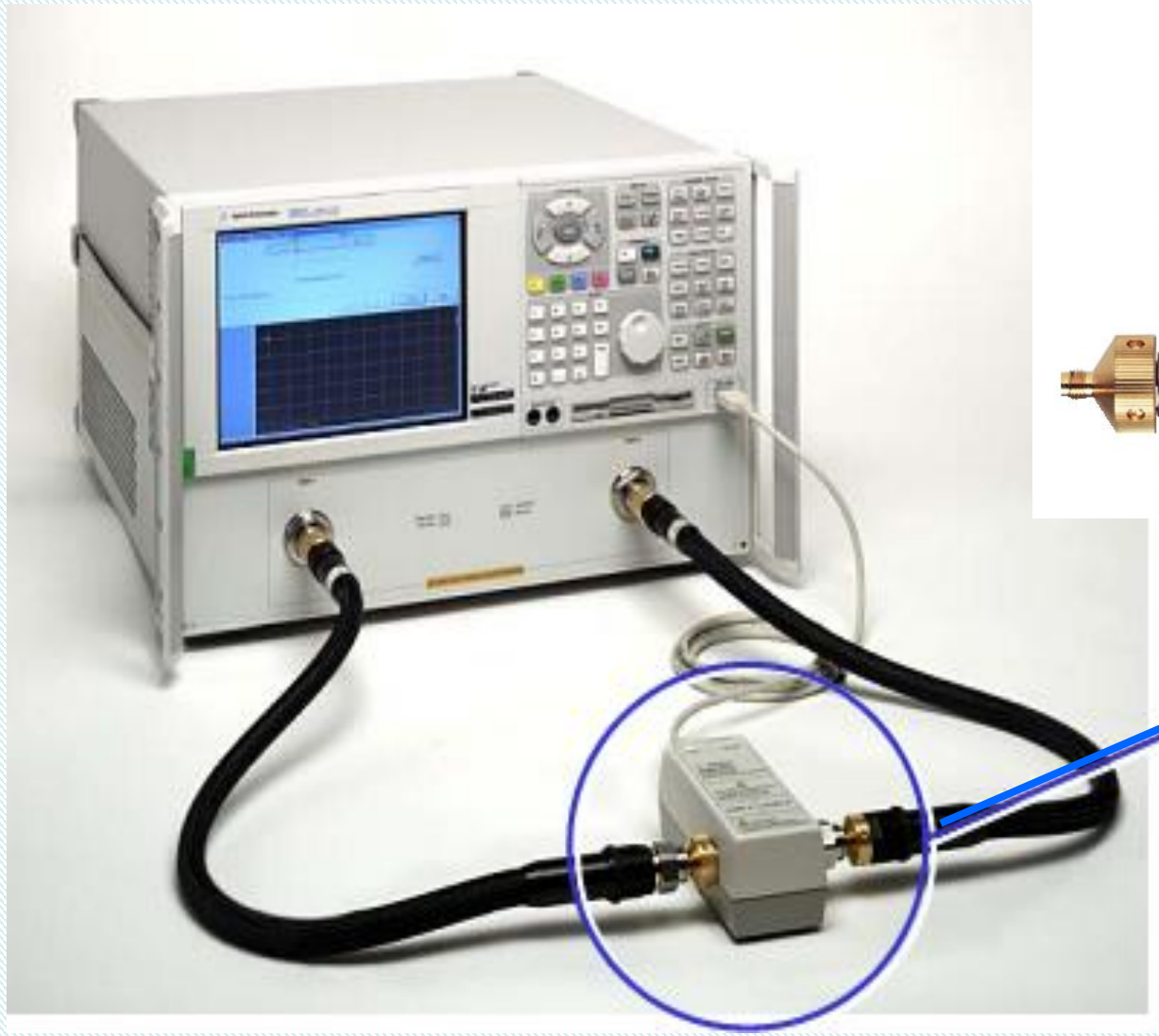




Современные ВАЦ фирмы Keysight Technologies в приборном, модульном, компактном и компьютерном исполнении (USB-ANA)

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

# Калибровка PNA с блоком электронной калибровки **ECal**











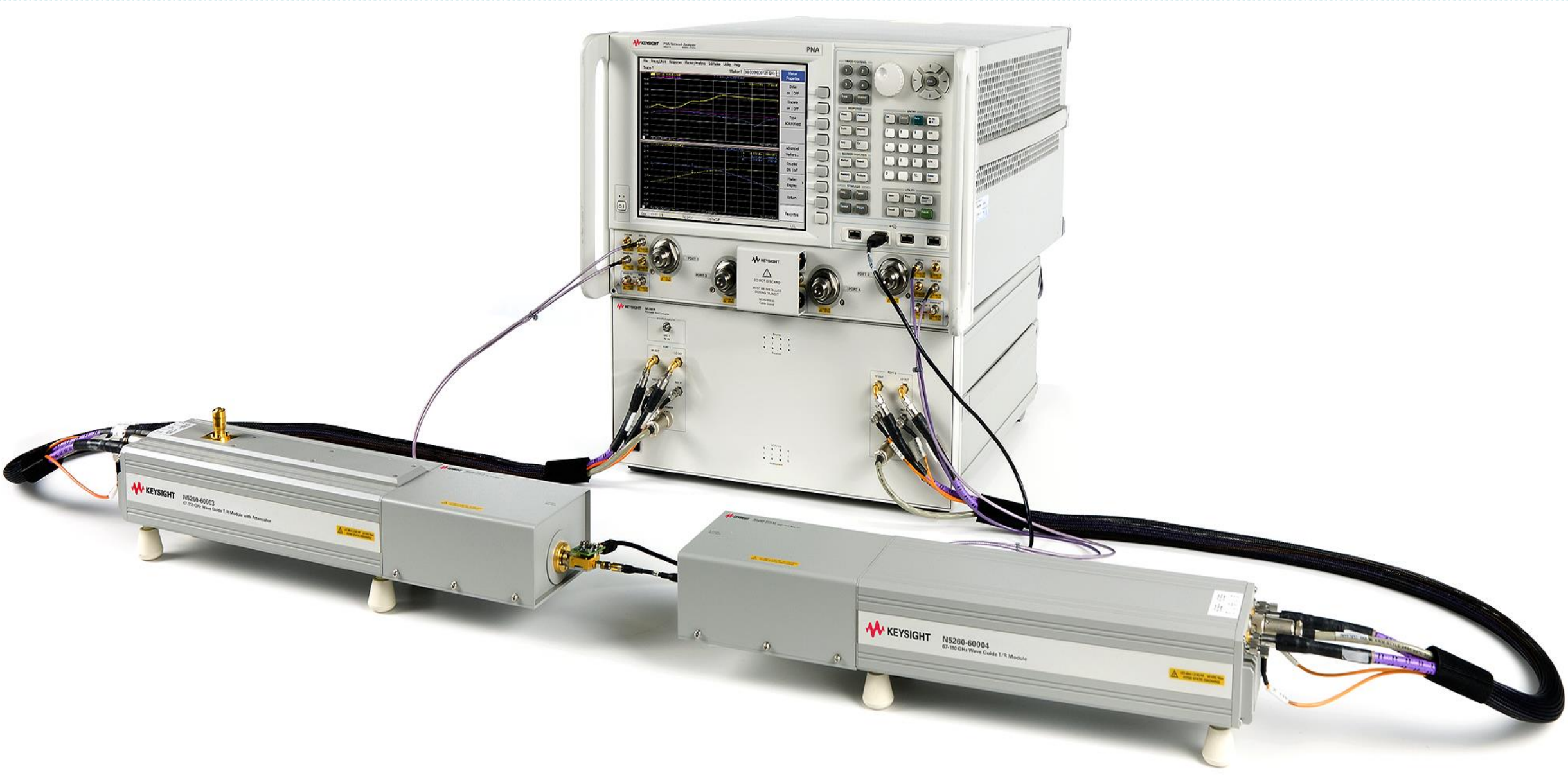
Векторный анализатор СВЧ цепей серии PNA-X с набором электронных нагрузок



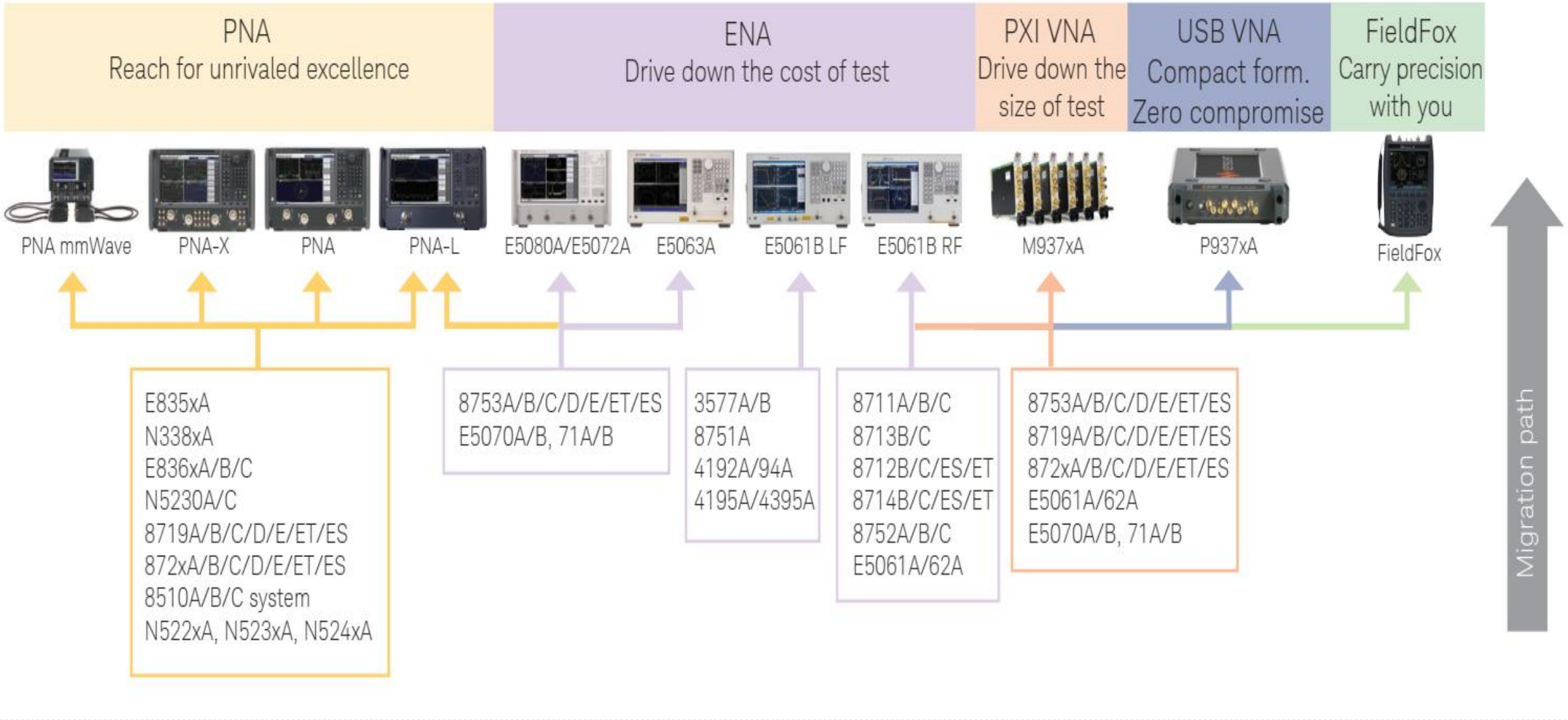
4-port 20 GHz PNA-L with E5091A multiport test set



Анализаторы цепей PNA с 4 и 8 измерительными портами




Анализатор цепей миллиметрового диапазона Keysight N5251A




Пути модернизации анализаторов цепей фирмы Keysight Technologies – замена устаревших моделей на современные )

# Keysight PNA-L, PNA, PNA-X

## СВЧ-анализаторы цепей



Рисунок 30. Анализатор цепей E836xC серии PNA, снятый с производства.

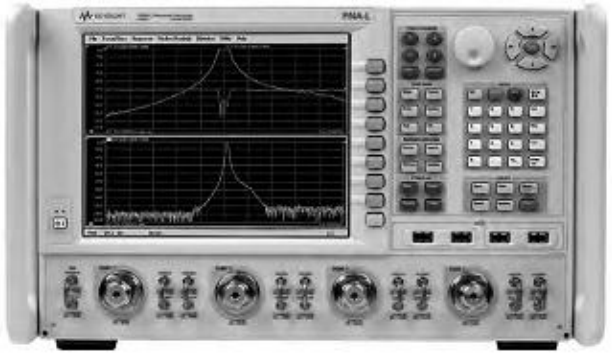


Рисунок 31. Анализатор цепей N523xA серии PNA.

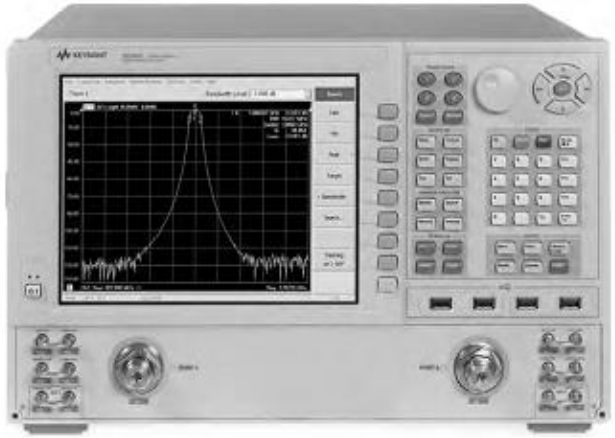


Рисунок 32. Анализатор цепей N5242A серии PNA-X.

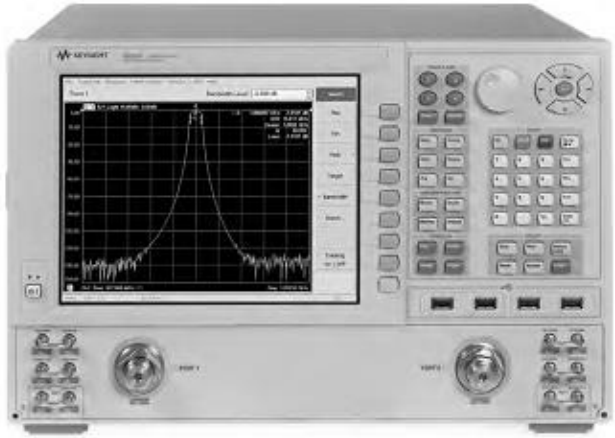
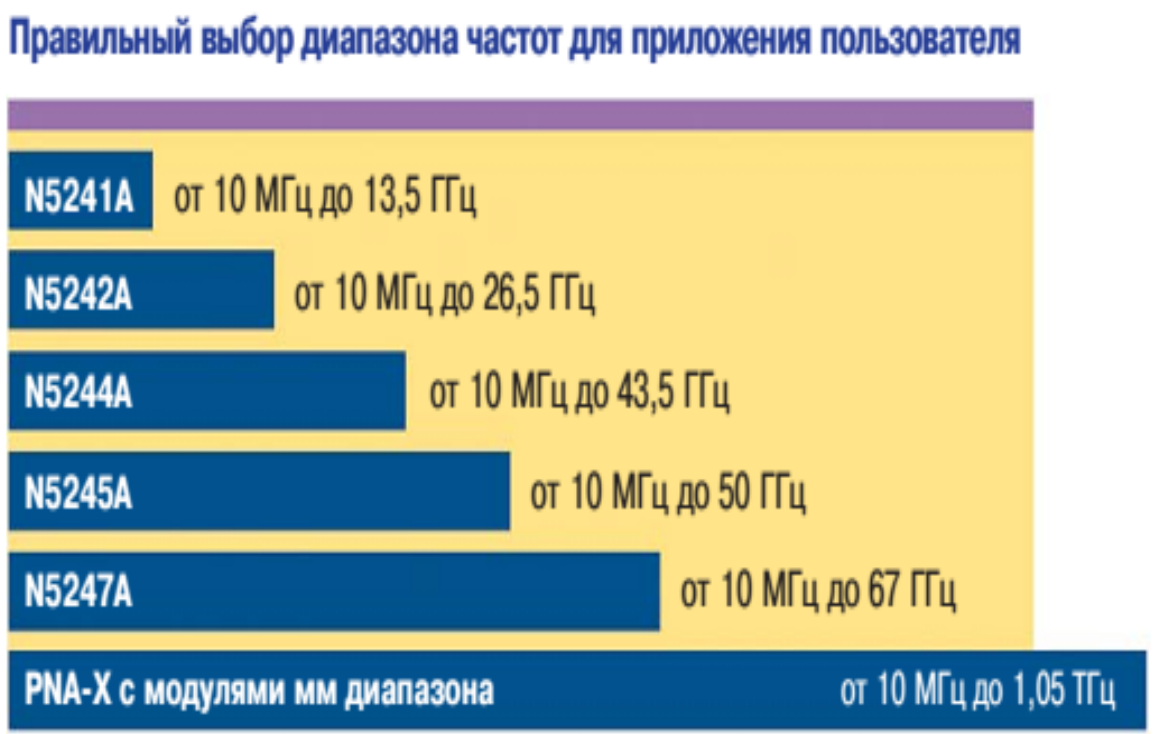
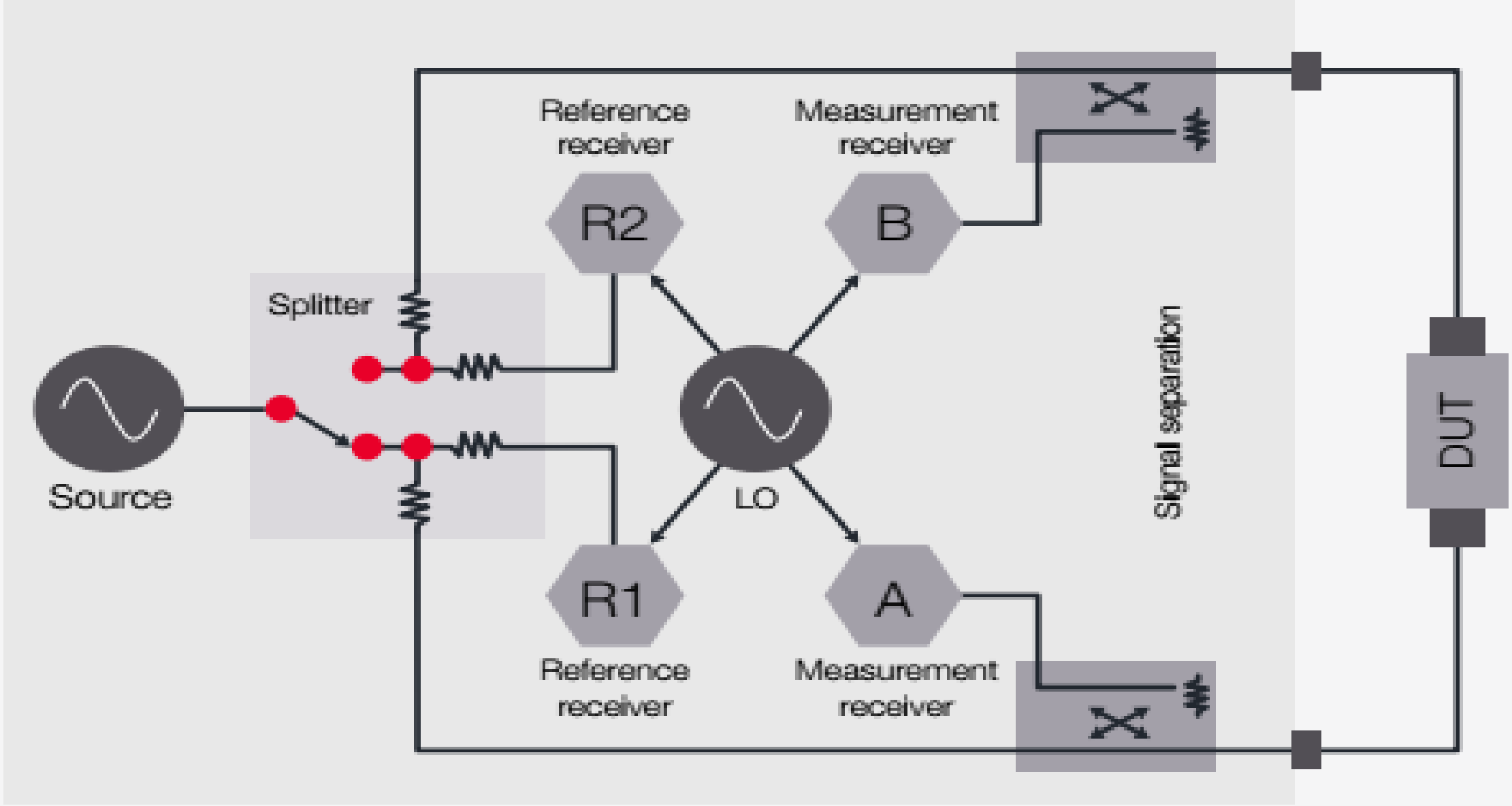


Рисунок 33. Анализатор цепей N5222A серии PNA.

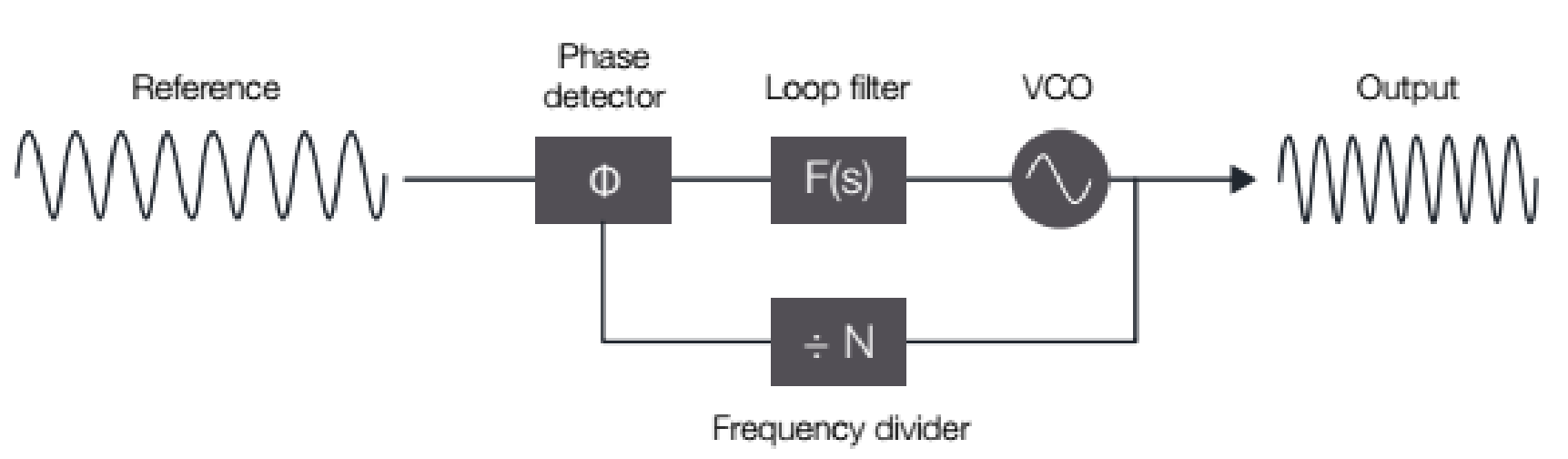
Частотные диапазоны разных моделей ВАЦ типа PNA



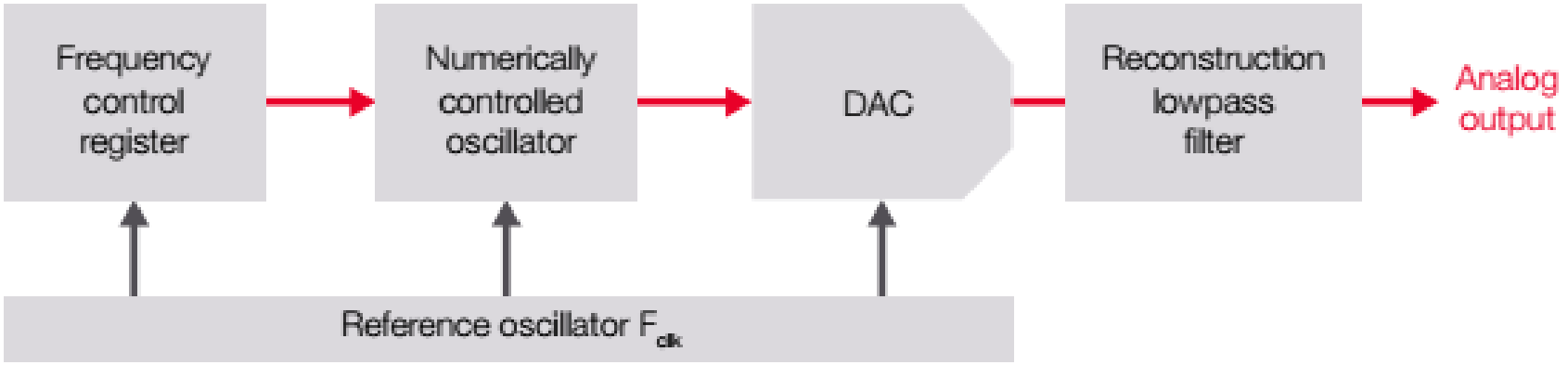



Упрощенная схема измерительного тракта ANA PNA-X с двумя генераторами – основной источник (Source) и гетеродин приемников (LO)

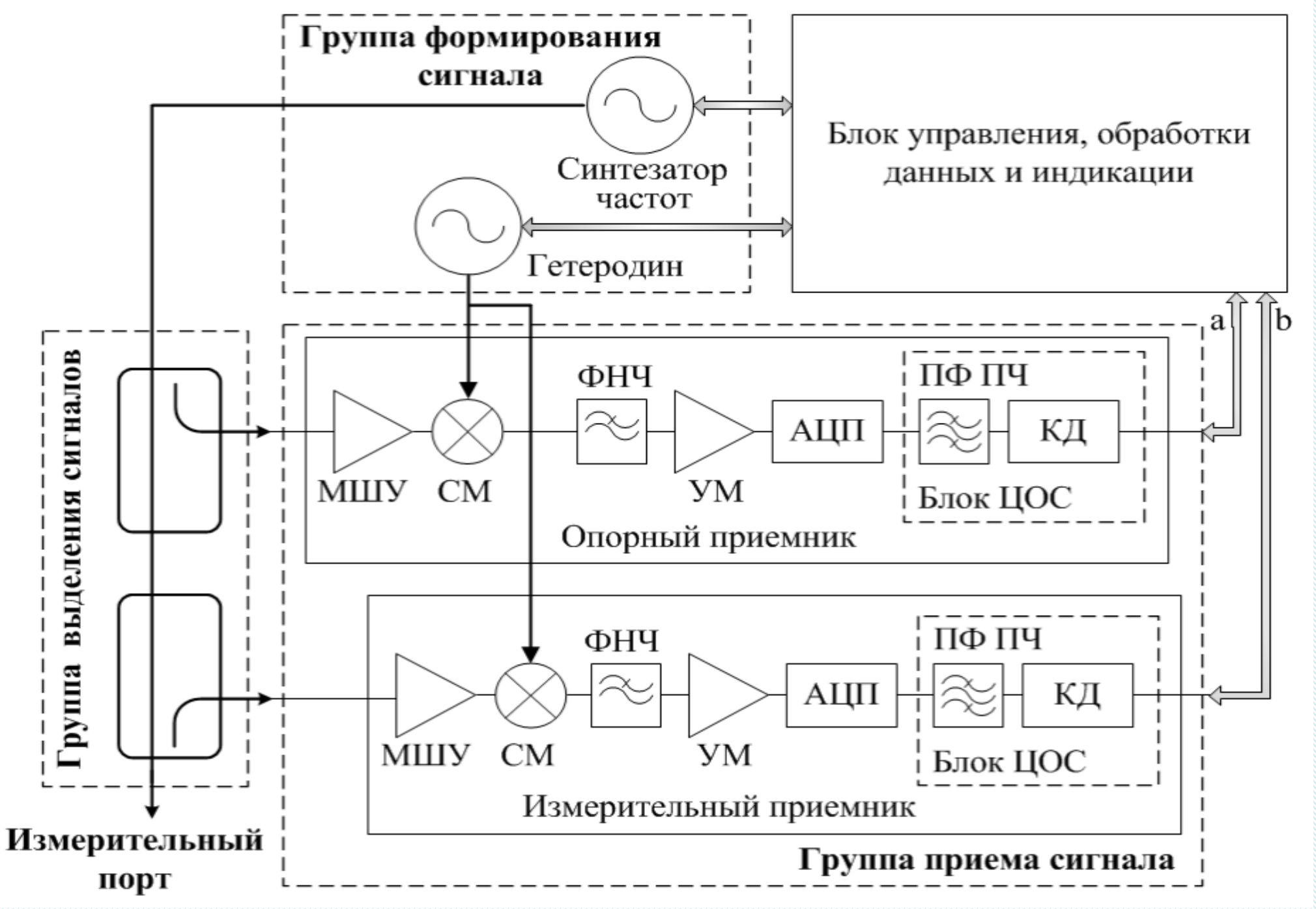
# Принципы построения генераторов в современных ВАЦ



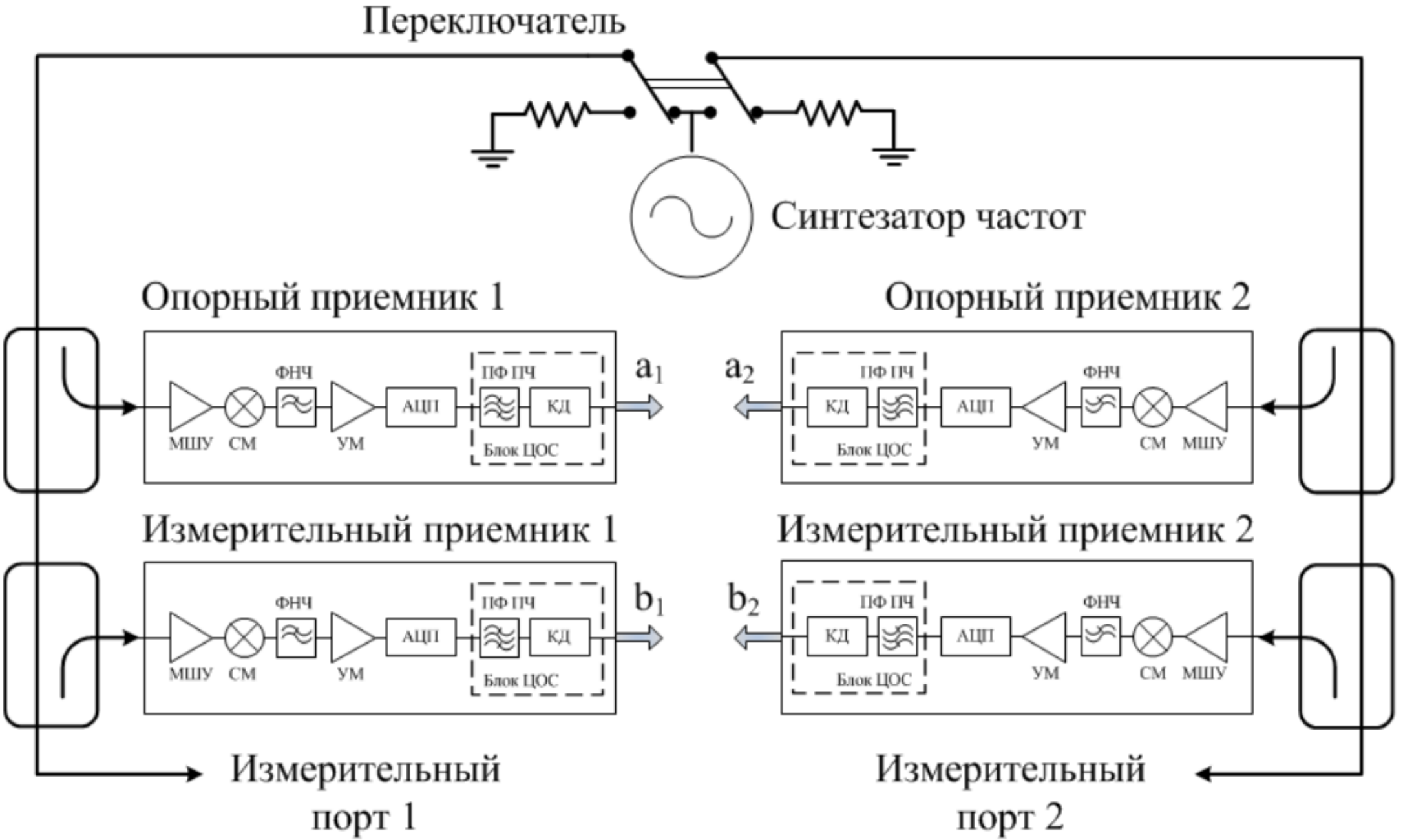

Традиционный синтезатор частоты с ФАПЧ. Дает заметный фазовый шум и побочные гармоники




Генератор с прямым цифровым синтезом (DDS) – меньше уровень фазового шума, ограниченный частотный диапазон

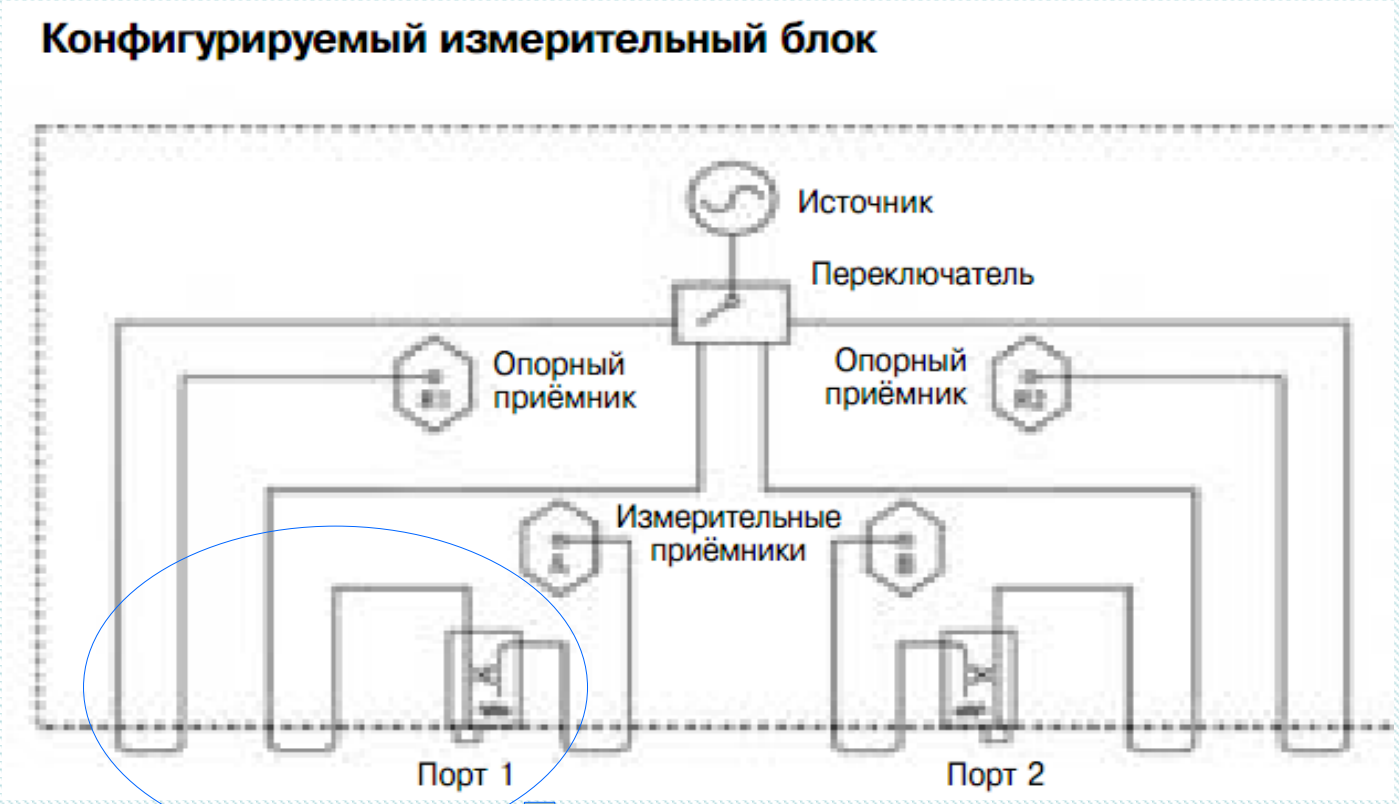



Полная структурная схема ВАЦ ( в режиме рефлектометра)




Полная структурная схема двухпор-тового ВАЦ (гетеродины преобразо-вателей частоты не показаны)

# Упрощенная структурная схема измерительного тракта двухпортового PNA с перемычками



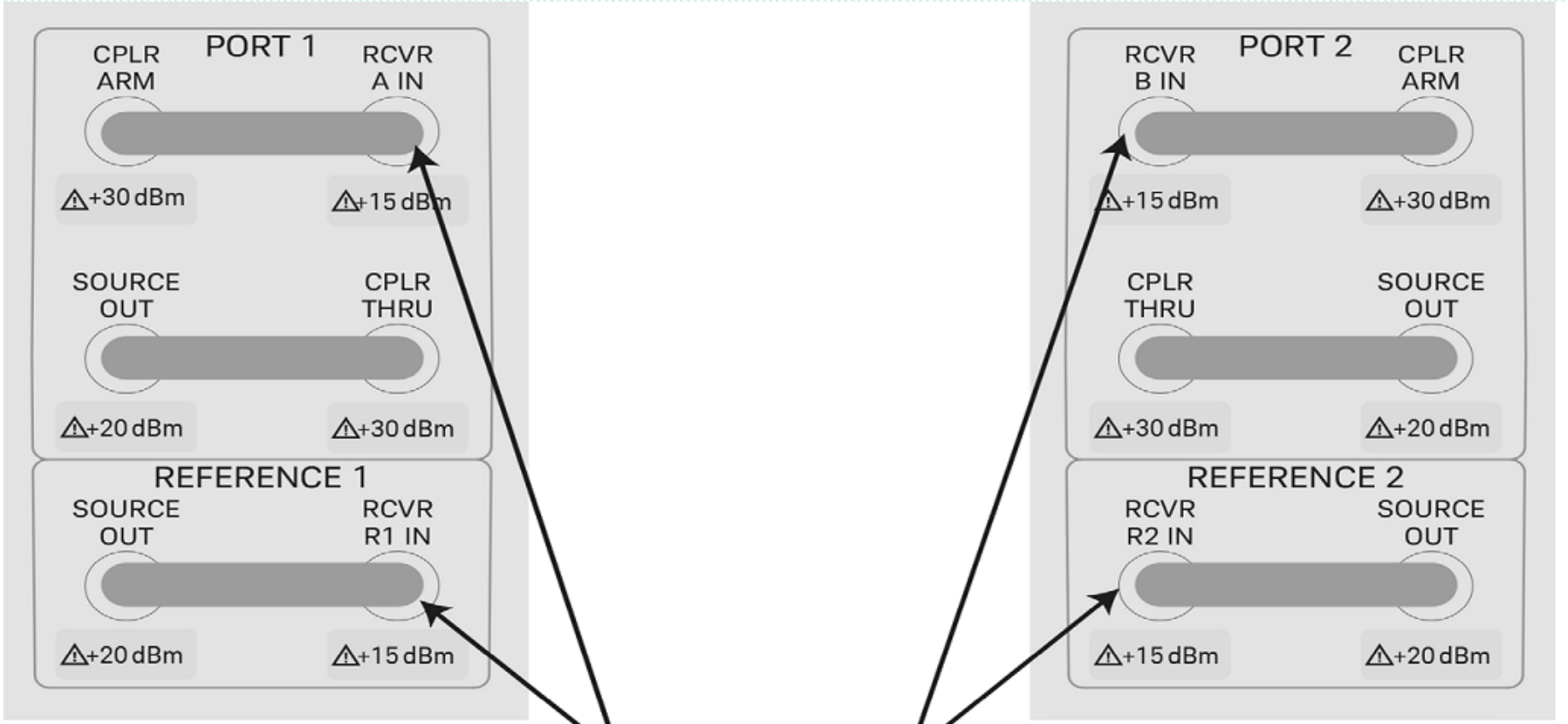




Измерительный тракт векторного автоматического анализатора СВЧ цепей Keysight серии PNA

Основной порт измерителя и выходы направленных ответвителей с перемычками

# Перемычки портов PNA с указанием предельных уровней мощности




Уровень точки компрессии на 0,1 дБ:
–15 дБм, тип. на частоте 20 ГГц
–25 дБм, тип. на частоте 50 ГГц

# Анализатор цепей в формате PXIe, M937XA

Компактное решение с высокой плотностью каналов

- Полноценный 2-х портовый анализатор цепей в 1-слотовом модуле PXI
- Выбор диапазона частот: от 300 кГц до: 4, 6.5, 9, 14, 20, 26.5 ГГц
- Лучшие характеристики PXI VNA :
  - Скорость измерений: 18-33 мс (401 точка)
  - Динамический диапазон : > 114 dB (9 GHz), > 98 dB (20 GHz)
  - Шум трассы: < 0.001 dB
  - Стабильность: 0.005 dB/°C




KEYSIGHT
M9214A
IF Digitizer
Status
KEYSIGHT
M9308A
Synthesizer
Status
100 MHz BP Out
RF Out
Trig 1
Trig 2
Sync
RF In
KEYSIGHT
M9365A
Downconverter
100 MHz In
Aux 2 In
+17 dBm 10 VDC Max
IF Out
1st LO In
Status
Ctrl In
Aux 1
2nd LO In
Ctrl Out
RF In 50Ω
KEYSIGHT
M9300A
Reference
Status
100 MHz Out 1
Trig 2
Out 5
OCXO Out
PXI

# 32 портовый ВАЦ до 26.5 ГГц в шасси PXI

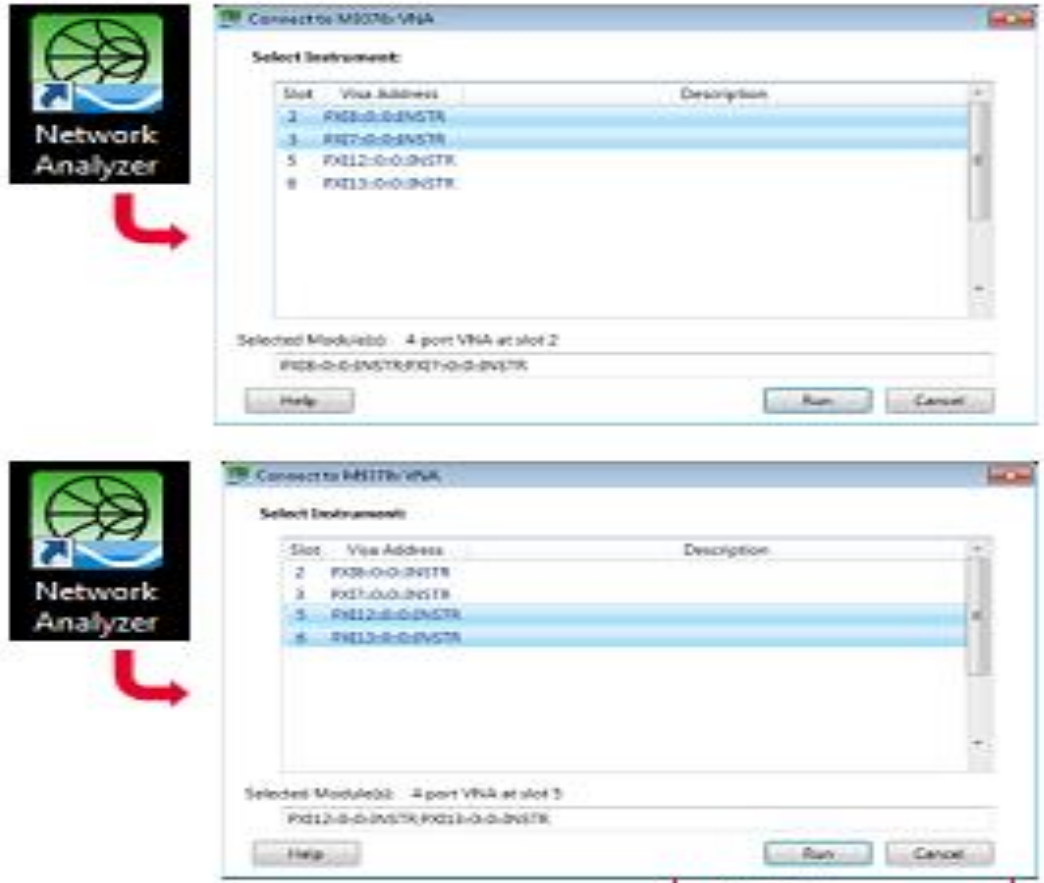


# Несколько независимых ВАЦ в одном шасси

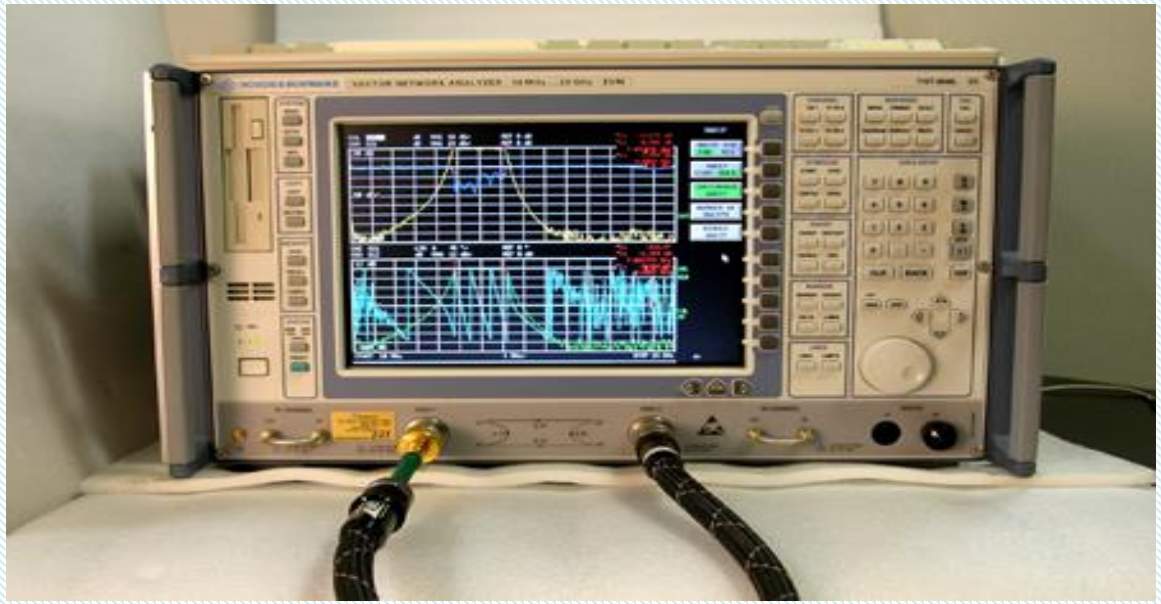
Объединение модулей в два независимых анализатора.




Можно запустить несколько программ одновременно.



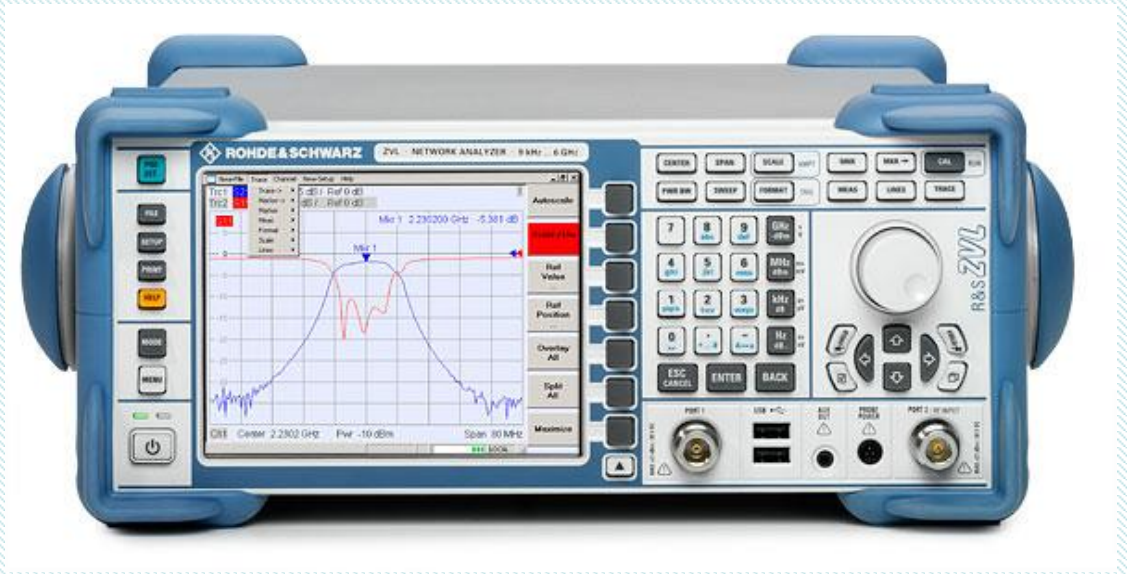
# Семейство анализаторов цепей Rohde & Schwarz ZVM, ZVA











# Семейство анализаторов цепей R&S

9 кГц | 300 кГц | 10 МГц | 3 ГГц | 4 ГГц | 6 ГГц | 8 ГГц | 14 ГГц | 20 ГГц | 40 ГГц

- ZVA40 (2 и 4 порта)
- ZVA24 (2 и 4 порта)
- ZVA8 (2 и 4 порта)
- ZVT20 (от 2 до 6 портов)
- ZVT8 (от 2 до 8 портов)
- ZVB20 (2 и 4 порта)
- ZVB14 (2 и 4 порта)
- ZVB8 (2, 3, 4 порта)
- ZVB4 (2, 3, 4 порта)
- ZVL6 (2 порта)
- ZVL3 (2 порта)

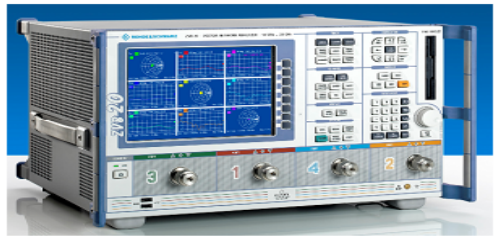
**Высший класс**





**Многопортовые и производительные**

**Универсальные**





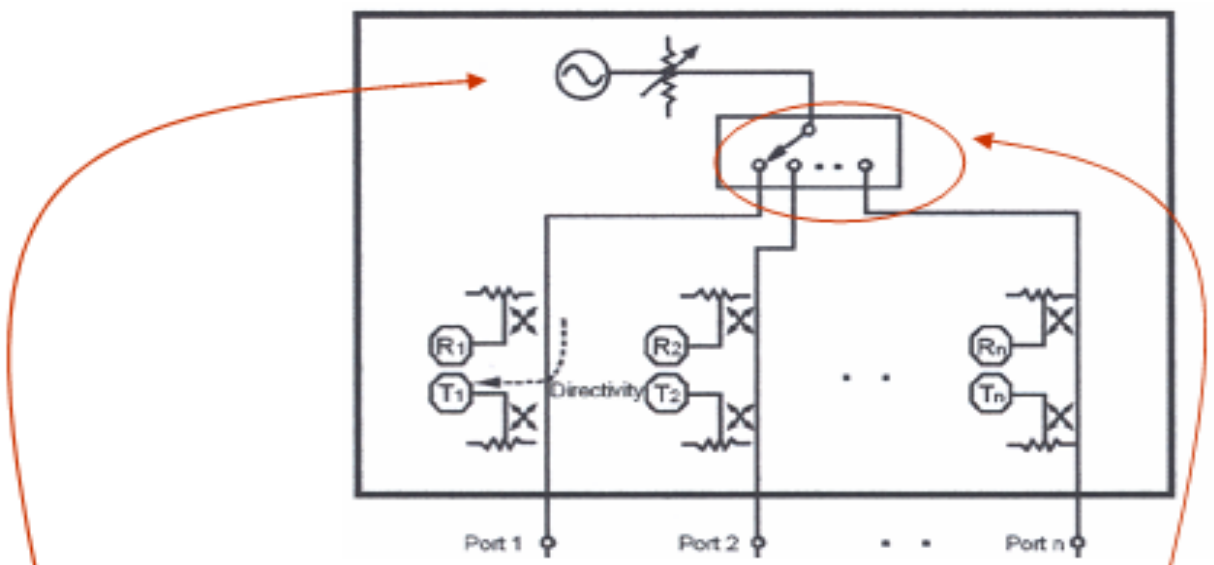
**Компактные и удобные**






ROHDE&SCHWARZ

# Стандартная конструкция аппаратной части анализатора цепей




R Эталонный приемник

T Измерительный приемник

Option 213, 214 : n = 2
Option 313, 314 : n = 3
Option 413, 414 : n = 4

- Один внутренний источник
- ВЧ-переключатель служит для распределения сигналов
  → за один раз сигнал подается на один порт

# Анализатор ZVL: анализ цепей и анализ спектров в одном устройстве





- Двунаправленные измерения
- От 9 кГц до 3 или 6 ГГц
- Динамический диапазон 123 дБ
- Все функции анализатора FSL
- Вес 7 кг, глубина 35 см
- Совместимость с программным обеспечением приборов ZVA/B/T

- **Не поддерживается:**
  преобразование частоты, прямой канальный доступ, балансные измерения и т.д.

# R&S ZVB: Гибкий универсальный прибор

- Обеспечивает все функции стандартного анализатора цепей
- Прибор среднего класса с очень хорошими характеристиками для этого сектора рынка
- Предназначен, в основном, для пассивных устройств
- Программные опции:
  - Временная область измерений
  - Измерение параметров смесителей и гармонические измерения



# Rohde & Schwarz ZNB8 Vector Network Analyzer



# Калибровочные модули




- Модули автоматической калибровки
  - Для анализатора ZVT8 с 8 портами
  - Калибровка подгрупп портов
  - Индикация текущей и рабочей температур
    → минимизация времени прогрева




| | | | |
|---|---|---|---|
| 2-портовый модуль | | | |
| N (f) | от 10 МГц до 18 ГГц | ZV-Z52 | 1164.0521.72 |
| 4-портовый модуль | | | |
| N (f) | от 300 кГц до 8 ГГц | ZV-Z51 | 1164.0515.70 |
| PC3.5 | от 300 кГц до 8 ГГц | ZV-Z51 | 1164.0515.30 |
| PC3.5 | от 10 МГц до 24 ГГц | ZV-Z52 | 1164.0521.30 |
| 8-портовый модуль | | | |
| N (f) | от 300 кГц до 8 ГГц | ZV-Z58 | 1164.0638.78 |
| PC3.5 | от 300 кГц до 8 ГГц | ZV-Z58 | 1164.0638.38 |

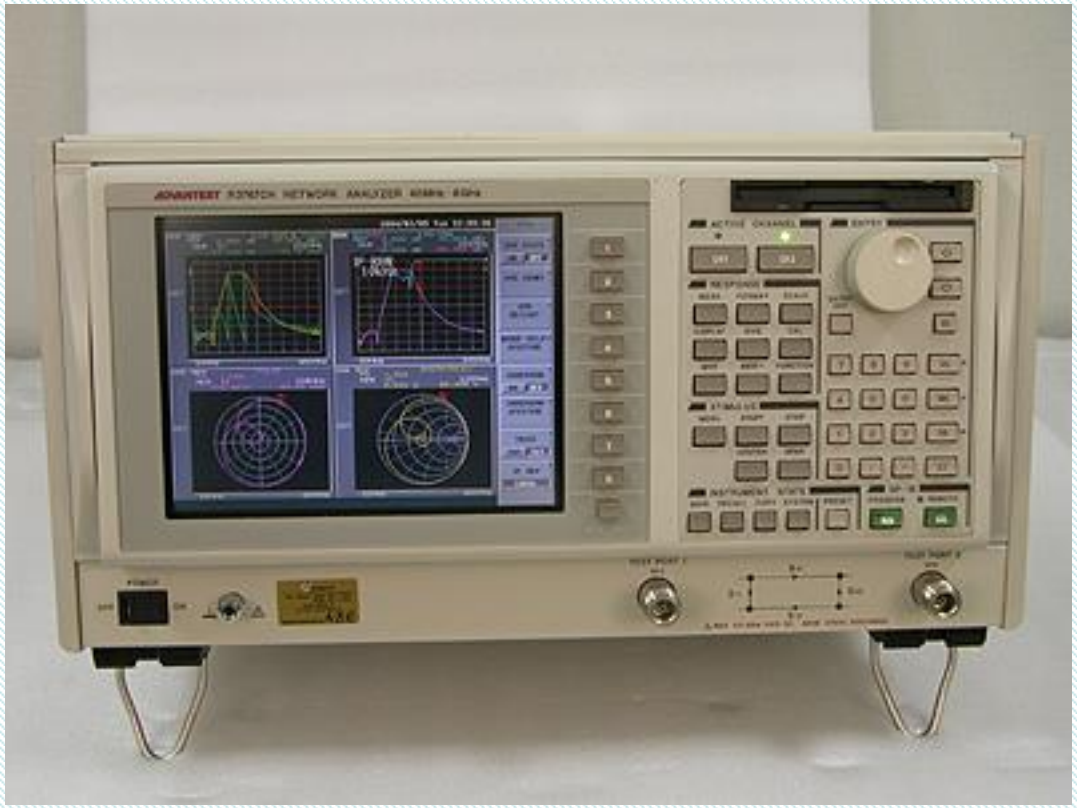
# Анализаторы Rohde & Schwarz до 110 ГГц (ZV-Z110), до 325 ГГц (ZV-Z325)

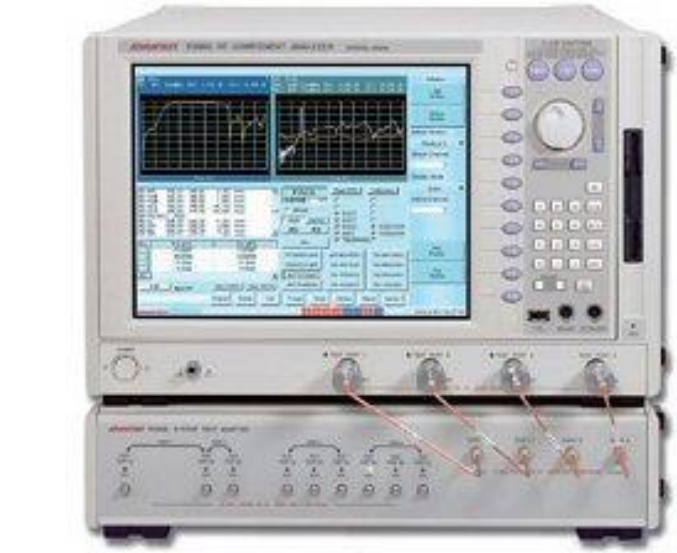


# Векторный анализатор цепей Tektronix TTR50



# Advantest ANA





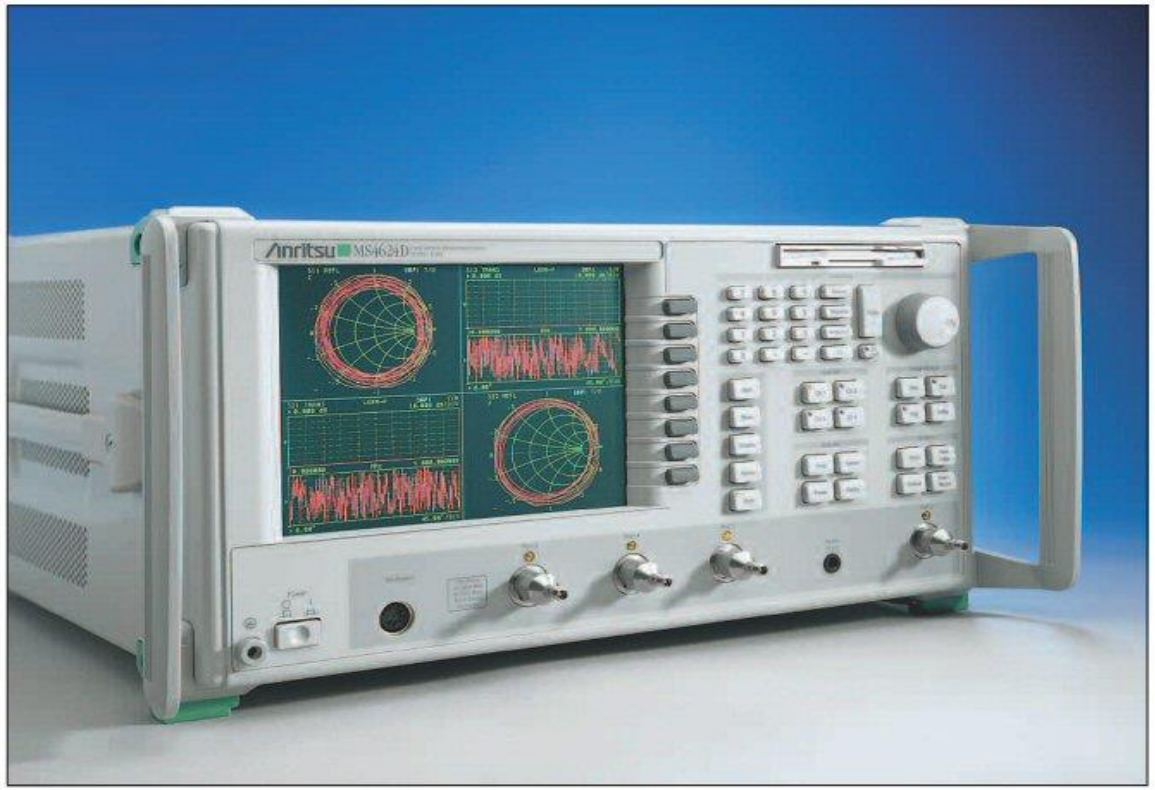
R3860+R3968 Component Analyzer +Multi-Port Test Set

# Anritsu - Wildron

MS4624A/B/C/D

Vector Network Measurement Systems

10 MHz to 9 GHz



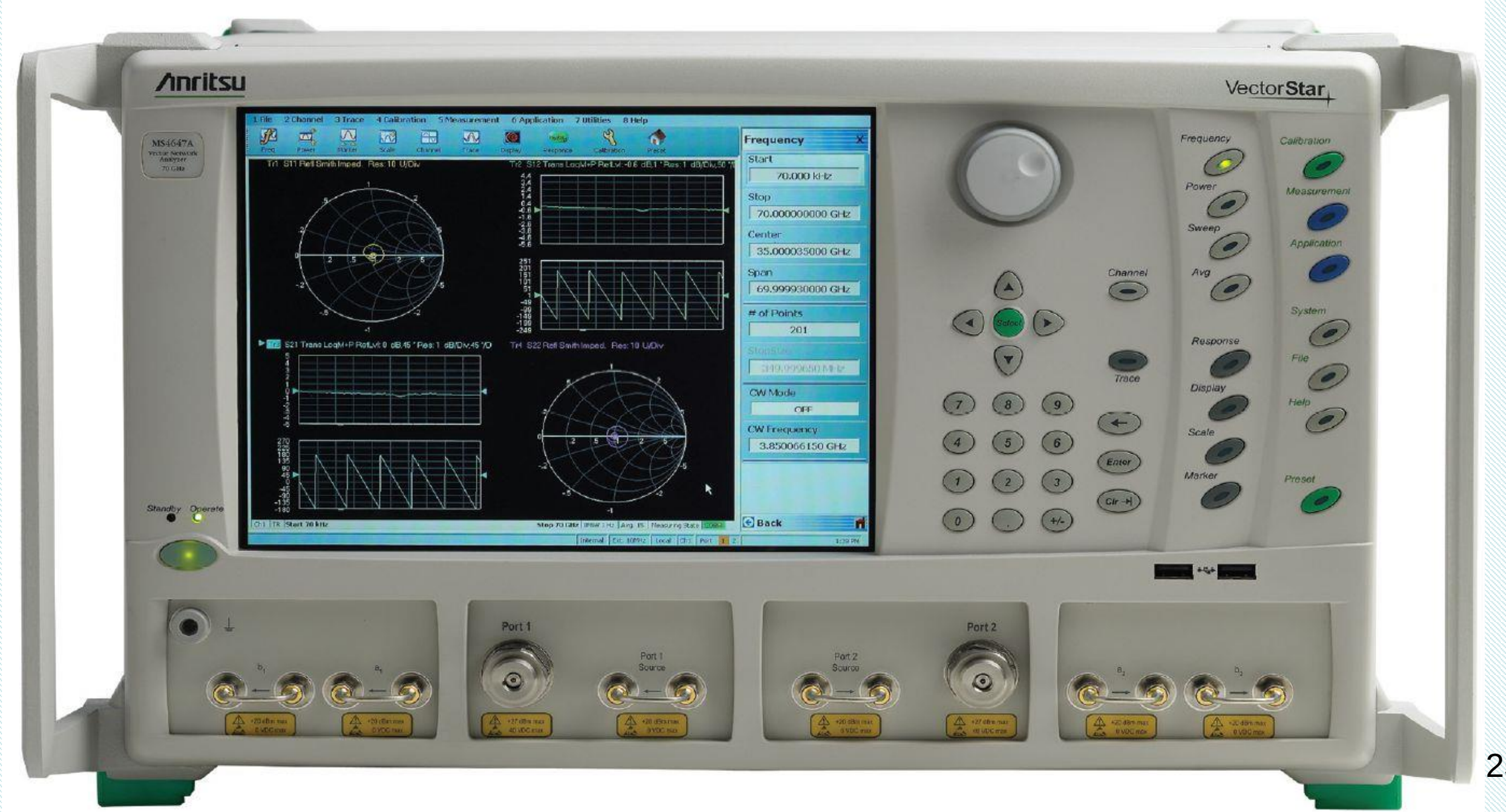

MS46524B — 4-х портовый векторный анализатор цепей серии Performance ShockLine.



**Anritsu**
MS2025B - портативный векторный анализатор цепей



# **Anritsu** Vector Network Analyzer VectorStar MS4642A



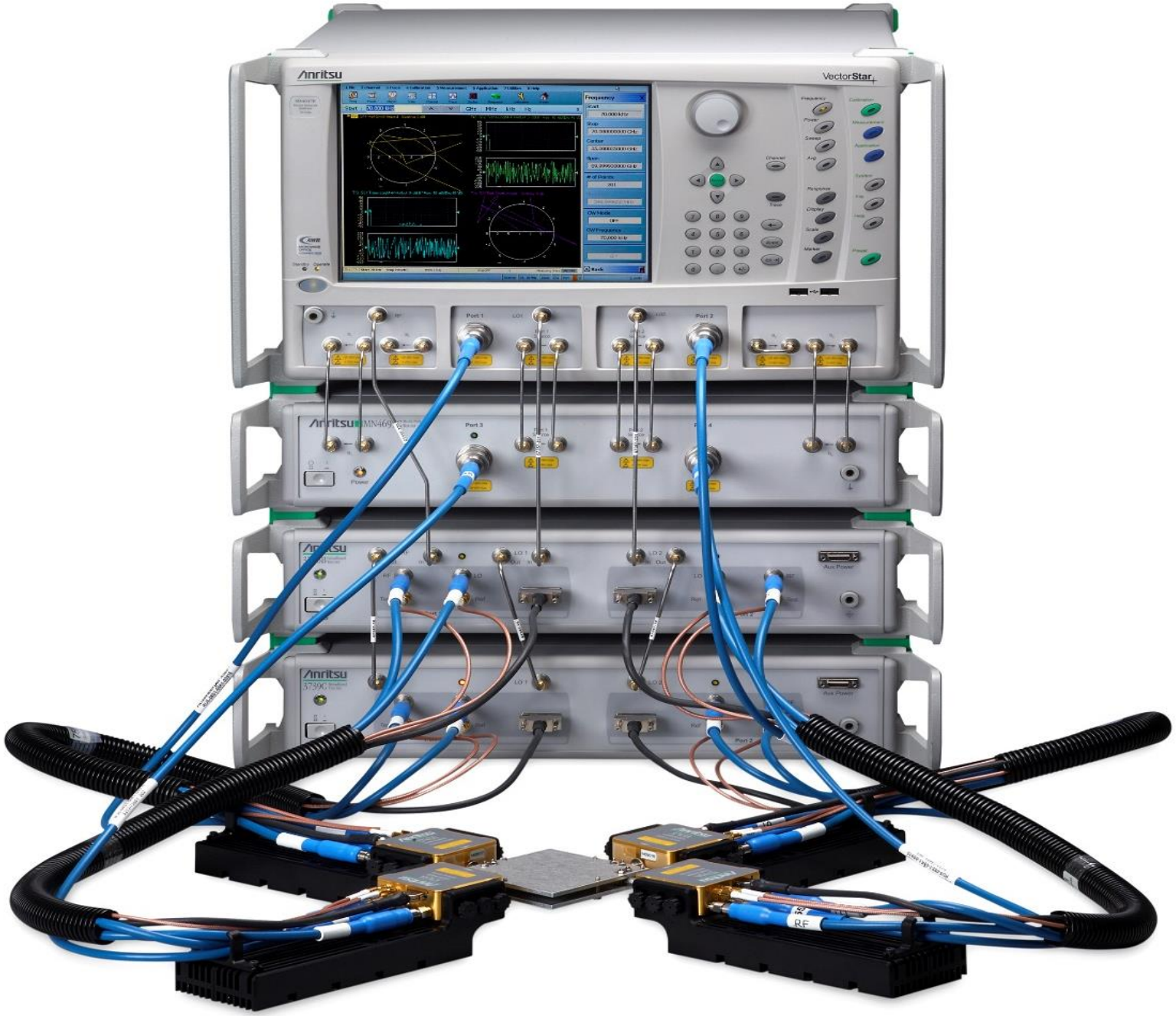
# Anritsu

Introduces

4-port

Broadband

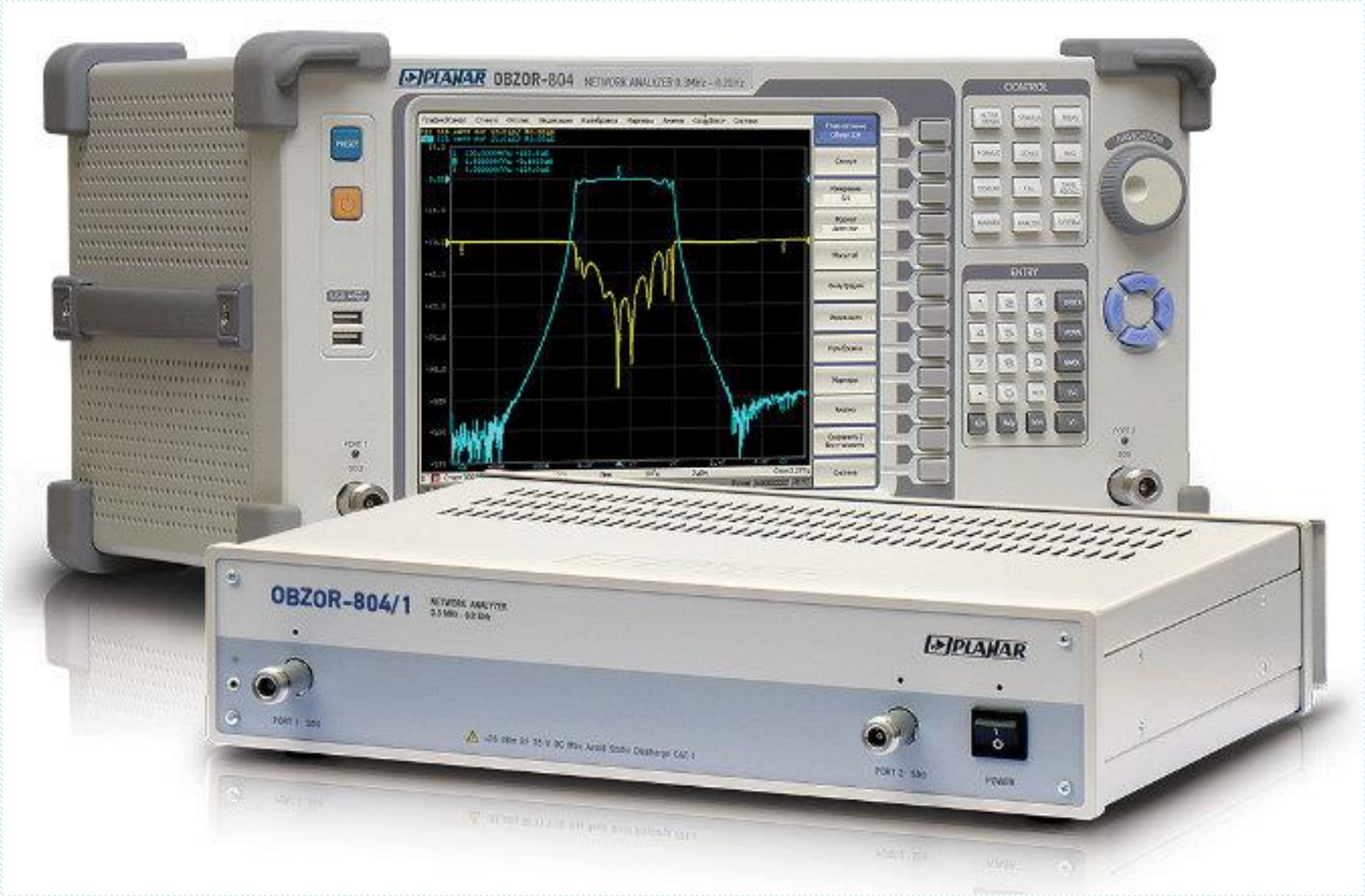
VNA System



# АКИП-6601 - векторный анализатор цепей



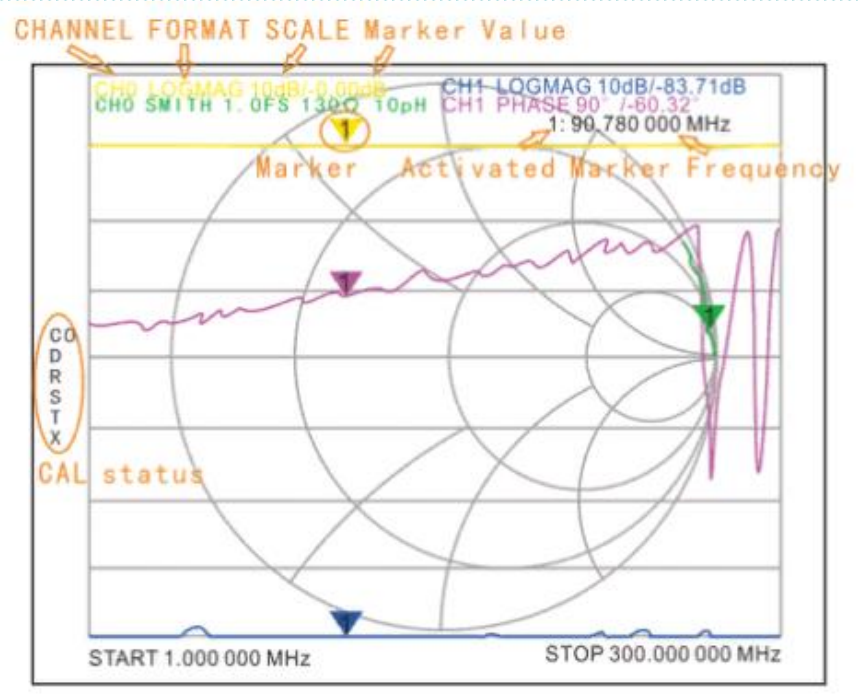
# ООО ПЛАНАР. Анализатор цепей OBZOR -804



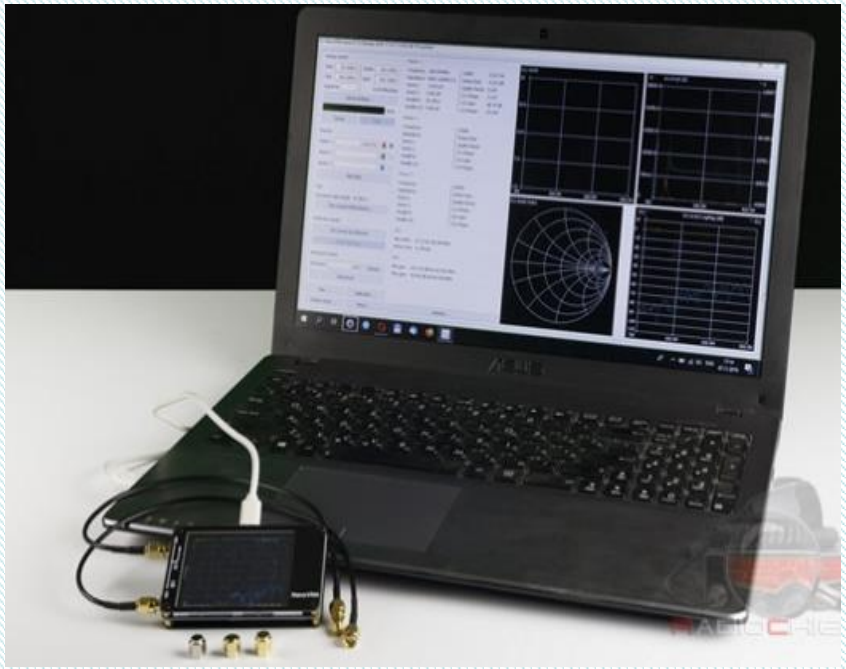
# Р4М-18 компактный векторный анализатор электрических цепей ООО Микран






**NanoVNA** – портативный бюджетный векторный анализатор цепей СВЧ в диапазоне 50 кГц…1500МГц. Предназначен для использования в радиолюбительской практике для настройки антенн, фильтров и пр. В настоящее время частотный диапазон расширен до 4 ГГц.



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

