



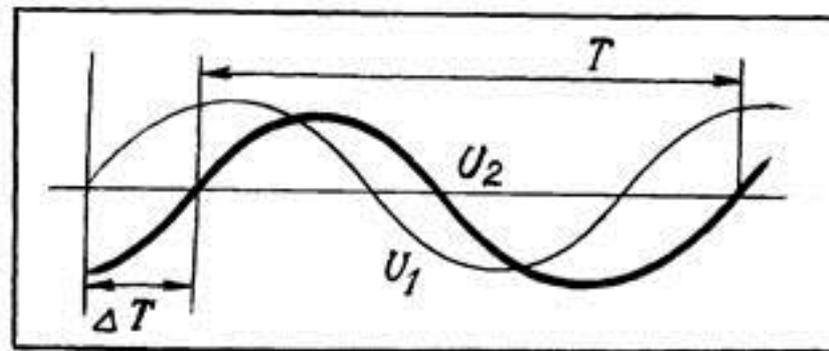
СИБИРСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

SIBIRIAN  
FEDERAL  
UNIVERSITY

[www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru)

## Метрология и радиоизмерения. Лекция 10

### Измерение фазовых сдвигов



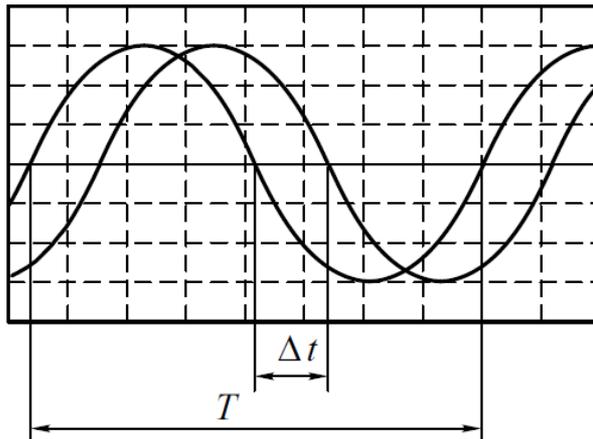
## Общие сведения о фазовом сдвиге

Под фазовым сдвигом в радиоизмерениях понимают разность начальных фаз двух гармонических сигналов одинаковой частоты. Для негармонических сигналов термин «фазовый сдвиг» заменяют понятием сдвига во времени (временная задержка). Для гармонических сигналов с одинаковой частотой  $\omega$  фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  равен:

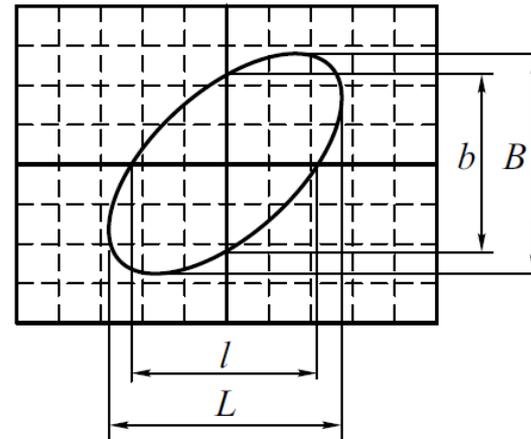
$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\pi f \Delta t = \frac{2\pi\Delta t}{T} = \frac{360^\circ \Delta t}{T}$$

Фазовый сдвиг между колебаниями принято выражать в градусах. Если он равен нулю, то такие колебания называют синфазными, если  $180^\circ$  – противофазными. Если фазовый сдвиг между колебаниями равен  $90^\circ$  – говорят, что сигналы находятся в квадратуре.

## Осциллографические методы



Метод линейной  
развертки

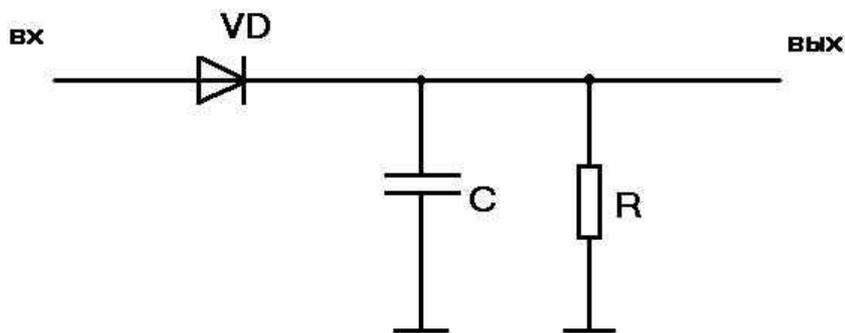


Метод эллипса

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ \Delta t}{T}$$

## Измерение разности фаз фазовыми детекторами

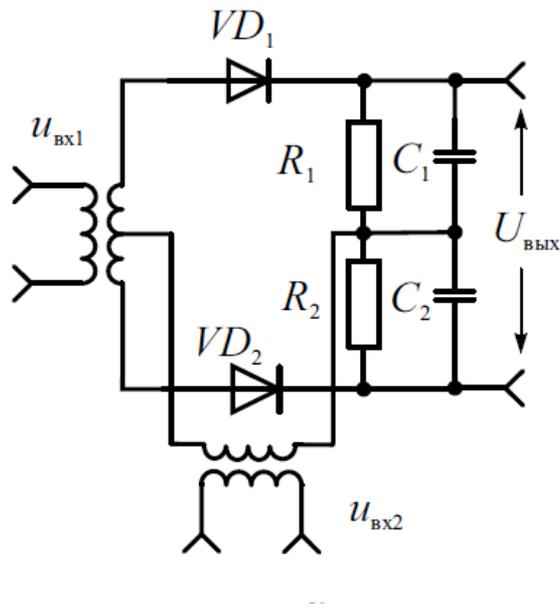
Фазовый детектор (ФД) – это измерительный преобразователь, который из двух входных сигналов формирует на выходе постоянное напряжение, функционально связанное с измеряемым значением фазового сдвига.



Амплитудный детектор

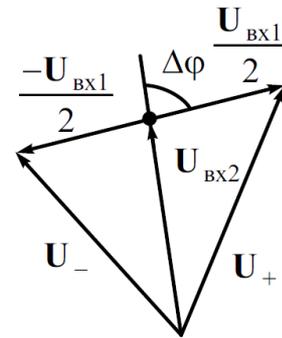
# Измерение разности фаз фазовыми детекторами

## Балансный ФД

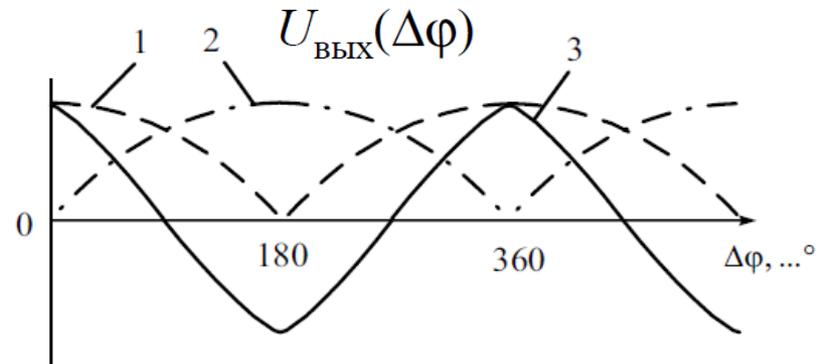


Фазовый детектор

$$U_{\text{вых}} = U_+ - U_-$$



Векторная диаграмма



Зависимость напряжений детектора от фазового сдвига:  
 1 -  $U_{\text{дет1}}$ , 2 -  $U_{\text{дет2}}$ , 3 -  $U_{\text{ВЫХ}}$

# Измерение разности фаз фазовыми детекторами ФД на основе логического элемента

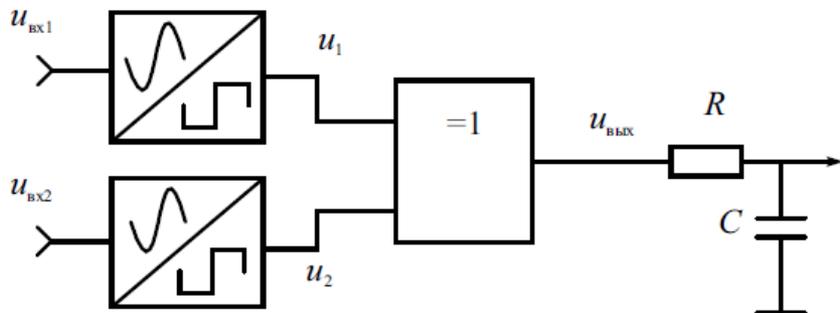
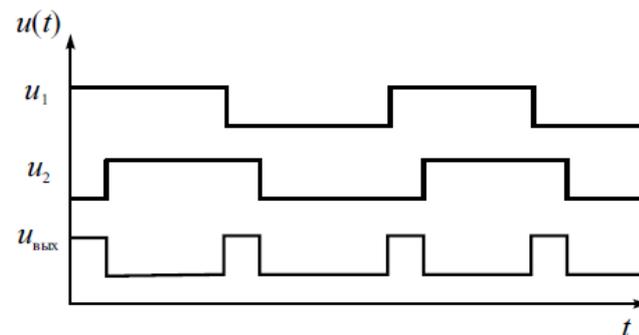


Схема ФД на основе логического элемента

Вх1	Вх2	Вых
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

*a*

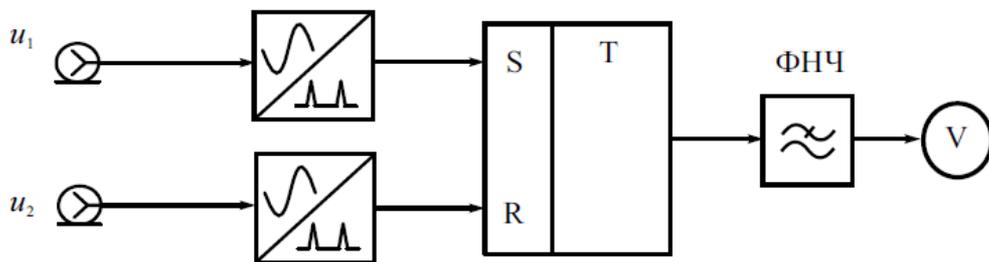


*б*

ФД на основе логического элемента: *a* – таблица истинности, *б* – временные диаграммы сигналов

# Преобразование фазового сдвига в напряжение

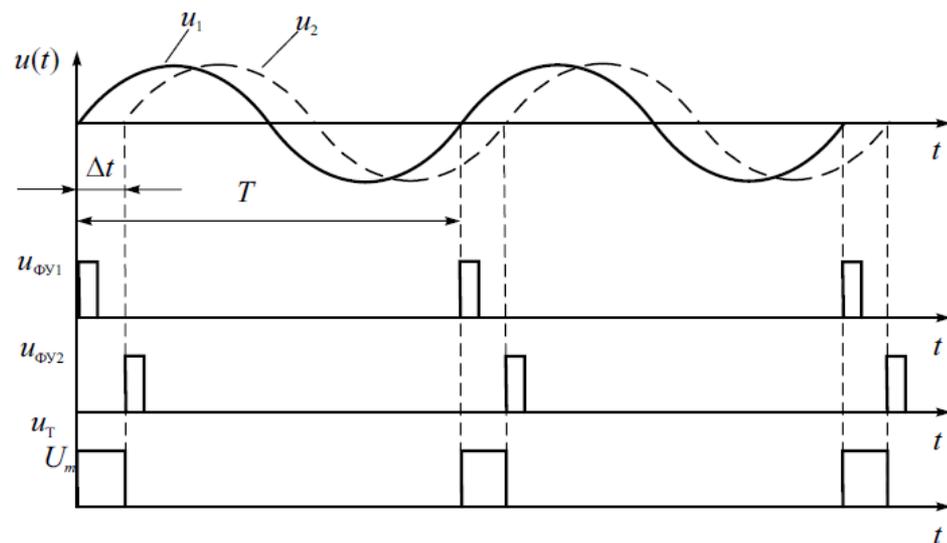
## Преобразователь фаза-напряжение



Преобразователь фаза-напряжение

Для построения аналоговых фазометров (приборов, измеряющих фазовый сдвиг) часто используют преобразование фазового сдвига в импульсы с длительностью, пропорциональной измеряемому  $\Delta\phi$  (преобразование фаза-время). Постоянная составляющая импульсов в свою очередь будет пропорциональна измеряемому фазовому сдвигу.

$$U_{\text{изм}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_T(t) dt = \frac{U_m \Delta t}{T} = \frac{U_m \Delta \phi}{360^\circ}$$



Временные диаграммы напряжений преобразователя фаза-время

## Преобразование фазового сдвига в напряжение Синхронный детектор

На более высоких частотах для преобразования фазового сдвига в напряжение часто используют *синхронные детекторы*. По принципу действия это преобразователи частоты на нулевую промежуточную частоту, причем у них величина выходного напряжения зависит от фазового сдвига между входными сигналами.

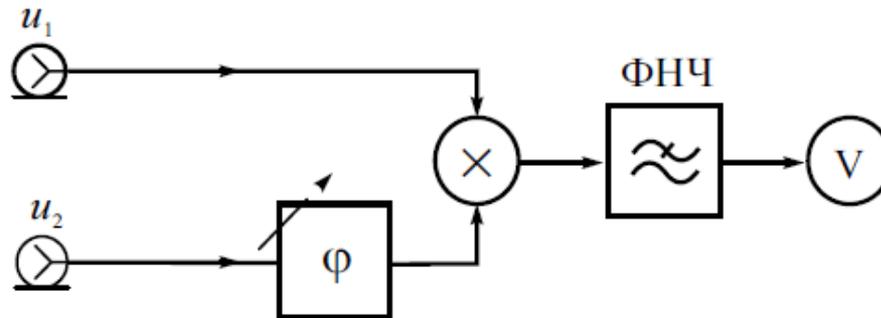
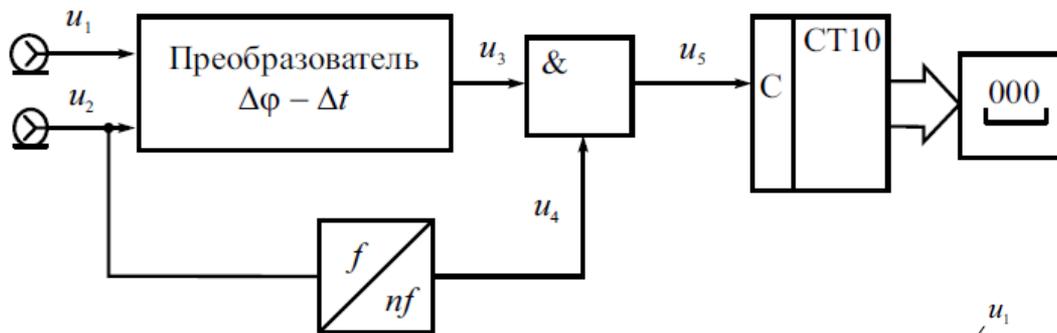


Схема преобразователя на основе синхронного детектора

$$U_{m1} \cos(\omega t + \Delta\varphi) \cdot U_{m2} \cos(\omega t) = \frac{U_{m1} U_{m2}}{2} (\cos(\Delta\varphi) + \cos(2\omega t + \Delta\varphi)).$$

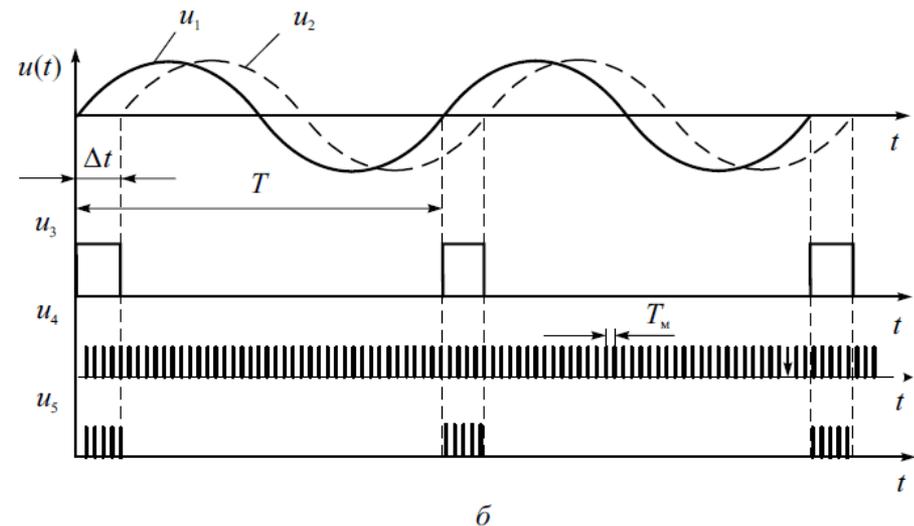
## Преобразование фазового сдвига во временной интервал



Более высокую точность измерения фазового сдвига с помощью преобразования фаза–время можно получить, измеряя длительность импульса, пропорциональную сдвигу фаз, методом дискретного счета.

$$n = 36 \cdot 10^m, \text{ где } m = 1, 2, 3, \dots$$

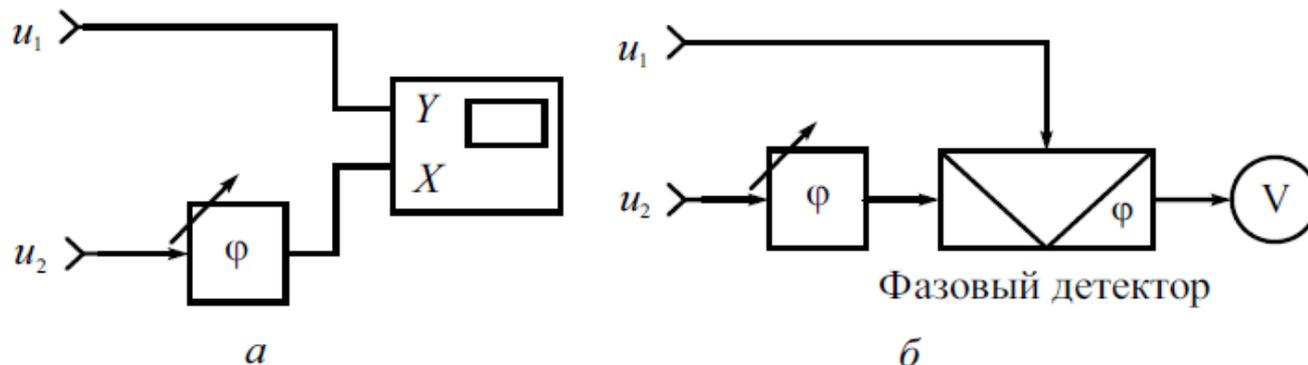
$$N = \frac{\Delta t}{T_M} = \frac{\Delta t}{T} n = \frac{\Delta \varphi}{360^\circ} n = \Delta \varphi \cdot 10^{m-1}$$



Измерение фазового сдвига за один период сигнала:  
 а – структурная схема, б – временные диаграммы напряжений

## Компенсационный метод измерения фазового сдвига

В настоящее время компенсационный метод измерения фазового сдвига применяют, в основном, в СВЧ-технике. Метод заключается в сравнении измеряемого фазового сдвига с фазовым углом образцового фазовращателя.



### Компенсационный метод измерения фазового сдвига

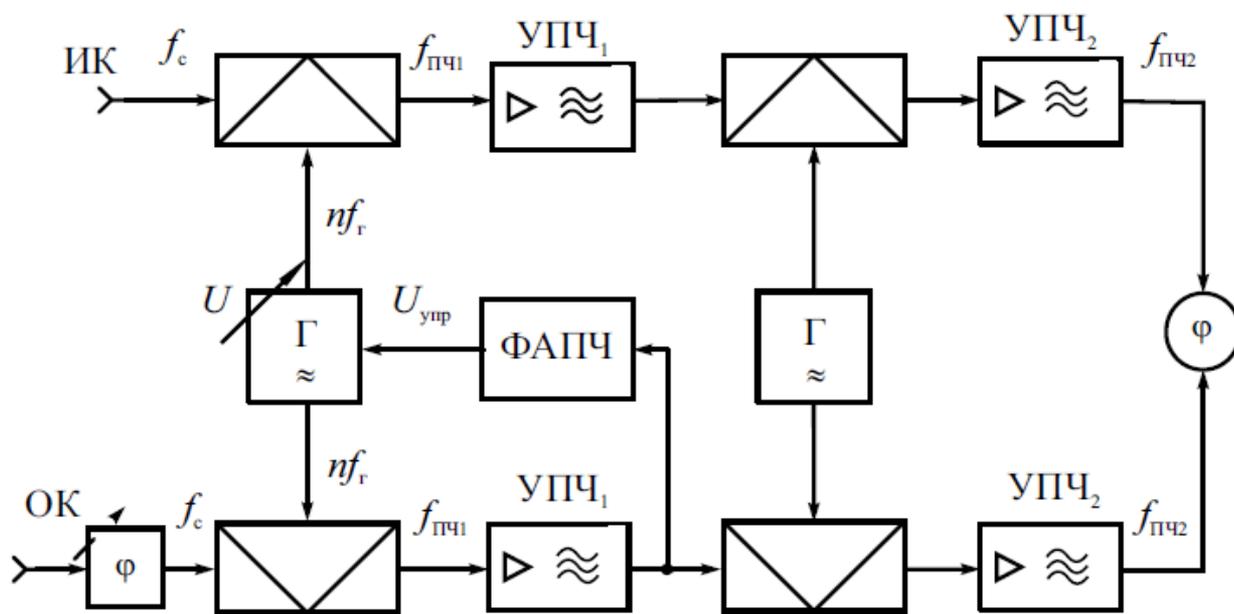
Для калибровки входы измерительной схемы соединяют и на них подают любое из входных напряжений. Затем производят установку фазовращателя в положение  $\varphi_{\text{ФВ0}}$ , соответствующее нулевому показанию устройства сравнения. Далее на входы подают исследуемые сигналы, и фазовращатель устанавливают в новое положение  $\varphi_{\text{ФВ}}$ , при котором устройство сравнения опять покажет нулевое значение.

Измеряемый фазовый сдвиг равен:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{ФВ}} - \varphi_{\text{ФВ0}}$$

## Измерение фазового сдвига с преобразованием частоты

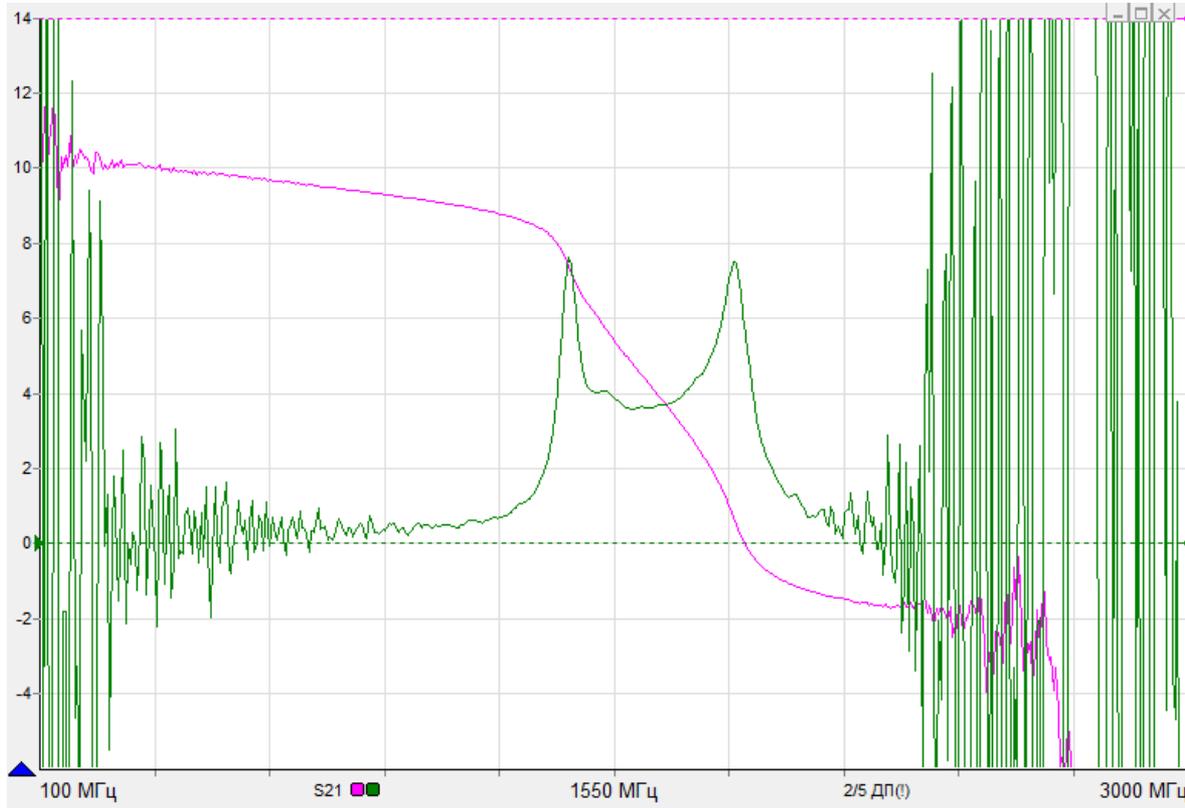
Для измерения фазы на СВЧ применяют преобразование частоты сигналов вниз с сохранением информации о фазовом сдвиге между ними.



$$f_c - nf_\Gamma = f_{\text{ПЧ1}}$$

Структурная схема СВЧ-фазометра  
с преобразованием частоты

## Измерение группового времени запаздывания



$$\Gamma_{\text{ВЗ}} = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{df} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\varphi}{\Delta f}$$