

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Владимирский государственный университет**  
**имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**  
**(ВлГУ)**

**ЛЕКЦИИ**  
**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Электрорадиоизмерения»**

для специальности среднего профессионального образования  
технического профиля  
**11.02.01 Радиоаппаратостроение**

## СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1: Измерение интервалов времени и фазовых сдвигов

Лекция 2: Измерение частоты (частотомеры)

Лекция 3: Измерение напряжения и тока

Лекция 4: Цифровые вольтметры

Лекция 5: Измерение мощности

Лекция 6: Исследование формы сигналов (Осциллографы)

Лекция 7: Анализ спектра и нелинейных искажений сигнала

Список литературы

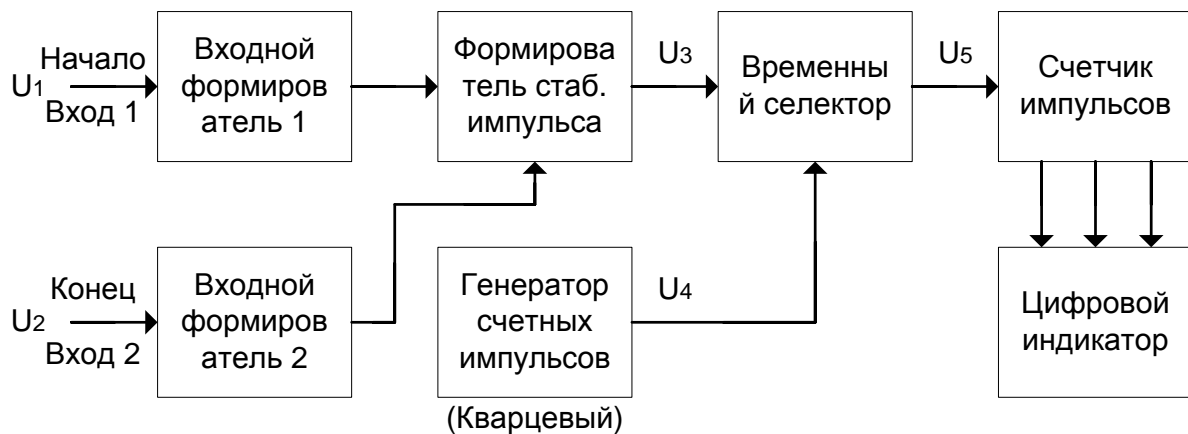
## ЛЕКЦИЯ: ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ И ФАЗОВЫХ СДВИГОВ

### 1. ИЗМЕРИТЕЛИ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ (ИВИ)

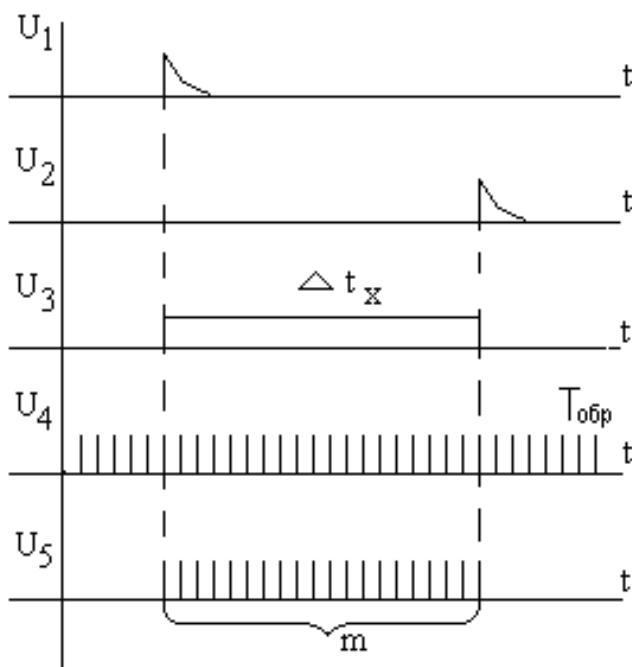
Методы измерения временных интервалов можно разделить на:

- осциллографические (методы калиброванных разверток, калиброванных временных меток, калиброванной задержки);
- цифровые (методы дискретного счета и интерполяции).

**Метод дискретного счета** (последовательного счета) при аппаратном разделении импульсов начала и конца измеряемого интервала времени представлен в виде структурной схемы (рис. 1) и поясняющих временных диаграмм (рис. 2). В основе работы лежит сравнение измеряемого интервала  $\Delta t_x$  с дискретным интервалом, воспроизводящим единицу времени,  $T_{обр} = T_{сч}$ . Оценивается во сколько раз измеряемый интервал  $\Delta t_x$  больше  $T_{сч} = 1/F_{сч}$ .



**Рис. 1**



**Рис. 2**

Входные формирователи адаптируют уровни импульсов начала и конца измеряемого интервала времени. Формирователь стробующего импульса вырабатывает «ворота» счета  $\Delta t_x$ , заполняемые с помощью временного селектора (схемы «И») счетными импульсами кварцевого генератора. Число  $m$  определяет счетчик:

$$\Delta t_x = m T_{сч}$$

Для прямых показаний выбирается  $T_{сч} = 10^{-k} \text{ с}$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$

Например, для удобства прямого счета импульсов триггерным счетчиком можно выбрать  $T_{сч}$  равным 100 или 10 нс.

Метод может применяться для измерения длительности импульса, который следует подавать на вход временного селектора в качестве  $U_3$ .

Возможно измерение периода колебания с предварительным формированием импульса  $T_x$ .

Структура погрешности измерения:

1. Погрешность меры – инструментальная погрешность, обусловленная нестабильностью частоты следования импульсов счета. Ее величина полностью определяется возможностями генератора с кварцевой стабилизацией. Реально величина относительной погрешности

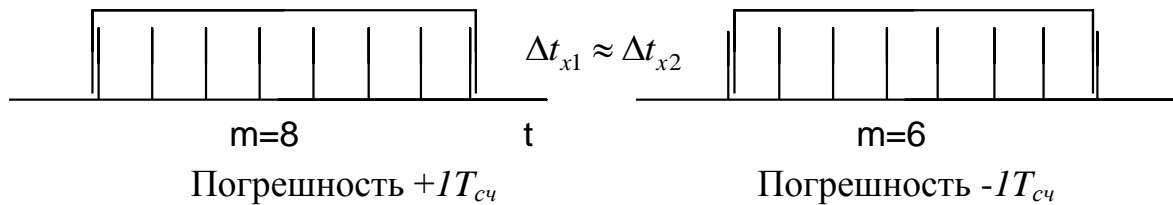
$$\delta_{кв} \in (10^{-5} \dots 10^{-8}).$$

2. Погрешность преобразования – инструментальная погрешность из-за неточности формирования временных ворот. Определяется шумами и нестабильностью порога срабатывания формирователей 1, 2 и формирователя стробирующего импульса. Абсолютная погрешность оценивается как разность длительностей реального и идеального импульса ворот:

$$\Delta_{зан} = \Delta t_x^* - \Delta t_x.$$

3. Погрешность сравнения – методическая погрешность обусловленная тем, что в общем случае измеряемый интервал  $\Delta t_x$  не равен целому числу периодов  $T_{сч}$ . Это погрешность дискретизации (квантования), равная  $\pm T_{сч}$ .

Пример приведен на рис. 3. Здесь при фактической длительности  $7T_{сч}$  ошибка достигает  $\pm T_{сч}$ .



**Рис. 3**

Максимальная абсолютная погрешность дискретизации  $\pm T_{сч}$ . Относительная погрешность зависит от измеряемого интервала  $\Delta t_x$ :

$$\delta_q = \pm (T_{сч} / \Delta t_x) = \pm 1/m.$$

Все названные погрешности случайные. Предел допускаемой основной погрешности по максимуму

$$\delta_{пред} \pm (\delta_{кв} + \delta_{зан} + 1/m).$$

Обычно величиной  $\delta_{зан}$  пренебрегают, тогда  $\delta_{кв}$  влияет при измерении больших длительностей ( $m$  велико), а  $\delta_q$  – при измерении малых  $\Delta t_x$ . При измерении малых  $\Delta t_x$  приходится увеличивать частоту  $F_{сч}$ , измерять  $\Delta t_x$  в течении нескольких интервалов (измерение  $n\Delta t_x$  с последующим делением на  $n$ ), проводить интерполяцию на неполных отрезках  $T_{сч}$ .

### Метод интерполяции

В современных приборах, например в ЧЗ-64, построенном на основе МПС, различные функции (измерения интервалов времени, частоты и периода) реализуются на единой основе с применением интерполяционной техники, позволяющей существенно уменьшить погрешности квантования.

Структурная схема ЧЗ-64 представлена на рис. 4.

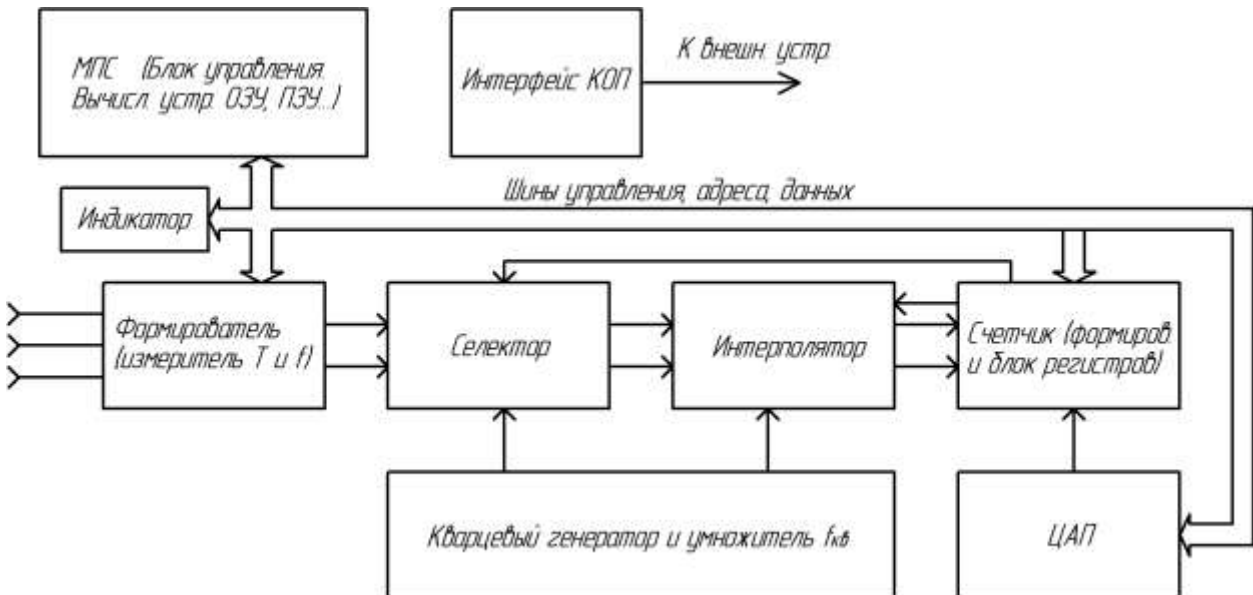


Рис. 4

Формирователь содержит усилители, ограничители, делители частоты, и коммутатор. Прибор имеет входы:

- А – для измерений в диапазоне частот от 0,005 Гц до 150 МГц;
- Б – для измерений отношений, суммы, разности и т.д.;
- В – для измерений в диапазоне частот до 1500 МГц (с делителем).

Работа во всех режимах основана на формировании и измерении интервала времени с последующим вычислением нужных пользователю параметров сигнала. Измеряемый интервал  $t_x$  квантуется метками времени через 10 нс (частота 100 МГц). При измерении частоты формируемый интервал соответствует целому числу периодов исследуемого сигнала.

Измеряемый интервал определяется по формуле (см. рис. 5):

$$\Delta t_x = t_x = t_0 + t_1 - t_2,$$

где  $t_0 = m_0 T_{cч}$  – интервал между вторым от начала (старта) и вторым от конца (стоп) тактовыми импульсами;  $t_1$  – интервал между началом и вторым тактовым импульсом;  $t_2$  – интервал между концом и вторым тактовым импульсом.

Селектор формирует интервалы времени  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ . В интерполяторе импульсы  $t_1$  и  $t_2$  расширяются в 128 раз для последующего измерения методом счёта с дискретом 10 нс (как и основной интервал  $t_0$ ). В результате интерполяции разрешающая способность с 10 нс повышается до 0,1 нс (соответствует 10 ГГц заполнению). Счетчик считает тактовые импульсы в интервале  $t_0$ , а также в расширенных интервалах  $t_1$  и  $t_2$ .

Интегратор содержит два канала ( $t_1$  и  $t_2$ ), неидентичность (рассогласование) которых приведет к погрешности измерения. В приборе предусмотрен режим калибровки сдвига интерполяторов, осуществляемый автоматически при включении прибора, а также по желанию оператора. При этом определяется поправочное число, которое подается в ОЗУ для введения поправки.

Вычислительное устройство (МПС) осуществляет обработку с учетом поправочного числа

$$t_x = 10 \left[ m_o + (m_1 - m_2 - \Delta m) / 128 \right],$$

где  $\Delta m$  – поправочное число, учитывающее рассогласование интерполяторов, определяемое в процессе калибровки.

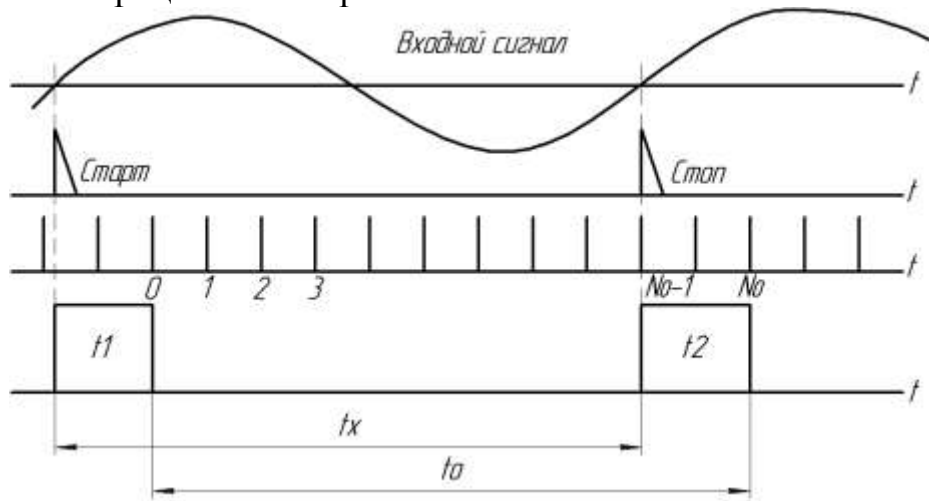


Рис. 5

С помощью ЦАП осуществляется установка требуемого уровня запуска. Кварцевый генератор формирует счетные импульсы с погрешностью  $1 \cdot 10^{-8}$  после прогрева в 2 часа. Температурный коэффициент частоты  $10^{-9}/1^\circ\text{C}$ .

Аналоговый интерполятор построен на основе прецизионного интегратора. Временные диаграммы работы интерполятора приведены на рис. 6.

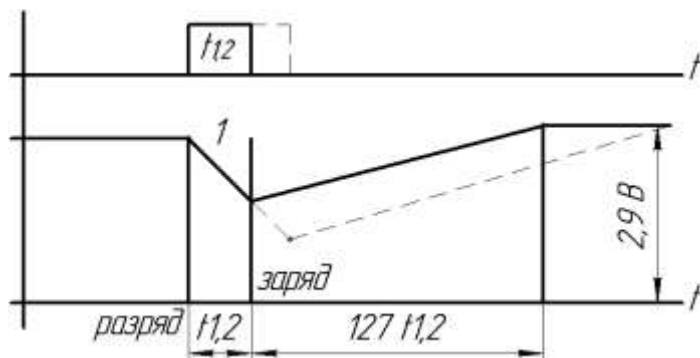


Рис. 6

При поступлении на вход расширителя импульса  $t_{1,2}$  происходит быстрый разряд конденсатора стабильным током  $I_{\text{разр}}$ . По окончании  $t_{1,2}$  конденсатор заряжается медленно стабильным током  $I_{\text{зар}} = \text{const}$ ,  $I_{\text{зар}} \ll I_{\text{разр}}$  (примерно в 127 раз). Пороговая схема, на которую подается исходный уровень, вырабатывает расширенный импульс.

При калибровке устанавливается  $t_1 = t_2 = 20$  нс и измеряются расширенные импульсы.

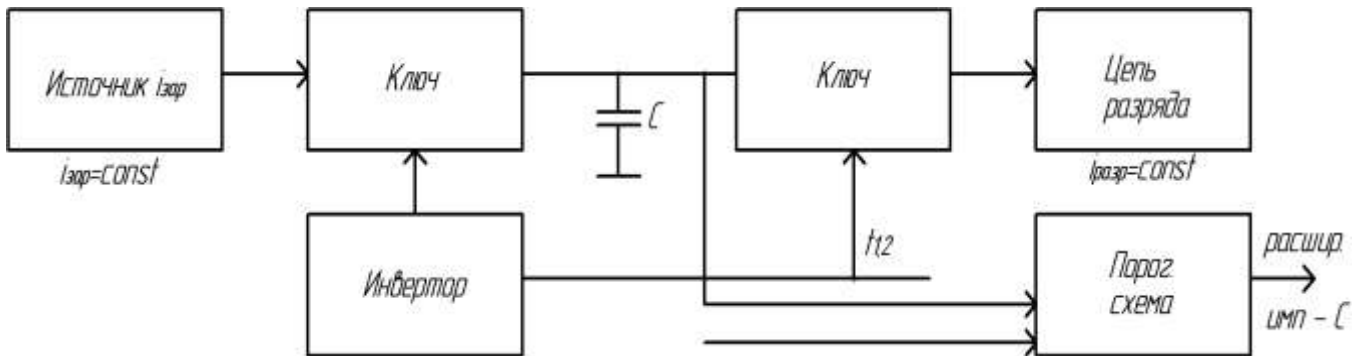


Рис. 7

Благодаря наличию МПС прибор позволяет проводить измерения с обработкой по формуле  $P = \pm AX \pm B$ , где  $X$  – результат прямого измерения,  $A$  и  $B$  устанавливаются оператором от  $10^{-16}$  до  $10^9$  с любым знаком.

## 2. ИЗМЕРИТЕЛИ ФАЗОВОГО СДВИГА – ФАЗОМЕТРЫ (Ф2)

Фаза характеризует гармонический процесс, в практике радиоизмерений обычно решают задачу измерения разности фаз двух гармонических колебаний с равными частотами:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2; \quad (U_{1,2} = U_{m1,2} \sin(\omega t + \varphi_{1,2}))$$

Для негармонических колебаний фазовый сдвиг заменяют понятием сдвига во времени – время задержки.

Методов измерений много:

1. Осциллографические (на основе меток времени или линейной развертки).

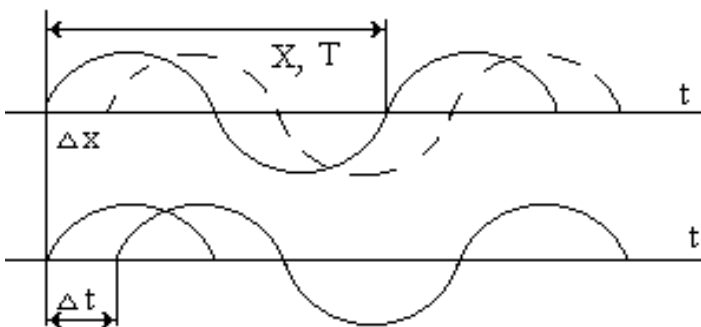


Рис. 8

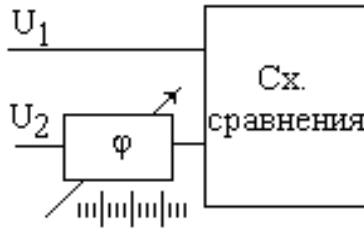
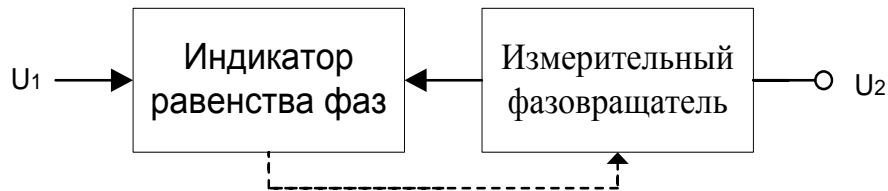
Наиболее просто измерить с помощью двухканального осциллографа:

$$\Delta\varphi = 360^\circ \Delta t / T = 360^\circ \Delta x / X$$

;

Погрешность  $2...5^\circ$  определяется разрешающей способностью осциллографа. Диапазон частот также ограничивается осциллографом.

2. Компенсационные (на основе сравнения измеряемого фазового сдвига с эталонным, создаваемым регулируемым фазовращателем).



а)

б)

Рис. 9

Могут применяться автокомпенсационные схемы. Диапазон частот очень широкий, включает СВЧ. Точность на порядок выше  $0,2 \dots 0,5^\circ$ .

3. С преобразованием фазового сдвига в напряжение (используется фазовый детектор), во временной интервал и др. Измерение разности фаз может осуществляться триггерным фазометром. Опорный и исследуемый сигналы, сдвинутые на измеряемую разность фаз  $\varphi_x$ , поступают на входы фазового детектора (рис. 10), вначале на входы триггеров Шмитта, формирующих импульсы запуска.

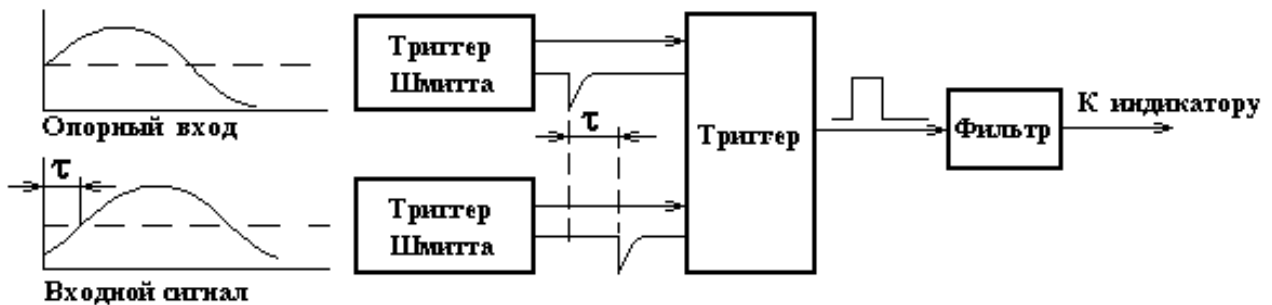


Рис. 10

Сформированные остроконечные импульсы отрицательной полярности запускают триггер фазового детектора. Длительность импульса на выходе триггера и постоянное напряжение на выходе фазового детектора пропорциональны разности фаз между опорным и исследуемым сигналами.

4. Цифровые фазометры, работающие по методу дискретного счета.

Рассмотрим фазометр с жесткой логикой с преобразованием сдвига фазы во временной интервал.



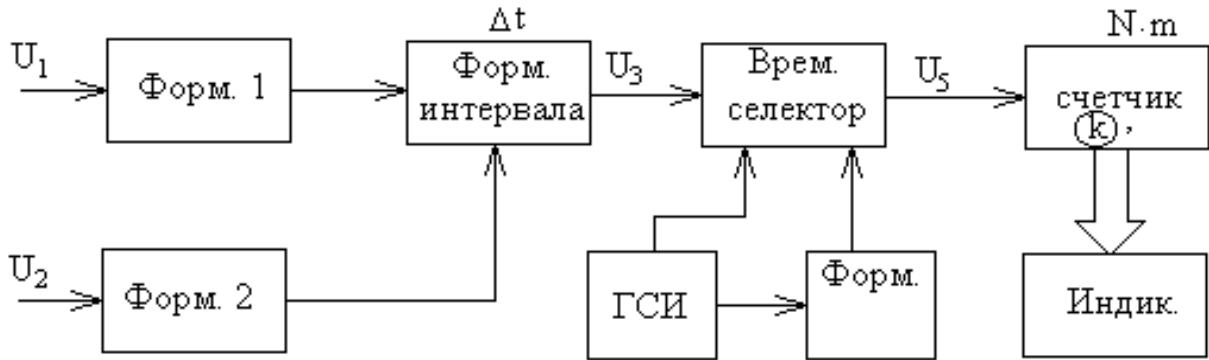


Рис. 11

В интервал  $T_{изм}$  попадает большое число импульсов счета в виде  $N$  пачек. Здесь 2 канала формирования импульсов.

Данный фазометр прямопоказывающий:

$$\Delta t \approx mT_{сч}; \quad NT \approx T_{изм} \text{ с точностью до целого } T$$

$$\Delta\varphi = 360^\circ \frac{\Delta t}{T} = 360^\circ \frac{N\Delta t}{NT} \approx \frac{360^\circ NmT_{сч}}{T_{изм}} = 10^k Nm,$$

где  $10^k = 360^\circ T_{сч} / T_{изм}$ . Таким образом сдвиг фазы пропорционален числу счетных импульсов за время  $T_{изм}$ .

Так как здесь осуществляется преобразование  $\Delta\varphi$  во временной интервал, то составляющие погрешности те же, что и при измерении временного интервала:  $\delta_{кв}$ ,  $\delta_q$ ,  $\delta_{зан}$ . Добавляется погрешность, обусловленная нецелым числом периодов сигнала в интервале измерения  $T_{изм}$ . Эта погрешность может быть очень высокой ( $\pm 1/N$ ), поэтому время измерения делают большим, оно может достигать десятков секунд, что очень неудобно.

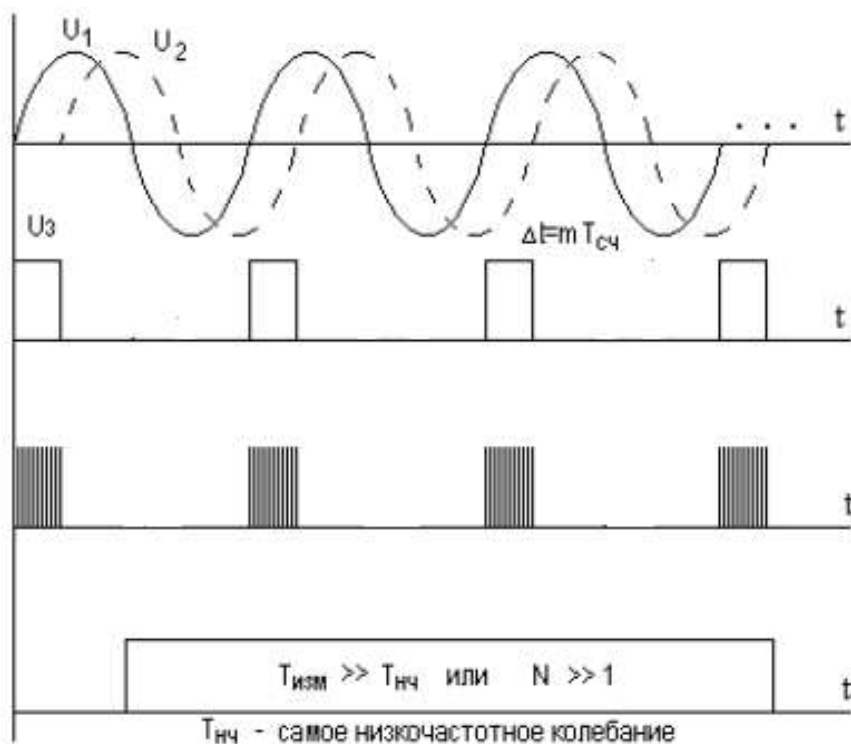


Рис. 12

Микропроцессорный фазометр может измерять также частоту и период.

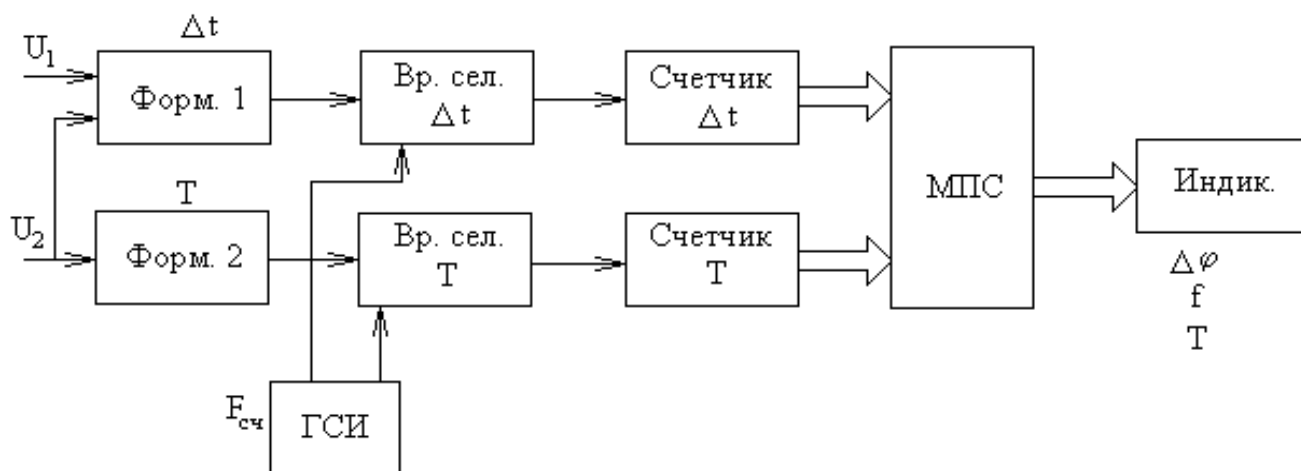


Рис. 13

Прибор позволяет измерять фазовые сдвиги всего за один период сигнала, т.е. обладает высоким быстродействием. Здесь один счетчик (канал 1) измеряет число счетных импульсов  $n$ , которое соответствует фазовому сдвигу, другой счетчик (канал 2) измеряет число счетных импульсов  $N$ , которое соответствует периоду. Фазовый сдвиг определяется вычислением по формуле

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

Возможен расчет за несколько периодов, т.е. можно оценить средний фазовый сдвиг, что позволяет оценивать флуктуации фазовых сдвигов, оценивать их статистические характеристики.

Входное двухканальное гетеродинное преобразование позволяет расширить диапазон рабочих частот фазометра, при этом измерение осуществляется на ПЧ. При измерении малых фазовых сдвигов применяют умножение частот, благодаря чему, во столько же раз увеличивается фазовый сдвиг. Это повышает точность измерений.

#### *Фазометр ФК2-18*

В основе принципа прибора действия лежит компенсационный метод измерения с двойным преобразованием частоты сигнала (рис.14). Мощность от внешнего генератора, поступающая на вход ВЧ блока Я2Р-60, делится на два равных по амплитуде и фазе сигнала, один из которых поступает в опорный канал, другой - в измерительный, где он проходит через исследуемый четырехполюсник. Отношение выходных сигналов есть комплексный коэффициент передачи исследуемого устройства.

Блок Я2Р-63 переносит информацию о соотношении фаз и амплитуд сигнала с частотой  $f_c = 0,11 - 12,4$  ГГц на фиксированную промежуточную частоту 278 кГц, а также производит автоматическую настройку на частоту входного сигнала и ее сопровождение. Перенос информации осуществляется по принципу двухканального супергетеродинного преобразования с помощью сигнала спектра периодических коротких импульсов. Для осуществления подобного преобразования входные смесители выполнены в виде ключей, открываемых короткими импульсами. Частота следования импульсов  $f_z$ , задаваемая перестраиваемым генератором, поддерживается с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ)  $f = f_c - nf_z = 19,722$  МГц. Система усилителей с АРУ и преобразователями частоты в обоих каналах позволяет осуществлять измерения при одновременном изменении входных уровней в пределах 15 дБ. Измерение разности фаз и отношений напряжений осуществляется индикаторным блоком Я2Р-52 на частоте 278 кГц.

Для измерения отношений уровней в измерительный блок Я2Р-63 введены два аттенюатора. Один из них используется при калибровке прибора, а другой - непосредственно при измерениях. Измерение отношений уровней сигналов производится с помощью линейного амплитудного детектора и логарифмического усилителя для отсчета информации в децибелах.

Измерение разности фаз осуществляется триггерным фазометром, содержащим фазовращатель со ступенчатой регулировкой фазового сдвига. Опорный и исследуемый сигналы, сдвинутые на измеряемую разность фаз  $\varphi_x$ , поступают соответственно на вход фазовращателя и ограничителя (см. рис. 14). Симметрично ограниченные сигналы прямоугольной формы поступают на вход фазового детектора.

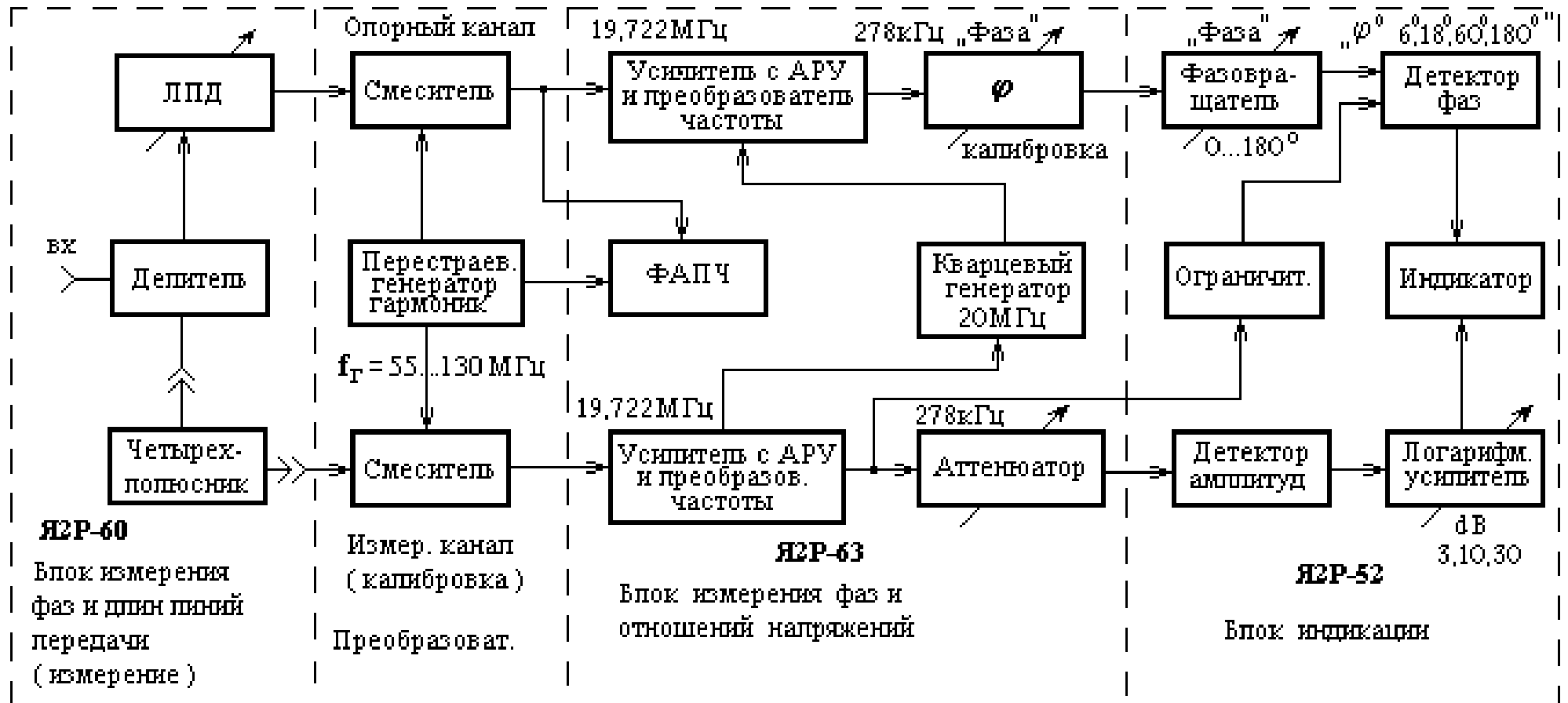


Рис.14. Структурная схема прибора ФК2-18

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните метод дискретного счета измерения интервала времени.
2. Структура погрешности для метода дискретного счета.
3. Поясните суть метода интерполяции.
4. Что делает МПС в режиме интерполяции?
5. Поясните возможности разных методов измерения разности фаз колебаний.
6. Поясните работу фазометра с жесткой логикой с преобразованием сдвига фазы во временной интервал.
7. Приведите структуру погрешности фазометра с жесткой логикой с преобразованием сдвига фазы во временной интервал.
8. Как работает микропроцессорный фазометр?
9. С какой минимальной относительной погрешностью можно измерить интервал времени  $0,1 \cdot N$  мс, если частота счетных импульсов 1 МГц. Метод дискретного счета без интерполяции.
10. С какой минимальной относительной погрешностью можно измерить интервал времени  $0,1 \cdot N$  мс, если частота счетных импульсов 1 МГц. Метод дискретного счета с интерполяцией.
11. С какой минимальной абсолютной погрешностью можно измерить сдвиг фазы на частоте  $10 \cdot N$  Гц, если частота счетных импульсов 1 МГц. Метод дискретного счета с МПС. Какое требуется время измерения?
12. С какой минимальной относительной погрешностью можно измерить сдвиг фазы  $5 \cdot N^0$  на частоте  $10 \cdot N$  Гц, если частота счетных импульсов 1 МГц. Метод дискретного счета с МПС. Какое требуется время измерения?
13. С какой минимальной абсолютной погрешностью можно измерить сдвиг фазы на частоте  $10 \cdot N$  Гц, если частота счетных импульсов 1 МГц. Метод дискретного счета с жесткой логикой за время  $T=1$  с.
14. С какой минимальной относительной погрешностью можно измерить сдвиг фазы  $5 \cdot N^0$  на частоте  $10 \cdot N$  Гц, если частота счетных импульсов 1 МГц. Метод дискретного счета с жесткой логикой за время  $T=1$  с.

Примечание: N – номер студента по списку группы.

### ЛЕКЦИЯ: ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ (ЧАСТОТОМЕРЫ)

В настоящее время наиболее распространены цифровые частотомеры (ЭСЧ), погрешность которых составляет  $10^{-6} \dots 10^{-9}$ . Резонансные частотомеры применяют в основном в диапазоне СВЧ. Их погрешность от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$ . Гетеродинные частотомеры практически не используют, а гетеродинные преобразователи применяют для переноса СВЧ в область измерения ЭСЧ.

**1. Резонансные частотомеры (Ч2)** или волномеры – это приборы использующие явление электрического резонанса. В основе действия лежит метод сравнения измеряемой частоты  $f_x$  с известной частотой  $f_p$  колебательной системы, настроенной в резонанс (на СВЧ применяют резонатор).

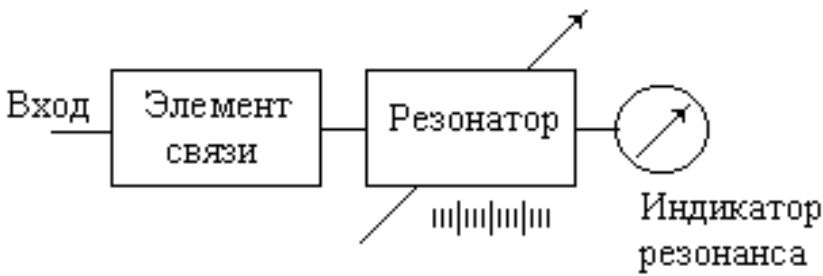


Рис. 1

Погрешность настройки в резонанс определяется работой механических частей (люфтами, трением...), нагруженной добротностью  $Q_n$  и погрешностью индикатора  $\delta_n$

$$\delta_f \approx \pm \frac{1}{2Q_n} \cdot \sqrt{\delta_n}$$

Нагруженная добротность зависит от элементов связи, собственной добротности и потерь во входной и индикаторной цепях. Реальные значения  $Q_n$  100...10000.

В таблице приведены данные для  $f_p \approx 3$  ГГц.

Вид колебаний	Коаксиальн. $\lambda/4$	Прямоугольн. $H_{101}$	Цилиндрич. $H_{111}$	Цилиндрич. $H_{011}$
$Q_o$	5000	20000	30000	60000
$Q_n$	2000	10000	15000	40000

Для колебания типа  $H_{011}$  уменьшается тангенциальное магнитное поле у стенок и уменьшаются потери.

Собственная добротность зависит от типа резонатора, структуры поля в нем, покрытий, особенностей конструкции:

$$Q_o = \frac{2 \int_v |\vec{H}|^2 dv}{\Delta \int_s |\vec{H}_\tau|^2 ds}$$

; где  $\Delta$  - глубина проникновения.

Верхний интеграл по внутреннему объему резонатора пропорционален запасаемой энергии, а нижний – по внутренней поверхности резонатора пропорционален энергии потерь. Дальнейшее увеличение добротности возможно на основе использования сверхпроводимости. При этом глубина проникновения ( $\Delta$ ) уменьшается, а  $Q_o$  увеличивается. Используется ниобий и свинец, охлаждаемый до 2...5°К. Собственная добротность резонатора в состоянии сверхпроводимости ( $Q_o$ ) достигает  $10^{11}$ .

В зависимости от способа включения индикатора в тракт различают индикацию по максимуму и минимуму. В наиболее распространенных схемах с индикацией по максимуму при  $f_p \neq f_x$  ток детектора  $I_d \rightarrow 0$ , а при  $f_p = f_x$   $I_d \rightarrow I_{max}$ .

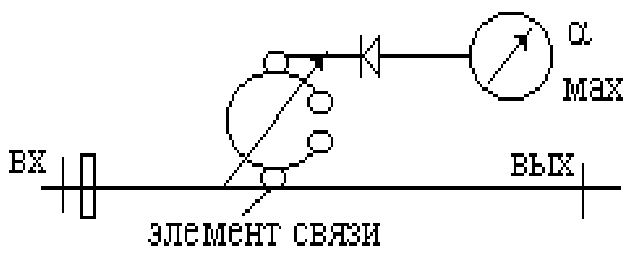


Рис. 2

Для повышения точности отсчет положения максимума (он пологий) осуществляют методом вилки, снимая показания на уровне максимальной крутизны АЧХ. При этом можно дополнительно уменьшить и погрешность механики, если брать отсчеты при движении вверх и вниз:

$$f_x^\uparrow = \frac{1}{2}(f_1^\uparrow + f_2^\uparrow); \quad f_x^\downarrow = \frac{1}{2}(f_1^\downarrow + f_2^\downarrow); \quad f_x = \frac{1}{2}(f_x^\uparrow + f_x^\downarrow).$$

Или 
$$f_x = \frac{1}{2}(f_1^\uparrow + f_2^\downarrow).$$

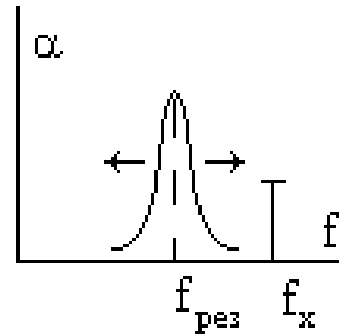


Рис. 3

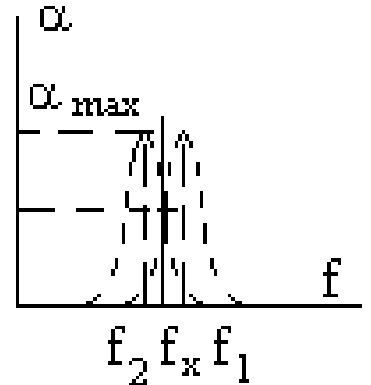


Рис. 4

Другая схема с индикацией резонанса по минимуму.

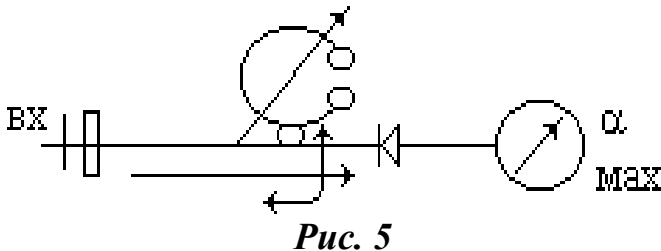


Рис. 5

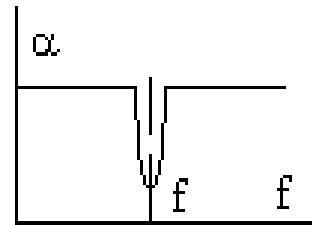


Рис. 6

Здесь при  $f_p \neq f_x$  почти вся энергия СВЧ поступает на вход детектора. Если  $f_p = f_x$  возрастает проводимость, вносимая резонатором в тракт, т.е. в тракте возникает неоднородность. При этом часть энергии поступает в резонатор и значительная часть отражается к генератору из-за возникшего рассогласования. Ток детектора снижается. При измерениях также может применяться метод вилки. Метод с индикацией по минимуму удобен тем, что при расстройке индикатор позволяет судить о наличии мощности в СВЧ тракте.

Для прямоугольного резонатора— условие резонанса  $l = p\lambda_B/2$ , где  $p=1,2,3\dots$ . Виды колебаний  $E_{mnp}$  и  $H_{mnp}$ . Основной вид  $H_{101}$ . Условие резонанса

$$\lambda_p = 2 \left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 + \left( \frac{p}{l} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}.$$

Можно точно измерить длину резонатора  $l$ , проградуировав шкалу перемещения поршня (КЗ) в единицах длины волны в волноводе. Для нахождения

ния частоты придется делать пересчет, так как  $\lambda_B \neq \lambda_0$ . Изменяя длину  $l$  можно настроить резонатор в резонанс дважды на соседних колебаниях, например  $H_{101}$  и  $H_{102}$ . Тогда длина волны в волноводе  $\lambda_B = (l_2 - l_1)$ .

Цилиндрический резонатор аналогичен прямоугольному, здесь волны также дисперсные:  $V_\phi = \phi(f)$  и  $\lambda_B \neq \lambda_0$ . Недостатки прямоугольных и особенно цилиндрических резонаторов – небольшой диапазон перестройки (менее октавы) на одном типе колебаний. Поэтому чаще используют коаксиальные резонаторы.

Коаксиальные резонаторы бывают полуволновые и четвертьволновые. Для четвертьволнового резонатора условие резонанса  $l_{рез} = \lambda_0/4$ . В общем

случае  $l_{рез} = \frac{\lambda_0}{4}(2n-1)$ ,  $n=1,2,\dots$  (реально чуть меньше из-за реактивности запердельного волновода). Для полуволнового  $l_{рез} = n\lambda_0/2$ ;  $n=1,2,\dots$ . При этом используют основное колебание - волну Т, которая не является дисперсной, что позволяет проградуировать шкалу в единицах частоты.

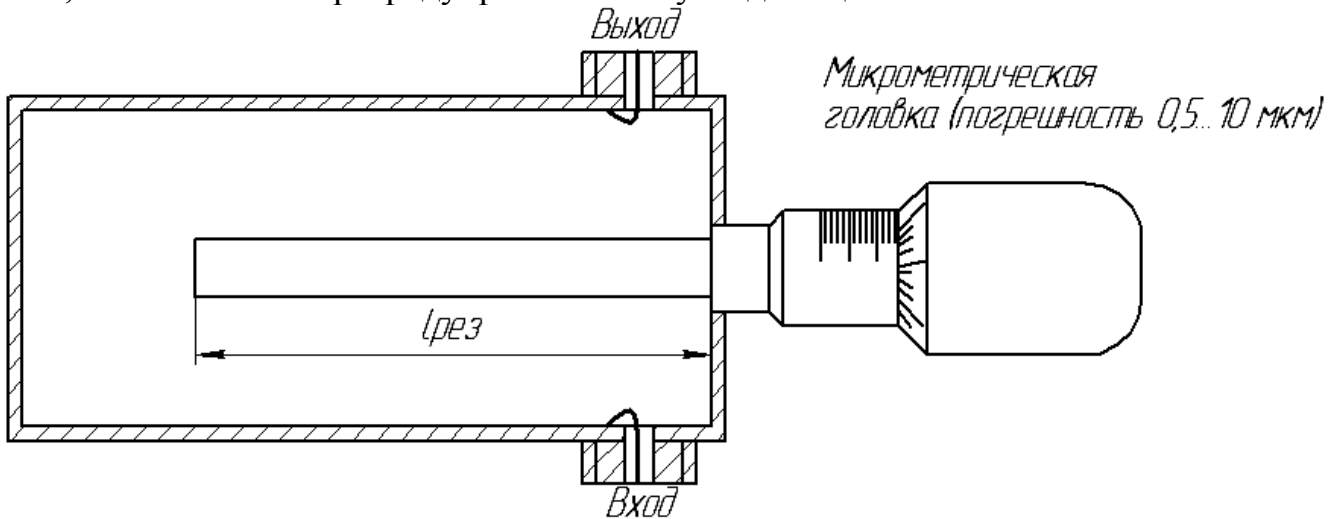


Рис. 7

## 2. Электронно-счетные частотомеры (ЭСЧ) – подгруппа ЧЗ

В области НЧ и ВЧ используют метод дискретного счета. При этом измеряется средняя частота периодического сигнала за время счета. Приборы группы ЧЗ это, как правило, многофункциональные приборы, измеряющие также период сигнала, длительность импульсов, интервалы времени, отношение частот, разность частот... Реализуют принцип сравнения  $f_x$  с образцовой частотой, определяя во сколько раз неизвестная частота больше образцовой ( $f_x > F_{обр}$ ):

$$f_x = m/T_{обр} = mF_{обр}$$

Измерения, строго говоря, косвенные. Для получения прямых показаний выбирают  $T_{обр} = 10^{-K}$ с;  $K=0; \pm 1; \pm 2, \dots$ . Погрешности измерений  $f_x$  включают по-



грешности меры (стабильность кварцевого генератора) -  $\delta_{кв}$  и сравнения (дискретизации)

$$\delta_q = \frac{\Delta}{f_x} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_{обр}} = \pm F_{обр} / f_x$$

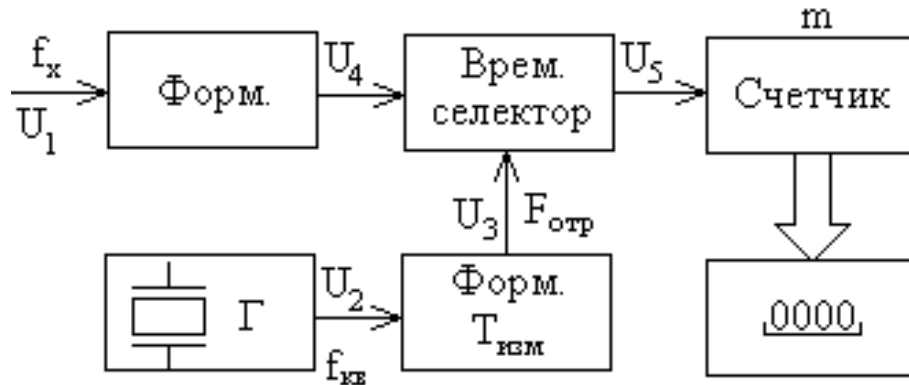


Рис. 8

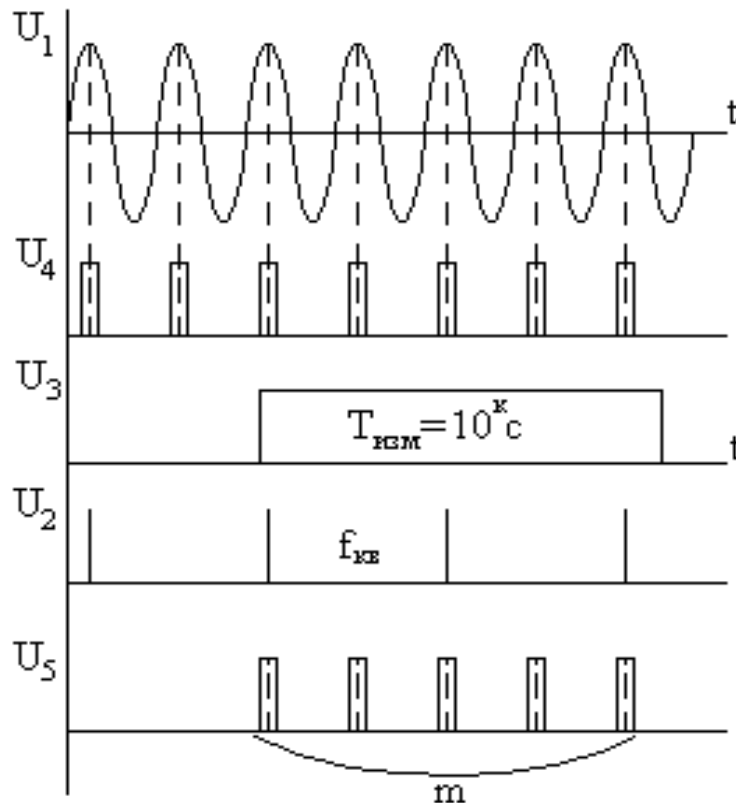


Рис. 9

Погрешность дискретизации при измерении НЧ может быть очень большой. Например для  $f_x=5\text{Гц}$  и  $T_{обр}=1\text{с}$  получим  $\delta_q \approx 20\%$ . Для уменьшения погрешности дискретизации:

- увеличивают время счета;
- умножают частоту исследуемого сигнала  $Nf_x$ ;
- усредняют результаты многократных измерений;
- измеряют не частоту, а период.

В последнем случае необходима операция деления  $f_x=1/T_x$ , поэтому целесообразно использование МПС.

В режиме измерения отношения частот  $m = f_1/f_2$ , где  $f_1 \ll f_2$ .

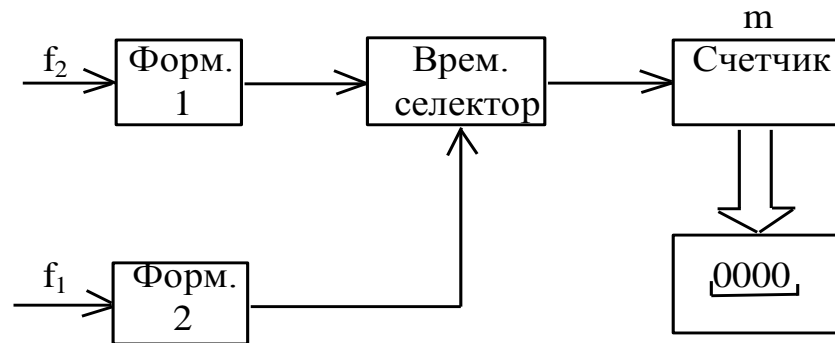


Рис. 10

ЭСЧ с постоянной погрешностью в диапазоне измерений

Здесь время счета ( $T_{обр}$ ) точно равно целому числу периодов сигнала.

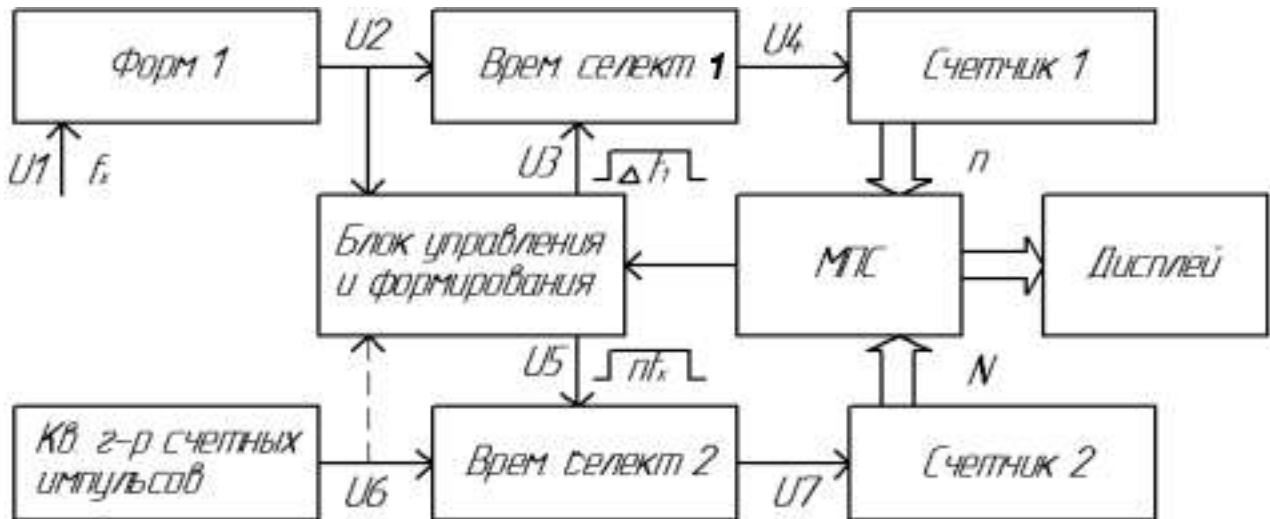
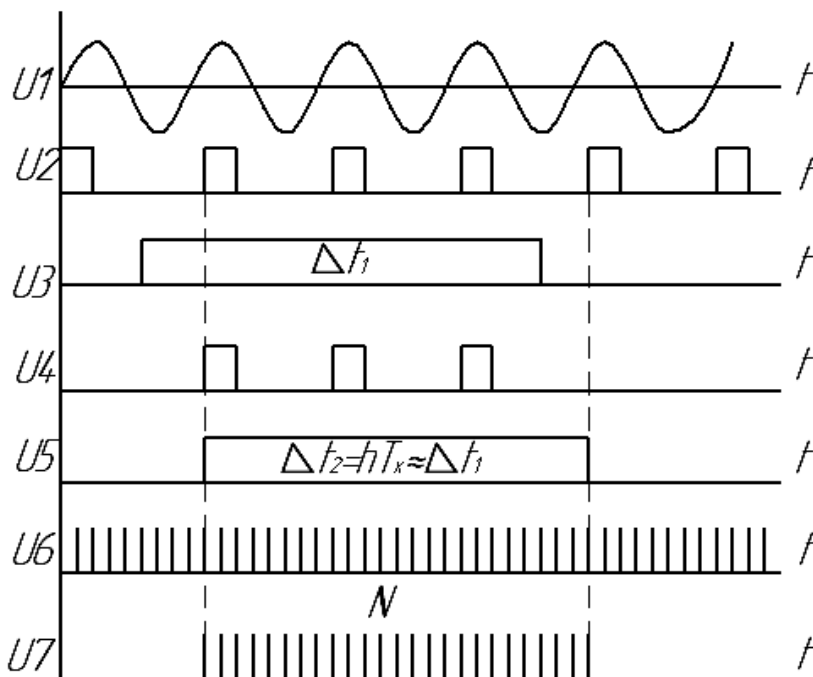


Рис. 11



В схеме формируются временные интервалы  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ . Причем временные ворота  $\Delta t_1$  формируются независимо от входного сигнала, имеющего период  $T_x$ , причем в общем случае  $\Delta t_1 \neq nT_x$ . Число  $n$  изменяется.

Другие временные ворота  $\Delta t_2 = nT_x$ , т.е. строго равны целому

числу  $n$  периодов сигнала. Эти ворота заполняются стабильной частотой  $F_{сч}$  и число импульсов  $N$  фиксируется:  $\Delta t_2 = NT_{сч}$ .

Рис. 12

$$N = \frac{\Delta t_2}{T_{сч}} = \frac{nT_x}{T_{сч}} = n \frac{F_{сч}}{t_x} \quad \text{или} \quad f_x = F_{сч} \left( \frac{n}{N} \right)$$

Откуда получается

При этом погрешность дискретизации постоянна во всем диапазоне.

$$\delta_q = \pm \frac{T_{сч}}{\Delta t_2} \approx \pm \frac{T_{сч}}{\Delta t_1} = \pm \frac{1}{F_{сч} \Delta t_1} = const$$

Для  $F_{сч} = 100$  МГц и  $\Delta t_1 = 1$  с получим  $\delta_y = 10^{-8}$ .

МПС не только вычисляет, но и выбирает режим, поддиапазон, устанавливает запятую, единицы (Гц, КГц, МГц). Могут измеряться путем обработки – фазовые сдвиги, периоды, усредняются результаты многократных измерений.

### ЭЛЕКТРОННО-СЧЕТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

В диапазоне СВЧ применяют делители частот, а также методы переноса частоты (МПЧ) и дискретного гетеродинирования (МДГ). Последние два метода предполагают проведение вычислений, поэтому целесообразно использование МПС.

В обоих методах оценка неизвестной частоты оценивается по формуле:

$f_x = nf_{гет} \pm f_{пч}$ , но в методе переносчика частот  $f_{пч} = const$  (может быть  $f_{пч} = 0$ ), а  $f_{зем} = var$ , в методе дискретного гетеродинного преобразования  $f_{пч} = var$ , а  $f_{зем} = const$ .

При дискретном гетеродинном преобразовании (рис. 13) исследуемый сигнал подается на вход смесителя, на другой вход которого подается сигнал гетеродина, устанавливаемый дискретно с шагом опорной частоты  $f_{зем} = nf_0$ , получаемой в результате умножения кварцевой частоты  $f_{кв}$ . Значение  $f_{пч}$  измеряется ЭСЧ методом дискретного счета. Из сигнала опорной частоты в генераторе гармоник формируется высокостабильный линейчатый спектр. С помощью полосового фильтра выделяется любая из рабочих гармоник сигнала, и подавляются другие. Полоса пропускания широкополосного УПЧ  $\Delta f_{УПЧ} = f_B - f_H > f_0$ .

Процесс измерения состоит в переключении номеров рабочих гармоник, например с 1-го до тех пор, когда промежуточная частота попадет в полосу пропускания УПЧ. При этом в уравнении измерения  $f_x = nf_0 \pm f_{пч}$  члены первого слагаемого (значение номера гармоники и частота гетеродина) известны, а второе слагаемое измеряется ЭСЧ, что позволяет найти неизвестную частоту.

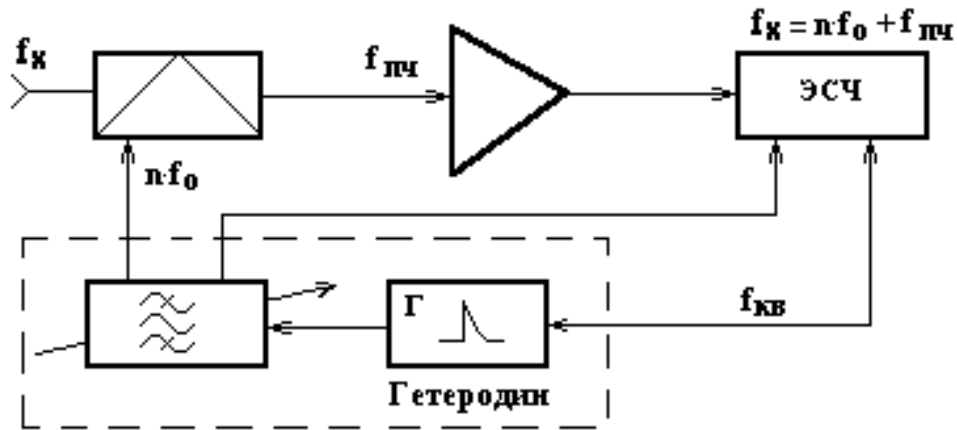


Рис. 13

В зависимости от соотношения частоты исследуемого сигнала и частоты рабочей гармоники возможны следующие случаи:

1. Частота измеряемого сигнала больше суммы частоты  $n$ -й гармоники и нижней граничной частоты УПЧ, но меньше суммы частоты  $(n+1)$ -й гармоники и нижней граничной частоты УПЧ. Включается гармоника с номером  $n$ .

2. Частота измеряемого сигнала больше или равна частоте  $n$ -й гармоники, но меньше суммы частоты  $n$ -й гармоники и нижней граничной частоты УПЧ. В этом случае включается гармоника  $n-1$ , и промежуточная частота, превышая значение  $f_0$ , остается ниже верхней граничной частоты УПЧ  $f_B$ . Искомое значение

$$f_x = (n-1)f_0 + f_{ПЧ}.$$

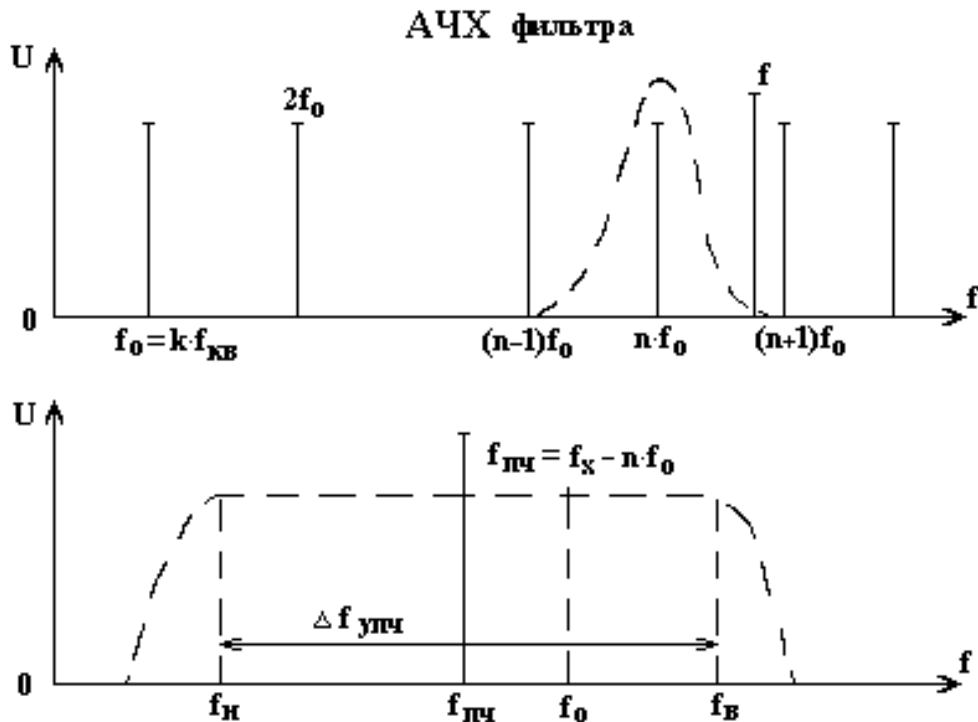


Рис.14

С целью обеспечения прямого отсчета измеряемой частоты значение частоты гетеродина  $nf_0$  может быть введено в соответствующие разряды индикатора ЭСЧ. Для облегчения ввода частота  $f_0$  выбирается равной  $10^p$  МГц, где  $p=1,2,3\dots$ , например 100 МГц, что определяется диапазоном прямого счета ЭСЧ. Диапазон рабочих частот прибора ограничивается сверху максимальным номером рабочей гармоники  $n_{\max}$ . К недостаткам приведенной схемы относится необходимость ручного переключения номера гармоники гетеродина. В микропроцессорных ЭСЧ СВЧ переключение номера гармоники гетеродина осуществляется автоматически.

*Метод переноса частот* (рис. 15) отличается от дискретного гетеродинирования тем, что промежуточная частота за счет системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) поддерживается постоянной. В частном случае она может быть равна нулю. В уравнении измерения  $f_x = nf_{\text{гет}} \pm f_{\text{пч}}$  известно только это значение. Другие два члена подлежат оценке.

Входной сигнал подается на смеситель, на другой вход которого подается линейчатый спектр сигнала гетеродина. При изменении частоты гетеродина одна из его гармоник может приблизиться к частоте сигнала настолько, что включится система ФАПЧ (захват ФАПЧ) с известным значением промежуточной частоты. Если при этом измерить частоту 1-й гармоники гетеродина и определить ее номер, то легко определить искомую частоту.

На фазовый детектор поступают сигналы промежуточной частоты и опорного кварцевого генератора. Сигнал ошибки через ФНЧ и усилитель подается на гетеродин. В режиме синхронизации  $f_x = nf_{\text{гет}} \pm f_{\text{пч}}$ .

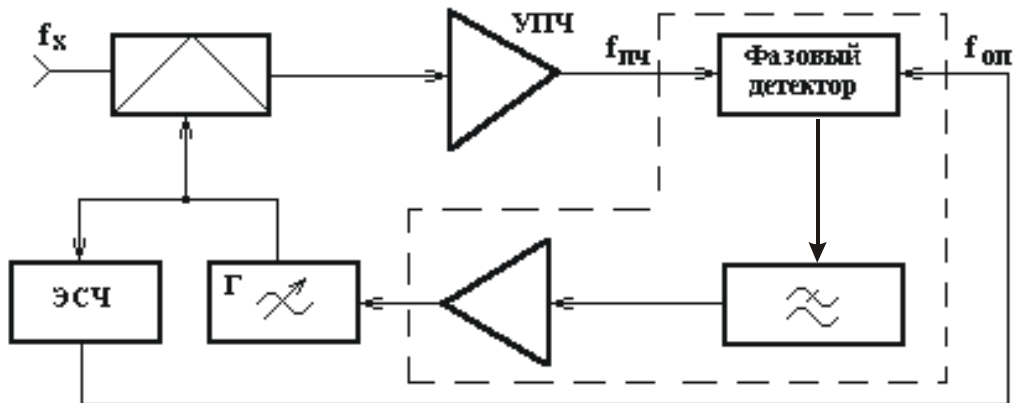


Рис. 15

Номер гармоники может определяться несколькими способами. Это можно сделать по двум измерениям частоты первой гармоники гетеродина на прямом и зеркальном каналах.

Для определения  $n$  можно также отключить ФАПЧ и частоту  $f_{\text{гет}}$  изменить на малую величину  $-\Delta f$ . Новая частота  $f'_{\text{пч}}$ , оставаясь в полосе УПЧ, снова измеряется. Получается система уравнений:

$$f_{\text{пч}} = f_x - nf_{\text{гет}}; f'_{\text{пч}} = f_x - n(f_{\text{гет}} - \Delta f)$$

Вычитаем из 2-го первое:  $f'_{ПЧ} - f_{ПЧ} = n\Delta f$ . Откуда  $n = |f'_{ПЧ} - f_{ПЧ}| / \Delta f$ , причем значение округляется до целого, так как номер гармоники всегда число целое.

Тогда искомая частота  $f_x = nf_{гет} + f_{ПЧ} = f_{гет} |f'_{ПЧ} - f_{ПЧ}| / \Delta f + f_{ПЧ}$ .

При нулевой промежуточной частоте структурная схема прибора и формулы расчета упрощаются. Структурная схема серийно выпускаемых ЭСЧ ЧЗ-45, ЧЗ-46, использующих принцип фазовой автоподстройки частоты гармоники гетеродина по частоте входного сигнала, приведена на рис. 16.

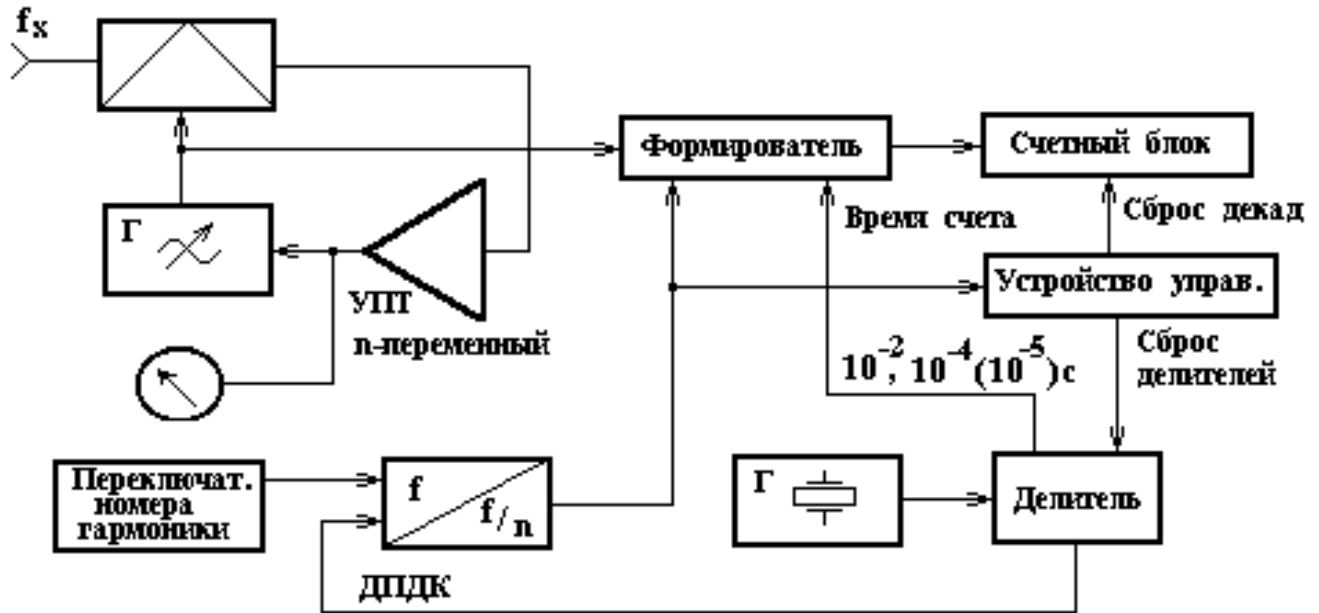


Рис. 16

Переключатель номера гармоники совместно с делителем с переменным коэффициентом деления (ДПКД) позволяет увеличить время счета в  $n$  раз, т.е. реализовать умножение измеряемой частоты гетеродина на  $n$ . В режиме синхронизации, когда  $f_x = nf_{гет}$ , обеспечивается прямой отсчет частоты на индикаторе прибора. Контроль работы режима синхронизации осуществляется по стрелочному прибору, показывающему наличие и уровень управляющего напряжения. Номер гармоники определяется по результатам измерения частоты первой гармоники гетеродина в двух соседних точках синхронизации

ФАПЧ на гармониках  $n$  и  $(n+1)$ :  $f_x = nf_{гет1}$ ,  $f_x = (n+1)f_{гет2}$ . Откуда

$$n = \frac{f_{гет1} \cdot f_{гет2}}{f_{гет1} - f_{гет2}}$$

Погрешность ЭСЧ СВЧ определяется как в любом ЭСЧ. Дополнительно влияет точность обработки данных в МПС и работа ФАПЧ.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип действия, и каковы возможности резонансных частотомеров?
2. Чем определяется погрешность настройки в резонанс?
3. Поясните работу резонансного частотомера с индикацией по максимуму?
4. Поясните работу резонансного частотомера с индикацией по минимуму?
5. Каков принцип действия, и каковы возможности ЭСЧ?
6. Каковы погрешности ЭСЧ и каковы пути их уменьшения?
7. Как работает ЭСЧ с постоянной погрешностью в диапазоне измерений?
8. Поясните принцип измерения и возможности метода дискретного гетеродинирования (МДГ).
9. Поясните принцип и возможности метода переноса частоты (МПЧ).
10. Как определяется номер гармоники для МПЧ и МДГ?
11. С какой минимальной погрешностью дискретизации можно измерить частоты  $10N$  Гц и  $N$  МГц методом дискретного счета при времени измерения 1 с?
12. Задайте требования к времени измерения частоты  $10N$  Гц методом дискретного счета, чтобы погрешность дискретизации не превышала погрешности меры.
13. Как измерить частоты  $N$  ГГц и  $(N-0,01)$  ГГц с помощью МДГ? Выберите  $f_{гет}$ , граничные частоты и полосу пропускания УПЧ, оцените  $f_{нч}$ .
14. Как измерить частоту  $N$  ГГц МГц с помощью МПЧ? Оцените значения частот гетеродина и номер гармоники.

Примечание:  $N$  – номер студента по списку группы.

### **ЛЕКЦИЯ: ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА**

Особенностями измерения тока и напряжения являются различия требований к внутренним сопротивлениям вольтметров и амперметров. При измерении тока оно должно быть значительно меньше внутреннего сопротивления цепи ( $\rightarrow 0$ ), в которую включен прибор, а при измерении напряжения он должно быть много больше сопротивления, на котором происходит измерение ( $\rightarrow \infty$ ). Только при выполнении этих условий измерительный прибор не будет влиять на работу схемы и значения токов и напряжений в цепях включения останутся такими же, как и без прибора. Так как ток и напряжение связаны законом Ома через сопротивление, то, зная две величины всегда можно определить третью. Это используется в универсальных вольтметрах, измеряющих  $U, R, I$ .

При этом все приборы делятся на аналоговые и цифровые. Следует заметить, что хотя удельный вес аналоговых приборов снижается, аналоговая индикация в ряде случаев удобнее, например, при поиске экстремумов. Иногда совмещают цифровую и аналоговую индикацию в одном приборе.

Особенности измерения напряжений в радиотехнике:

- широкая область частот от постоянного тока до сотен ГГц;

- большой динамический диапазон от пико- до мегавольт;
- многообразии форм сигналов;
- малые мощности источников и др.

Измеряются:

1. Мгновенные значения (осциллографические и стробоскопические методы).
2. Амплитудные значения – максимум мгновенных значений.
3. Пиковые значения – максимумы и минимумы полуволн несинусоидальных колебаний.
4. Размах – сумма пиковых значений.

$$U_{СК} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

5. Среднеквадратическое за период напряжение

Для гармонического колебания  $U(t) = U_m \sin Ut$  получим  $U_{СК} = U_m / \sqrt{2}$ , а для негармонического определяется амплитудами гармоник ( $U_i$ ) и постоянной составляющей ( $U_o$ )  $U_{СК} = \sqrt{U_o^2 + U_1^2 / 2 + U_n^2 / 2}$

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$$

6. Среднее значение (среднеарифметическое за период)
7. Средневыпрямленное значение (среднее арифметическое абсолютных

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt$$

мгновенных значений)

Для различных законов изменения напряжения связь амплитудного значения и среднеквадратического определяется коэффициентом амплитуды  $K_a = U_m / U_{СКЗ}$ .

Связь среднеквадратического значения (СКЗ) и средневыпрямленного определяется коэффициентом формы:  $K_\phi = U_{СКЗ} / U_{cp}$ .

Для гармонического закона  $K_{aг} = 1,41$ ;  $K_{\phiг} = 1,11$ .

Для пилообразного  $K_{aп} = 1,73$ ;  $K_{\phiп} = 1,16$ .

Для меандра  $K_{aм} = 1$ ;  $K_{\phiм} = 1$ .

Применять вместо понятия «среднеквадратическое» термин «действующее» или «эффективное» значение считается недопустимым, однако в практике они используются.

**Аналоговые приборы** – это либо отдельно используемые электромеханические приборы, либо совместно с входными делителями, усилителями и преобразователями.



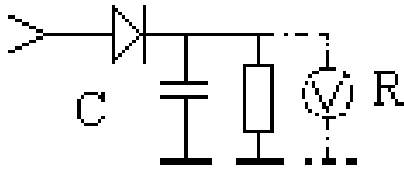
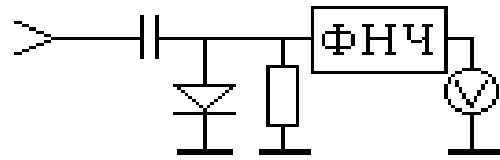


**Рис. 1**

Расширение возможностей аналоговых приборов достигается применением различных типов преобразователей. Рассмотрим некоторые из них.

**А. Преобразователи пикового и амплитудного значения**

Напряжение на выходе преобразователя должно соответствовать пиковому или амплитудному значению. Обычно в схеме используется диод. Типовыми являются схемы с открытым (для постоянного тока) и закрытым входом (рис. 2 и рис. 3).

**Рис. 2****Рис. 3**

Пусть входной сигнал  $U_x = U_m \sin \omega t$ . Тогда для схемы с открытым входом необходимо чтобы постоянная времени заряда была много меньше постоянной времени разряда  $\tau_z \ll \tau_p$ , где  $\tau_z = R_i C$ ;  $R_i$  – внутреннее сопротивление диода  $\tau_p = RC$ ;  $R$  – сопротивление нагрузки. В качестве нагрузки может быть вольтметр постоянного напряжения с высоким внутренним сопротивлением. Тогда  $R \gg R_i$ , что обеспечивает быстрый заряд и медленный разряд.

**Рис. 4**

Для нормальной работы в диапазоне частот необходимо, чтобы выполнялось:  $\tau_z \leq T_{вч}$ , где  $T_{вч}$  – период самого высокочастотного колебания;  $\tau_p \gg T_{нч}$ , где  $T_{нч}$  – период самого низкочастотного колебания.

Преобразователь представляет собой схему с автоматическим смещением. В установившемся режиме постоянное напряжение на конденсаторе  $U_c \approx U_m$  (фактически  $U_c \leq U_m$ ). Конденсатор подзаряжается каждый период в течение незначительной части периода, характеризуемого углом отсечки  $\Theta$ .

Относительная систематическая погрешность преобразования

$$\delta = \frac{U_c - U_m}{U_m} = -\frac{T}{2RC} = -\frac{T}{2\tau_{разр}}$$

При этом

$$\frac{U_e}{U_m} \approx \cos \Theta \approx \cos^3 \sqrt{\frac{3\pi R_i}{R}}$$

При малом сопротивлении нагрузки погрешность возрастает, а чрезмерное увеличение  $R$  приведет к излишней инерционности преобразователя.

При наличии постоянной составляющей измеряется сумма  $U_c \approx U_o + U_m$ .

Для схемы с закрытым входом напряжение на сопротивлении  $R$  пульсирующее, поэтому включен фильтр нижних частот (ФНЧ),  $U_R \in (\delta; 2U_m)$ . В отличие от схемы с открытым входом при наличии постоянной составляющей здесь показания определяются только амплитудой переменной составляющей.

### В. Преобразователи среднеквадратического значения

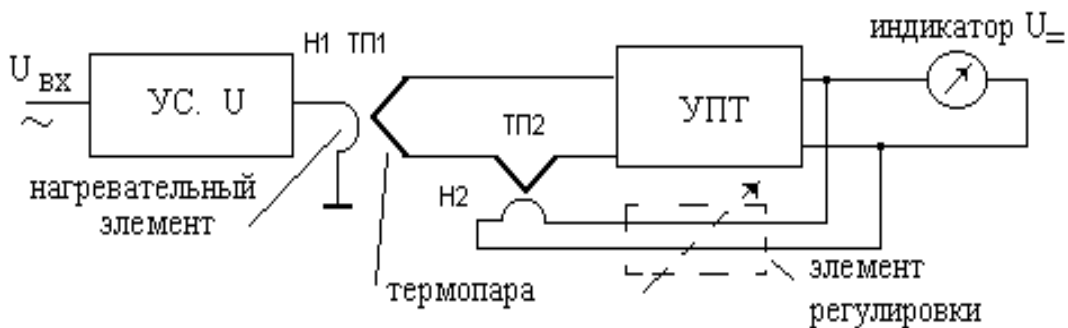
$$U_{СК} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

В соответствии с выражением в процессе измерений нужны операции возведения в квадрат (квадрирование), усреднения за период (или несколько периодов); извлечения квадратного корня.

Для первой операции можно использовать квадратичные преобразователи мгновенных значений на начальном участке ВАХ диода или на основе использования квадратичной зависимости тока стока от напряжения затвор – исток полевого транзистора. Подобные преобразователи используются, но они имеют достаточно высокие погрешности из-за того, что реальные характеристики не являются строго квадратичными, возникают методические погрешности аппроксимации.

Более точными являются преобразователи электрической энергии в тепловую (термоэлектрические, терморезистивные). В основе их работы лежит понятие физического смысла СКЗ, как эквивалентного напряжения постоянного тока, вызывающее в нагрузке такой же тепловой эффект.

Рассмотрим схему вольтметра с термоэлектрическим преобразованием.



**Рис. 5**

Переменное напряжение входного сигнала усиливается в известное число раз и подается на нагреватель Н1, температура которого в результате становится пропорциональной уровню сигнала. Термопара ТП1 вырабатывает термо-ЭДС, пропорциональную температуре Н1. Следовательно напряжение ТП1 пропорционально среднему квадрату значения тока и следовательно входного напряжения. Оно усиливается в калиброванном УПТ и подается на индикатор СКЗ. Включенные в цепь отрицательной обратной связи Н2 и ТП2 необходимы для линейризации зависимости между выходным напряжением УПТ и входным сигналом:  $U_{ВЫХ} = KU_{СКЗ}$ ;  $K = const$ .

В современных вольтметрах широко применяется преобразование «логарифм - антилогарифм», поскольку эти функции более точно можно реализовать аппаратно:

$$U(t) \rightarrow |U(t)| \rightarrow \{\ln|U(t)| \rightarrow 2\ln|U(t)|\} \rightarrow \ln[U^2(t)] \rightarrow U^2(t) \rightarrow \overline{U^2(t)} \rightarrow U_{\text{СКЗ}}$$

Модуль  $\rightarrow$  Логарифм  $\rightarrow$  Возведение в квадрат  $\rightarrow$  Антилогарифм  $\rightarrow$  Усреднение  $\rightarrow$  Показание

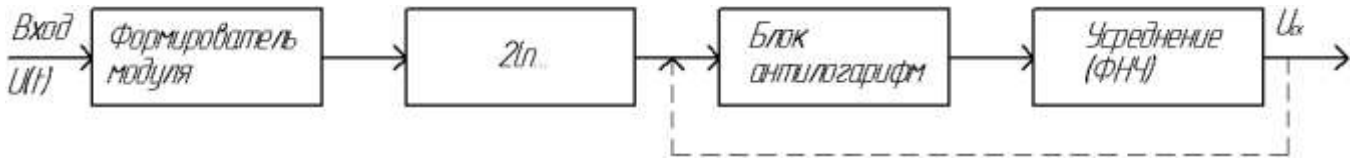
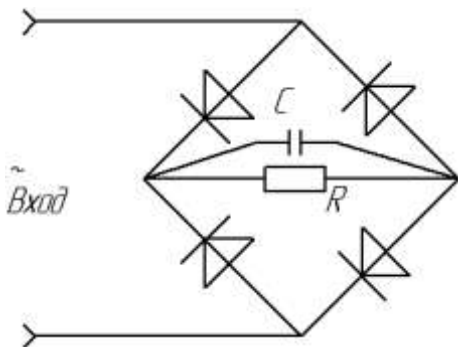


Рис. 6

### С. Преобразователи средневыпрямленного значения



При малых напряжениях преобразование квадратичное из-за ВАХ диодов.

Рис. 7

В простейших случаях используются мостовые схемы с двухполупериодным выпрямлением, работающие на линейном участке ВАХ. Направление тока через диагональ моста, в которую включается индикаторный прибор, одно и то же в течение обоих полупериодов входного переменного напряжения. Форма измеряемого напряжения не влияет на процесс усреднения.

**Селективные вольтметры (В6)** – это избирательные вольтметры для узкополосных измерений. Позволяют исследовать отдельные спектральные составляющие, определять спектральную плотность шумов, измерять нелинейные искажения. Применяют гетеродинное преобразование и имеют высокую чувствительность. Обычно это селективные микровольтметры.

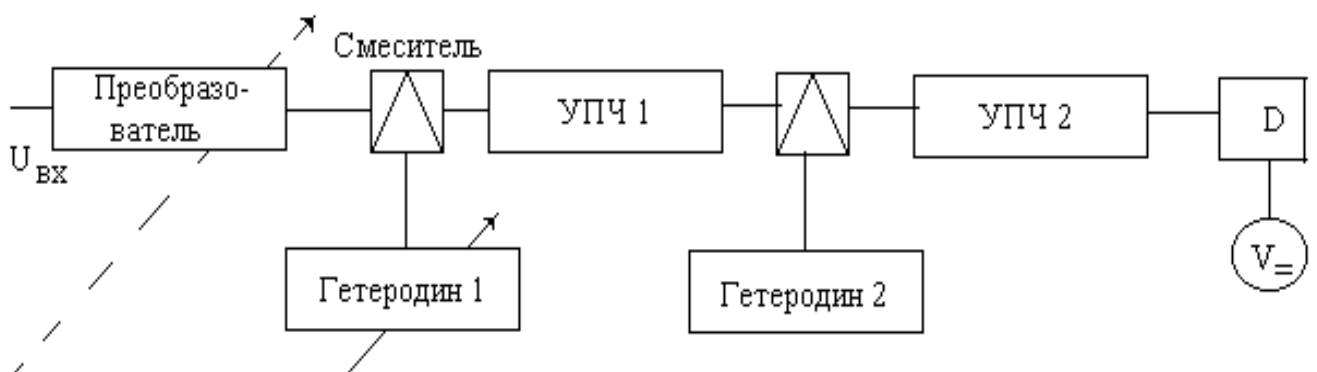


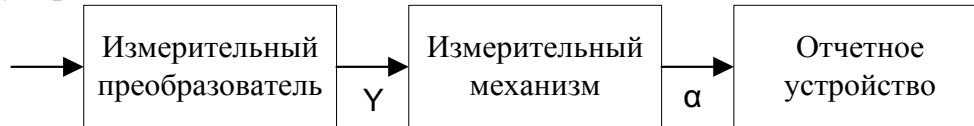
Рис. 8

Измеряемый сигнал подается на входной преобразователь, функции которого такие же, как у измерительного приемника, т.е. здесь может быть калиброванный аттенуатор, УВЧ, фильтр. Усиление реализуется на промежуточных частотах. В зависимости от требуемой чувствительности и полосы пропускания может осуществляться двух- и трехкратное преобразование час-

тоты, так как на одной ПЧ реализовать большое усиление (порядка 120дБ) затруднительно (возможно самовозбуждение). Входной преобразователь перестраивается вместе с гетеродином.

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Электромеханические амперметры и вольтметры - распространенный класс приборов непосредственной оценки. Используется как отдельно для измерения тока и напряжения, так и в качестве выходного преобразователя и отсчетного устройства большинства аналоговых РИП.



В зависимости от вида преобразования и принципа действия их делят на следующие системы:

- Магнитоэлектрические, основанные на взаимодействии рамки с током и поля постоянного магнита;
- Ферродинамические, у которых рамка взаимодействует с полем электромагнита;
- Электродинамические, использующие силы взаимодействия подвижной и неподвижной катушек с током;
- Электромагнитные, основанные на взаимодействии ферромагнитного сердечника с неподвижной катушкой, обтекаемой током;
- Электростатические, основанные на взаимодействии электрически заряженных тел;
- Индукционные, основанные на взаимодействии переменных магнитных полей, создаваемых неподвижными катушками, с током, индуцированными этими полями в подвижной части механизма.

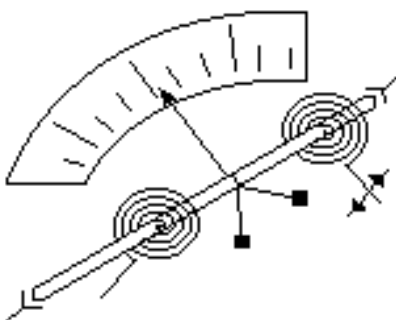
Существуют также редко применяемые механизмы магнитоиндукционной, вибрационной и тепловой систем.

Для всех измерительных механизмов, в которых используются силы ЭМП, выражение для вращающего момента определяется уравнением Лагранжа второго рода, которое имеет вид:

$$M = \partial W_{ЭМ} / \partial \alpha ,$$

где  $W_{ЭМ}$  – энергия ЭМП;  $\alpha$  - угловое перемещение подвижной части.

Вращающему моменту противодействует момент плоской (спиральной) пружины, один конец которой закреплен на подвижной (оси), а другой на неподвижной части измерительного механизма. Пружина имеет достаточное количество витков (как у маятника часов), ее противодействие пропорционально углу  $\alpha$  и зависит от свойств материала и конструкции спирали. Для плоской пружины противодействующий вращающий момент линейно связан с углом поворота. Для большей линейности шкалы ставят две



пружины, одна из которых закручивается, а другая раскручивается при движении оси. Во всех измерительных приборах достигается равновесие при равенстве моментов вращения и противодействия.

Линейная шкала получается для плоской пружины, когда вращающий момент пропорционален измеряемой величине ( $U, I, P$ ), иначе шкала нелинейная.

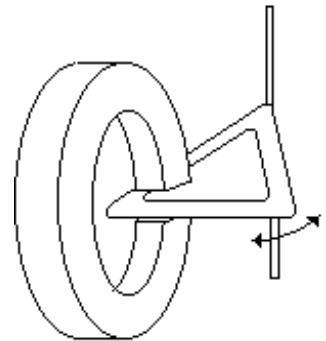
Основные элементы конструкции: ось; опоры; пружинки; успокоители; отчетные устройства (шкалы, стрелки) корпус и др.

Важным элементом является ось со стрелкой. Стрелка обычно дополняется противовесами для создания центра тяжести в месте крепления к оси. На оси закрепляется то, что подвижно в зависимости от типа механизма. Важна шкала, система установки нуля.

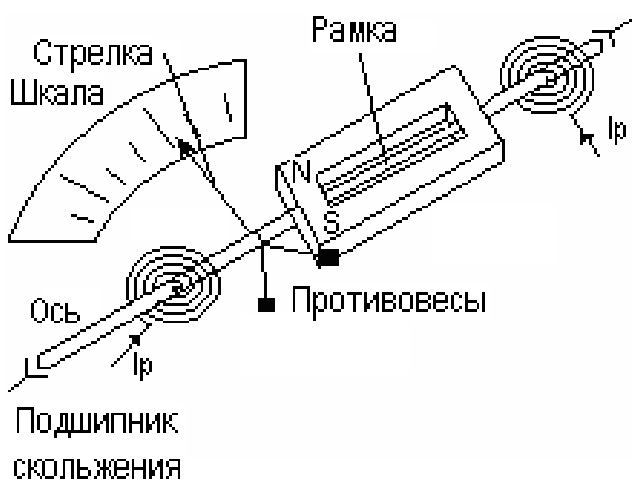
Важным элементом является успокоитель — устройство, позволяющее сделать процесс отклонения стрелки аperiodическим, плавным, без колебаний.

Воздушный успокоитель работает по принципу «насоса», у которого поршень с небольшим зазором, поэтому нет контакта и трения. Происходит повышение и разряжение давления в трубке — успокоение.

Часто применяют магнит, в зазор которого помещается закрепленный на оси немагнитный (алюминиевый) сектор. При повороте оси сектор приходит в движение, в нем возникают токи и таким образом магнит тормозит движение — магнитоиндукционный успокоитель.



### 1. Магнитоэлектрические приборы



Эти приборы самые распространенные.

Между полюсами магнита помещается катушка. Она вместе со стрелкой закреплена на оси. Вращающий момент и угол отклонения

$$M = S \omega B I_p; \quad \alpha = S \omega B I_p / W;$$

где  $S$  — площадь рамки;  $\omega$  — Число витков;  $I_p$  — ток рамки;  $B$  — индукция магнитного поля,  $W$  — удельный противодействующий момент пружин.

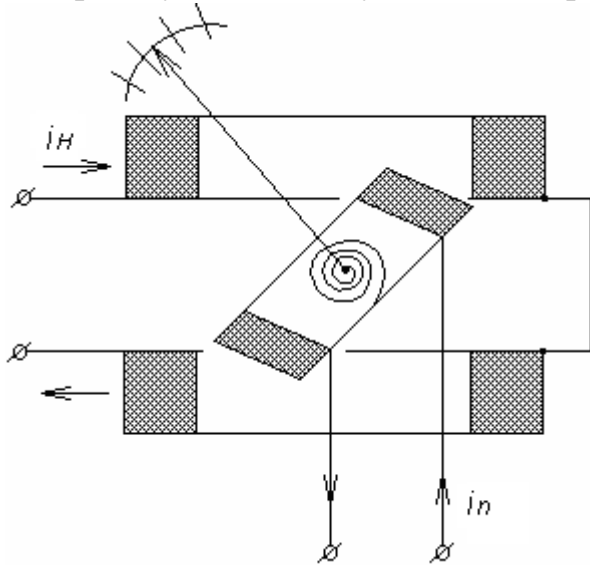
Чем сильнее магнит, тем чувствительнее прибор. Если ток изменяется во времени, то прибор будет усреднять. Если ток переменный, то прибор покажет ноль.

Достоинства магнитоэлектрической системы:

- высокая чувствительность (есть приборы с полным отклонением 0,01 мкА);
- высокая точность (классы 0,05; 0,1; 0,2);
- малое собственное потребление энергии ( $10^{-5} \dots 10^{-8}$  Вт);
- линейная шкала.

Недостатки: сложность, чувствительность к перегрузкам (перегорают пружинки), возможность измерения тока или напряжения только одной полярности (для измерения переменных токов и напряжений нужно ставить диоды, которые существенно увеличат погрешности).

## 2. Электродинамические приборы



Неподвижная катушка состоит из двух частей, между которыми проходит ось подвижной катушки. Момент вращения

$$M = \frac{\partial M_L}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_H i_n dt$$

, где  $M_L$  – взаимная индуктивность катушек. Угол  $\alpha = M/W$ , где  $W$  – удельный противодействующий момент пружины.

Катушки включаются последовательно ( $i_H = i_n$ ) в вольтметрах, параллельно в амперметрах и последовательно-параллельно в ваттметрах:

$$P_H = \frac{1}{T} \int_0^T U_H i_H dt \quad ; \quad \alpha = \frac{1}{WR_{\text{доб}}} \cdot \frac{\partial M_L}{\partial \alpha} P_H$$

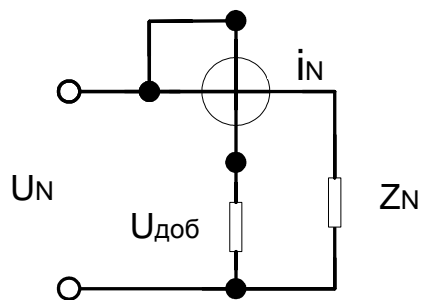
Достоинства:

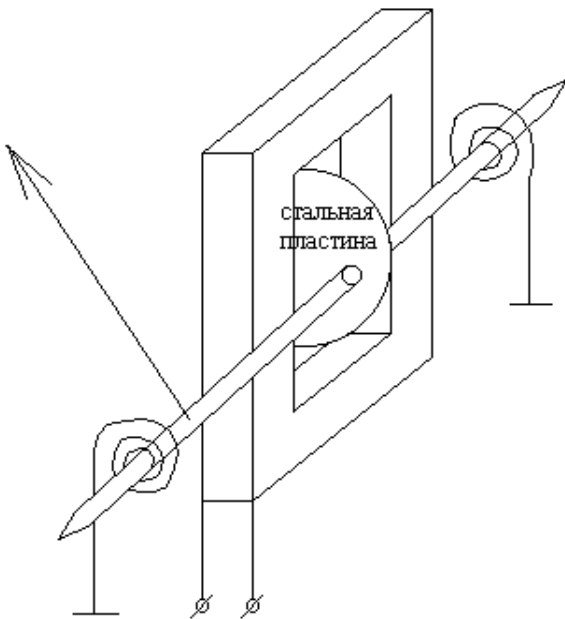
- применяют в цепях постоянного и переменного тока;
- измеряют действующее значение;
- высокая точность (классы 0,1; 0,2; 0,5) (при измерении переменного тока);
- можно измерять мощность.

Недостатки:

- небольшой диапазон частот (до 5 кГц);
- необходима экранировка механизма от внешних полей (высокая чувствительность даже к полю земли);

## 3. Электромагнитные приборы





В электромагнитном приборе поле катушки (соленоида) втягивает в узкую щель сердечник в виде стальной пластины. Здесь

$$M = \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha};$$

$$\alpha = \frac{1}{2WR^2} \cdot \frac{\partial L}{\partial \alpha} U^2 = \frac{1}{2W} \cdot \frac{\partial L}{\partial \alpha} I^2,$$

где  $L$  – индуктивность, а  $R$  – сопротивление катушки,  $W$  – удельный противодействующий момент пружины.

Достоинства:

- шкалу можно градуировать как по  $I$ , так и по  $U$ ;

- знак угла поворота не зависит от направления тока (можно измерять переменные токи и напряжения).

Недостатки:

- шкала неравномерная – квадратичная (сжатая вначале);
- классы точности и чувствительность невелики (классы 1,0; 1,5; 2,5...).

#### 4. Электростатические приборы

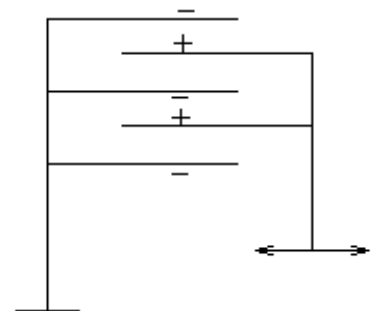
Электростатические ИП – по конструкции напоминают конденсатор переменной емкости с подвижными и неподвижными пластинами. При подаче напряжения поле втягивает подвижные пластины в пространство между неподвижными силами электростатического взаимодействия. Эта система реагирует и на переменное, и на постоянное напряжения. Такие системы чаще используют для измерения больших напряжений (киловольты).

Достоинства:

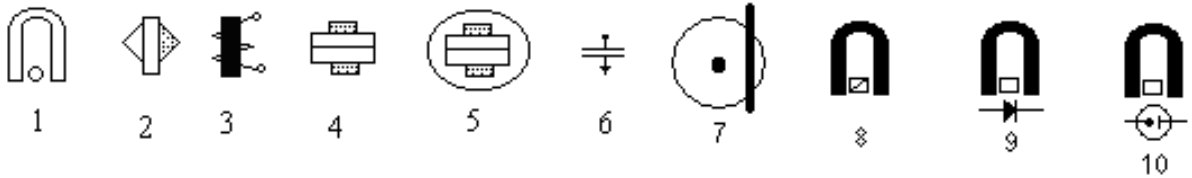
- можно измерять постоянное и переменное напряжение;
- незначительное потребление энергии;
- независимость от внешних магнитных полей;
- широкий диапазон напряжений от 1 В до 100 кВ;

Недостатки:

- нелинейная (квадратичная) шкала;
- малая чувствительность.



#### Условные обозначения систем



1. Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой
2. Магнитоэлектрическая с подвижным магнитом
3. Электромагнитная
4. Электродинамическая
5. Ферродинамическая
6. Электростатическая
7. Индукционная
8. Термоэлектрическая (на базе магнитоэлемента)
9. Выпрямительная (на базе магнитоэлемента)
10. Электронная.

В последних трех системах в качестве индикатора используется прибор магнитоэлектрической системы, а на входе включен соответствующий преобразователь.

Условные знаки на приборах:

- прибор постоянного тока
- ~ прибор переменного тока
- ⊥ обязательно вертикальное положение шкалы
- ┌ обязательно горизонтальное положение шкалы
- ∠ 30° обязательно наклонное положение шкалы

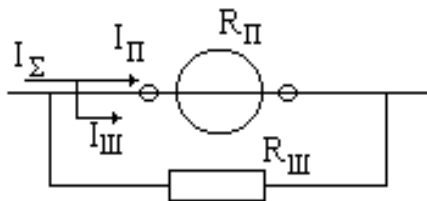
2,5; 0,1; 1,0 — обозначения класса точности

☆<sub>2,5</sub> - испытательное напряжение (кВ)

Электромеханические приборы с преобразователями

Электромеханические приборы с преобразователями применяются для различных аналоговых измерений, а также в качестве индикаторных устройств. Преобразователи расширяют пределы измерений и возможности электромеханических приборов. Комплектуя электромеханические приборы переключаемыми шунтами и добавочными сопротивлениями, строят простейшие многофункциональные приборы - мультиметры.

1. Шунты используют для измерителей тока. Шунт ответвляет заданную часть тока, увеличивая предел измерения.



Коэффициент шунтирования (отношение полного тока  $I_{\Sigma}$  к току прибора  $I_{\Pi}$ ) выбирает-

ся целым (2, 5, 10 ... 100.):

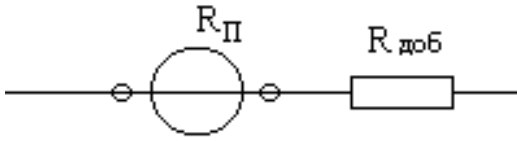
$$n = \frac{I_{\Sigma}}{I_{\Pi}} = \frac{I_{\Pi} + I_{\text{ш}}}{I_{\Pi}}$$

Значение сопротивления шунта вычисляется по формуле  $R_{\text{ш}} = R_{\Pi} / (n - 1)$ . Шунты бывают классов 0,02; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0. Входное сопротивление при-



бора с шунтом (параллельное соединение) равно  $R_{\Pi}/n$ , т.е. оно уменьшается в  $n$  раз, что очень хорошо для измерителей тока.

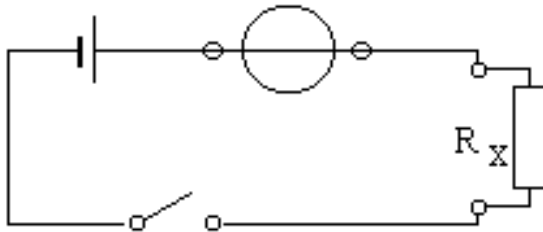
2. Добавочное сопротивление делит входное напряжение.



Если последовательно с прибором включить добавочное сопротивление, то можно повысить внутреннее сопротивление (это важно для измерителей напряжения) и увеличить предел шкалы измерения напряжения.

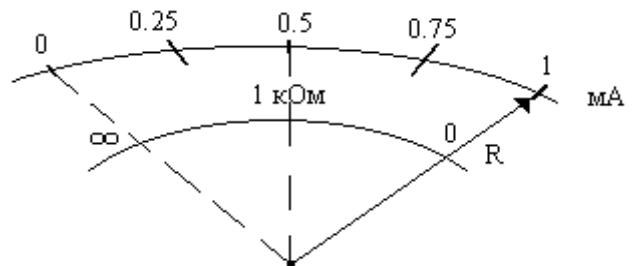
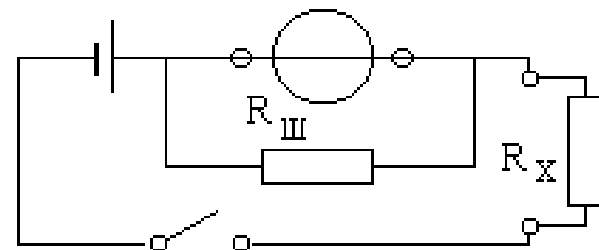
Если надо увеличить предел в  $m$  раз, где  $m = U_{\Sigma} / U_{\Pi}$ , то добавочное сопротивление:  $R_{доб} = R_{\Pi} (m - 1)$ .

### Измерение сопротивления



Измеритель сопротивления использует дополнительный источник питания, включаемый последовательно с прибором. Пусть электромеханический прибор имеет внутреннее сопротивление  $R_{\Pi} = 1$  кОм и предел шкалы 1 мА. Тогда при напряжении 1 В будет полное отклонение стрелки прибора. Если разорвать цепь и включить в нее дополнительное сопротивление  $R_x = 1$  кОм, то стрелка остановится в точке  $I = 0.5$  мА, т.е. в центре шкалы. Тогда точка 1 мА будет соответствовать 0 Ом, 0.5 мА – 1 кОм. Следовательно, имея внешний источник напряжения можно проградуировать новую шкалу в единицах сопротивления, но она будет нелинейной.

Если использовать дополнительный шунт, то изменится общий ток и если коэффициент шунтирования взять равный 100, то полное отклонение будет при токе  $I = 100$  мА, а входное сопротивление прибора будет равно  $R = 10$  Ом. Это будет уже другая шкала - в центре ее точка 10 Ом.



Если использовать дополнительный шунт, то изменится общий ток и если коэффициент шунтирования взять равный 100, то полное отклонение будет при токе  $I = 100$  мА, а входное сопротивление прибора будет равно  $R = 10$  Ом. Это будет уже другая шкала - в центре ее точка 10 Ом.

При необходимости могут использоваться добавочные сопротивления. Комбинируя добавочные сопротивления и шунты можно построить многопредельные омметры.

Если прибор должен быть многофункциональным и измерять также переменные напряжения и токи, а головка не позволяет этого делать, то можно использовать полупроводниковый диод.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Каковы различия требований к внутренним сопротивлениям вольтметров и амперметров?
2. Какие параметры сигналов могут измерять вольтметры?
3. Что такое среднеквадратическое, среднее и средневыпрямленное значения переменного напряжения?
4. Как измеряется среднеквадратическое значение переменного напряжения?
5. Как измеряется средневыпрямленное значение переменного напряжения?
6. Какие бывают преобразователи пикового значения и как они работают?
7. Как работают селективные вольтметры?
8. Каких типов бывают электромеханические приборы?
9. Как работают измерительные механизмы электромеханических приборов?
10. Каковы достоинства и недостатки магнитоэлектрических приборов?
11. Каковы достоинства и недостатки электродинамических приборов?
12. Каковы достоинства и недостатки электромагнитных приборов?
13. Каковы достоинства и недостатки электростатических приборов?
14. Дан магнитоэлектрический прибор постоянного тока с внутренним сопротивлением  $10/N$  кОм, на входе которого включен преобразователь пикового значения с открытым входом. Какая емкость конденсатора должна использоваться, чтобы на частоте  $10N$  Гц относительная систематическая погрешность преобразования не превышала 1%?
15. Дан прибор тока со шкалой 10 мкА и внутренним сопротивлением  $0,1 \cdot N$  кОм. Какие нужны шунты для шкал тока 1 мА и 1 А? Какое будет входное сопротивление прибора на шкалах амперметра? На какие шкалы (2 шкалы) можно построить вольтметр, и какие должны быть при этом добавочные сопротивления? Какое будет входное сопротивление прибора на шкалах вольтметра? Предложите шкалу омметра и напряжение источника питания.
16. Как минимизировать погрешность измерения постоянного тока, значение которого  $N$  мА?
17. Когда при измерении силы постоянного тока амперметром используются шунты?

Примечание:  $N$  – номер студента по списку группы.

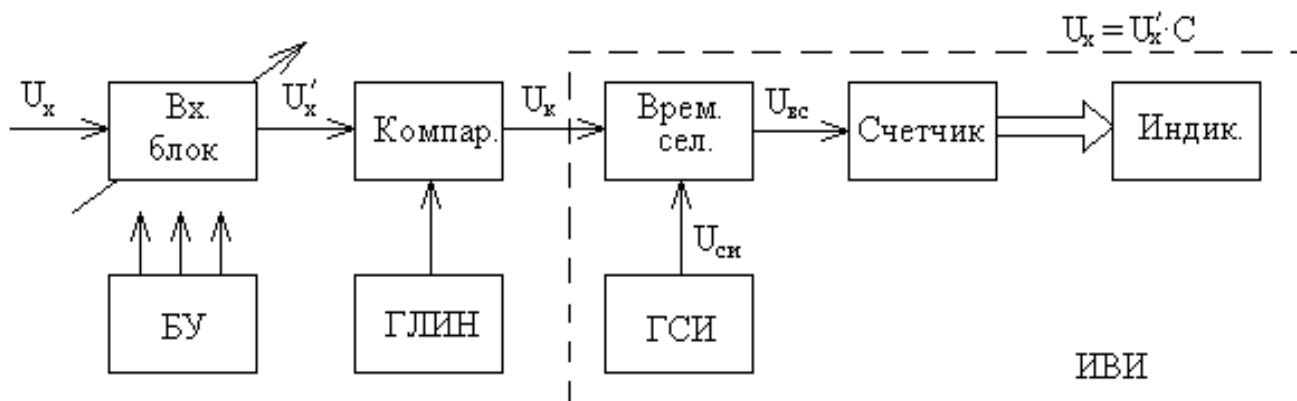
### **ЛЕКЦИЯ: ЦИФРОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ**

В значительной степени ЦВ характеризуются видом АЦП и наличием МПС. АЦП является основным измерительным преобразователем ЦВ. Современные ЦВ переменного тока и универсальные ЦВ, как правило, представляют собой сочетание ЦВ ПТ и блока преобразователя, поэтому вольтметры постоянного тока (ПТ) являются основой всех ЦВ.

По принципу работы АЦП различают ЦВ:

- времяимпульсные (1 -, 2- , 2 –х кратным интегрированием);
- частотно-импульсные (также интегрирующие);
- кодово-импульсные или поразрядного кодирования (взвешивания);
- комбинированные.

**Времяимпульсный вольтметр** с преобразованием  $U_x \rightarrow T_x$  и последующем измерении  $T_x$  методом дискретного счета.



**Рис. 9**

Измеряемое напряжение  $U_x$  преобразуется в интервал времени  $T_x$ , который определяется путем подсчета заполняющих его  $m$  импульсов кварцовой частоты. Угол наклона линейно изменяющегося напряжения

$$\operatorname{tg} \alpha = V = \frac{U_x}{T_x} = \operatorname{const}$$

Откуда  $U_x = VT_x$ . Но  $T_x = mT_{\text{сч}}$ , тогда

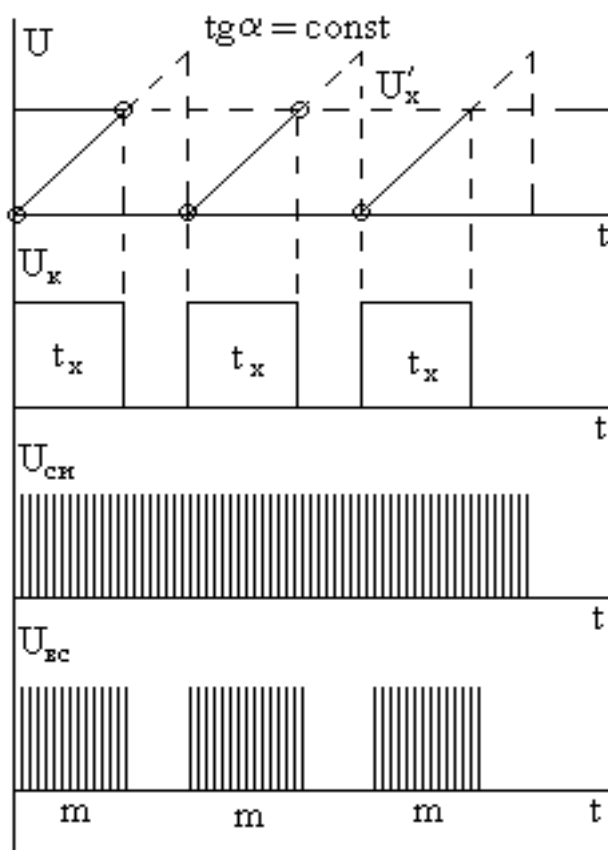
$$U_x = mT_{\text{сч}} V = m \cdot 10^p$$

, где  $p$  - целое число. Таким образом при правильном выборе параметров схемы прибор прямопоказывающий.

Точность ЦВ в большей мере зависит от характеристик линейно изменяющегося напряжения. Вырабатывающий его генератор (ГЛИН) обычно строится по сложной схеме интегратора. При этом достигается коэффициент нелинейности меньше  $10^{-3}$ .

**Рис. 10**

Другими факторами, ограничивающими точность, является дрейф нуля во входном блоке, погрешность компаратора и погрешность измерителя интервала времени, обусловленная дискретностью и нестабильностью частоты.



ты генератора счетных импульсов. Основной недостаток метода - плохое подавление напряжения помех. Для устранения этого недостатка на входе включают фильтры, усложняющие прибор и увеличивающие время измерения.

Достоинство метода – его простота при удовлетворительной погрешности (достигается величина  $0,1 \dots 0,05\%$ ).

Для гармонической помехи разброс показаний относительно истинного значения  $U_x$ , как в плюс, так и в минус.

В качестве примера можно привести прибор В7-16. Период линейно изменяющегося напряжения равен 2 мс. Предел допустимой погрешности:

$$\delta = \pm(0,05 + 0,05U_{\text{пред}}/U_x)\%$$

В приборе имеется фильтр подавления помехи с постоянной времени 0,1 и 1с. Подавление сетевой помехи при времени преобразования 20 мс осуществляется за счет формирования 10 пачек счетных импульсов.

**Вольтметр с двойным интегрированием** (интегрированием «вверх – вниз») сложнее, но лишен недостатков простого времяимпульсного преобразования, поэтому применяется сейчас очень широко.

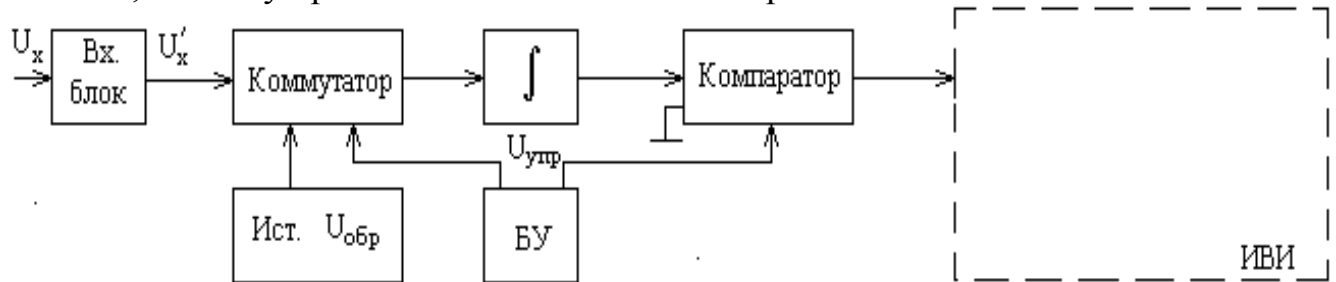


Рис. 12

Метод двойного интегрирования (интегрирования «вверх-вниз») используется для повышения точности измерения. В течение калиброванной длительности  $T_1$  на вход интегратора через компаратор поступает измеряемое напряжение  $U_x$ . Осуществляется интегрирование «вверх». Крутизна ( $\alpha$ ) пропорциональна значению  $U_x$ . По окончании первого такта (интервала  $T_1$ ) на вход интегратора подается образцовое напряжение противоположной полярности  $U_{обр}$  и осуществляется интегрирование «вниз» до нулевого уровня с постоянной крутизной ( $\beta$ ). В результате формируется импульс, длительность которого линейно зависит от входного напряжения. Эта длительность измеряется с помощью встроенного измерителя временных интервалов (ИВИ)  $t_x = mT_{сч}$ .

Цикл  $T = T_1 + T_2$  – вырабатывает блок управления (БУ). Если считать, что за время  $T_x$  характеристики интегратора не изменились, тогда  $t_x = T_1 U_x / U_{обр} = mT_{сч}$ .

$$U_x = U_{\text{обр}} \frac{T_{\text{сч}}}{T_1} \cdot m = m \cdot 10^p$$

Откуда получается уравнение измерения:

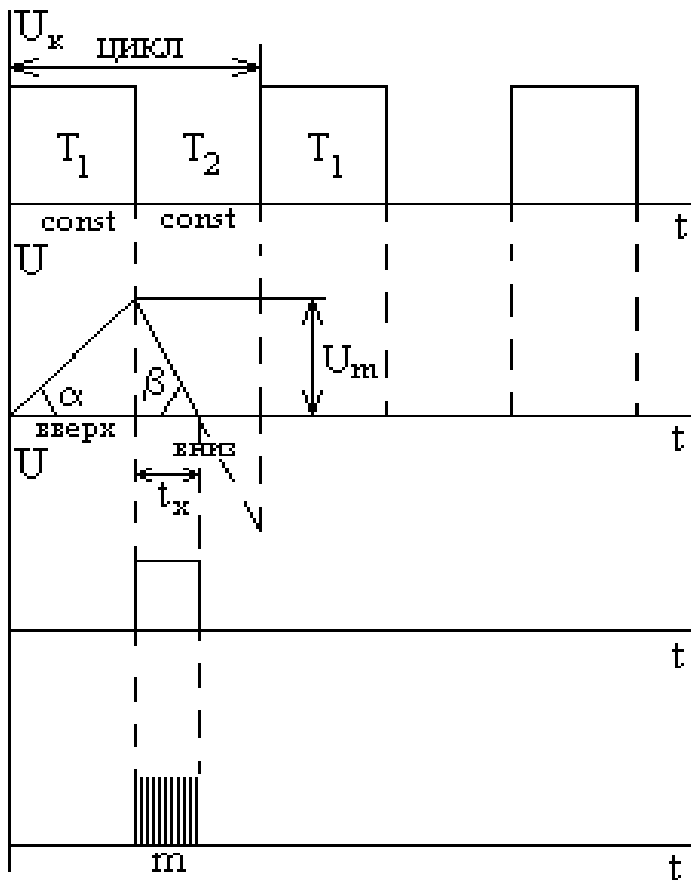


Рис. 13

но числу отрицательных. При этом изменение площади в конце интегрирования малое. ЦВ, реализующие метод двойного интегрирования, имеют погрешность измерения 0,02 ... 0,005%.

Основные составляющие погрешности: погрешности преобразования, сравнения, квантования (дискретизации), формирования временных интервалов. Медленные изменения характеристик интегратора (старение) не будут влиять на результат измерения.

Для компенсации помех в некоторых приборах имеется система АПЧ, которая устанавливает равенство  $T_1 = nT_{\text{ПОМЕХИ}}$ . При выборе интервала  $T_1$ , равного целому числу периодов помехи обеспечивается подавление помех более 40 дБ. Если помеха высокочастотная, то при двойном интегрировании она компенсируется, так как периодов много и число положительных полуволн приблизительно равно числу отрицательных.

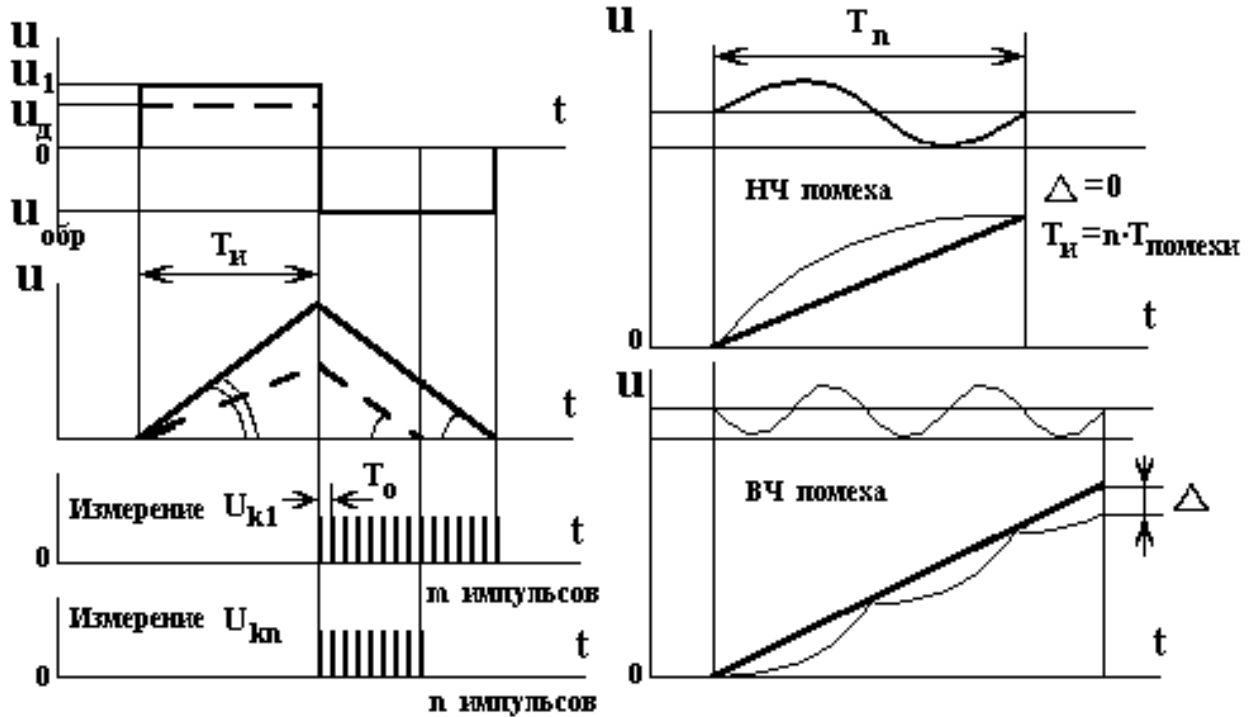


Рис. 14

**Вольтметр поразрядного кодирования** осуществляет сравнение  $U_x$  с рядом образцовых напряжений, значения которых вырабатываются ЦАП и изменяются по определенному закону от большего значения к меньшему.

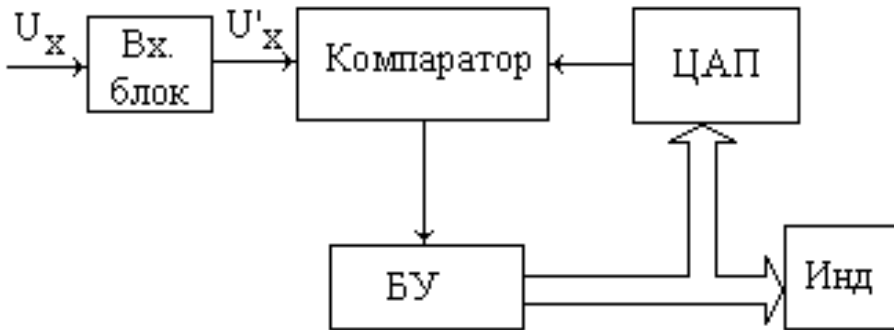


Рис. 15

Рассмотрим работу на конкретном примере. Пусть ЦАП имеет  $n$  двоичных разрядов: младший 1 мВ и далее 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 мВ.

Сравнение начинается со старшего разряда ЦАП. Ячейка остается включенной, если напряжение ЦАП в  $i$ -ом шаге компенсации остается меньше  $U_x$ ; если оно больше, то ячейка выключается. На каждом шаге вес включенных ячеек суммируется. Таким образом, приближение к  $U_x$  осуществляется снизу. Результат

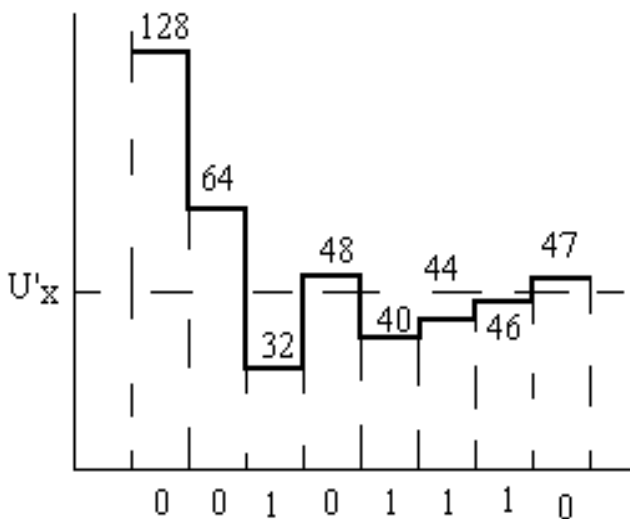


Рис. 16

$$U_x = q \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$

где  $q$  – напряжение соответствующее единице младшего разряда;  $a_i=0,1$  в зависи-

мости от соотношения  $U_x$  и  $U_{ЦАП} = U_{ki}$ .

Пусть на вход подано напряжение 46,7 мВ. Компенсирующее напряжение и код  $a_i$  для каждого такта работы представлены в таблице и на временной диаграмме. Результат измерения 46 мВ.

$U_x$	$i$	$U_i$	$U_{ki}$	$U_{ki} - U_x$	$a_i$ код
46.7	1	128	128	>0	0
	2	64	64	>0	0
	3	32	32	<0	1
	4	16	48	>0	0
	5	8	40	<0	1
	6	4	44	<0	1
	7	2	46	<0	1
	8	1	47	>0	0

В реальных вольтметрах напряжение ячеек ЦАП может изменяться по двоично – десятичному коду, когда каждый разряд представлен 4 ячейками в коде 1-2-4-8. в нашем случае это были бы ячейки 1.2.4.8; 10.20.40.80.80; 100 мВ. Число ячеек при этом возрастает незначительно, но упрощается дешифрация. Каждая тетрада работает на свой разряд десятичного индикатора.

Основные погрешности вольтметров этого типа: погрешности ЦАП, компаратора, дискретности, входных цепей. Метод очень чувствителен к помехам, поэтому нужны хорошие входные фильтры. Ошибочно включенная ячейка ЦАП уже не может отключиться до конца цикла уравнивания.

Достоинства приборов взвешивания: малая погрешность 0,05...0,001% и высокое быстродействие.

**Частотно – импульсный вольтметр** реализует преобразование входного напряжения в частоту, которая измеряется встроенным ЭСЧ.

Для преобразования  $U \rightarrow f$  используются интегрирующие преобразователи.



Рис. 17

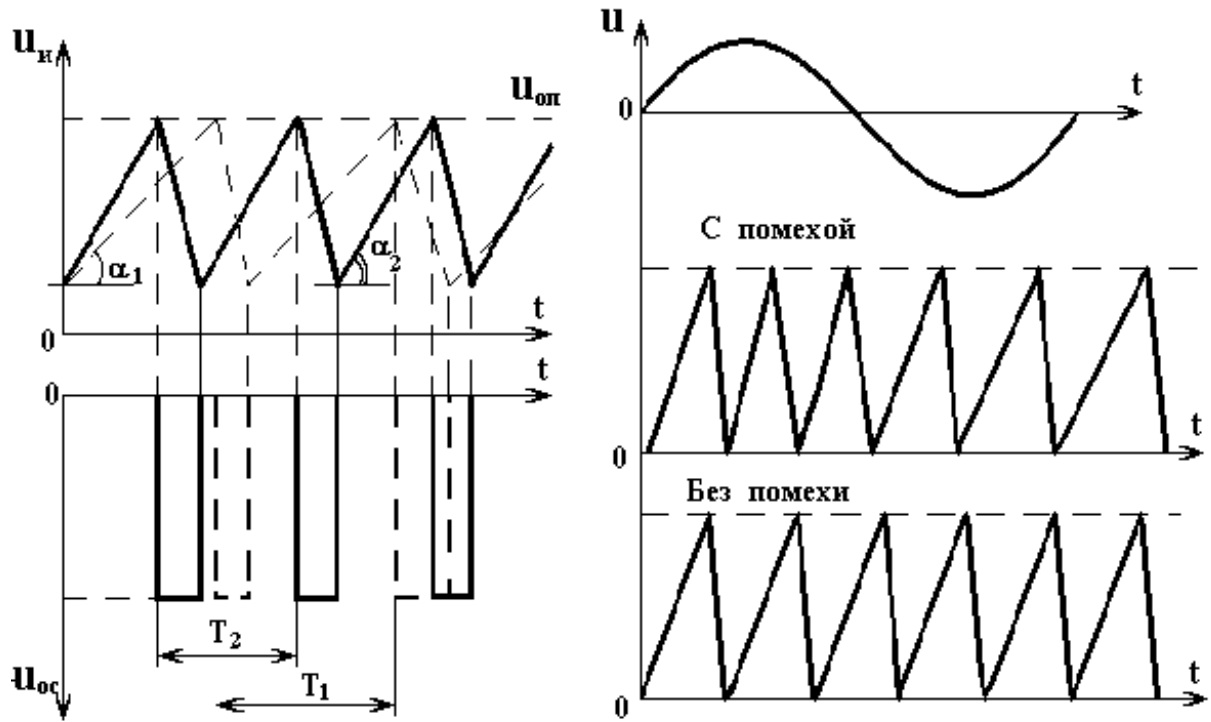


Рис. 18

Данный принцип измерения относят к интегрирующим, так как уменьшается погрешность, обусловленная периодической помехой. Измеряемое напряжение преобразуется в частоту по линейному закону. Если при измерении усреднение частоты производится за время, равное целому числу периодов помехи, или время измерения много больше периода помехи, тогда измеренное среднее значение частоты равно частоте сигнала без помехи. Короткие импульсные помехи практически не изменяют частоту и не влияют на результат.

Напряжение в частоту преобразуется за счет использования импульсной обратной связи (ОС). Входное напряжение интегрируется до опорного (порогового) уровня. При этом

$$V = \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{\text{пор}}}{T_x} \sim U_x, \text{ если } U_x \gg U_{\text{пор}}.$$

При равенстве  $U_x$  и  $U_{\text{пор}}$  срабатывает компаратор и формируется импульс ОС, возвращающий интегратор в исходное состояние. Частота срабатывания компаратора пропорциональна измеряемому напряжению:  $U_x \sim U_{\text{пор}} F_x$ . Путем выбора параметров схемы можно обеспечить  $U_x = 10^p \cdot F_x$ , где  $p = \pm 1, 2, \dots$ , т.е. сделать прибор прямопоказывающим.

Приборы, реализующие методы преобразования напряжения в частоту, обеспечивают погрешность измерения 0,1...0,005%, высокое подавление помех (более 40 дБ), высокую чувствительность (0,1...1 мкВ).

**Современные ЦВ**, как правило, микропроцессорные, многофункциональные, с автокалибровкой, АВП, автоматическим выбором полярности, с



самопроверкой, с возможностями математической обработки и усреднения результатов многократных измерений.

Наиболее простые времяимпульсные методы. При этом чаще применяют двойное интегрирование. Предел допускаемой основной погрешности ЦВ обычно задается двухчленной формулой:

$\delta = \pm [b + a|A_k/A_n|]$  или  $\delta = \pm [c + d|A_k/A_n - 1|]$ , где  $a, b, c$  и  $d$  - постоянные числа;  $A_n$  - показания;  $A_k$  - предел измерения.

Входной блок универсального и многофункционального вольтметра содержит аналоговые преобразователи (аттенюатор, усилитель, фильтр и т.д.)

Современные ЦВ имеют 4 входных зажима:

H – (High – высокий) – зажим высокого потенциала;

L – (Low – низкий) – зажим низкого потенциала;

G – (Guard – защита) – обозначает экран входных цепей;

⊥ – корпус прибора.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия времяимпульсного вольтметра.
2. Какова структура погрешности времяимпульсного вольтметра с классификацией составляющих?
3. Как во времяимпульсных вольтметрах подавляются помехи?
4. Поясните принцип действия вольтметра двойного интегрирования.
5. Какова структура погрешности вольтметра двойного интегрирования с классификацией составляющих?
6. Как в вольтметрах двойного интегрирования подавляются помехи?
7. Как работает вольтметр поразрядного кодирования?
8. Какова структура погрешности вольтметра поразрядного кодирования с классификацией составляющих?
9. Как в вольтметрах поразрядного кодирования подавляются помехи?
10. Как работает частотно – импульсный вольтметр?
11. Какова структура погрешности частотно – импульсного вольтметра с классификацией составляющих?
12. Как в частотно – импульсных вольтметрах подавляются помехи?
13. Поясните работу вольтметра поразрядного кодирования, измеряющего напряжение  $10,00 - 0,01 * N$  В с индикацией 4 десятичных разряда. Обоснуйте выбор ячеек образцового ЦАП и требования к входному делителю.

Примечание: N – номер студента по списку группы.

### ЛЕКЦИЯ: ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Измерение мощности наиболее распространено в диапазоне СВЧ, т.к. понятие напряжения там не используется. Приборы для измерения – это ваттметры проходящей (М2) и поглощающей (М3) мощности.

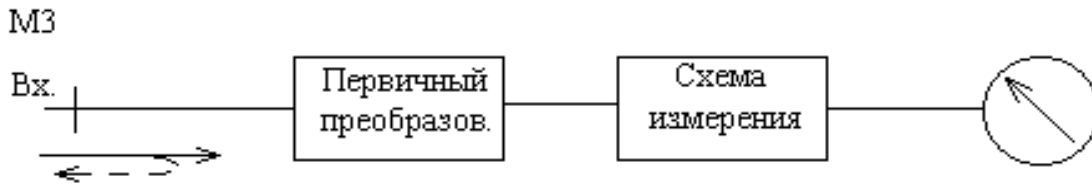


Рис. 1

Прибор типа М3 можно включить как прибор М2 с использованием направленного ответвителя (НО). Обычно НО применяется для ответвления падающей волны, но если его еще включить на ответвление отраженной волны, то можно измерить коэффициент отражения, т.е. оценить согласование в тракте или импеданс нагрузки.

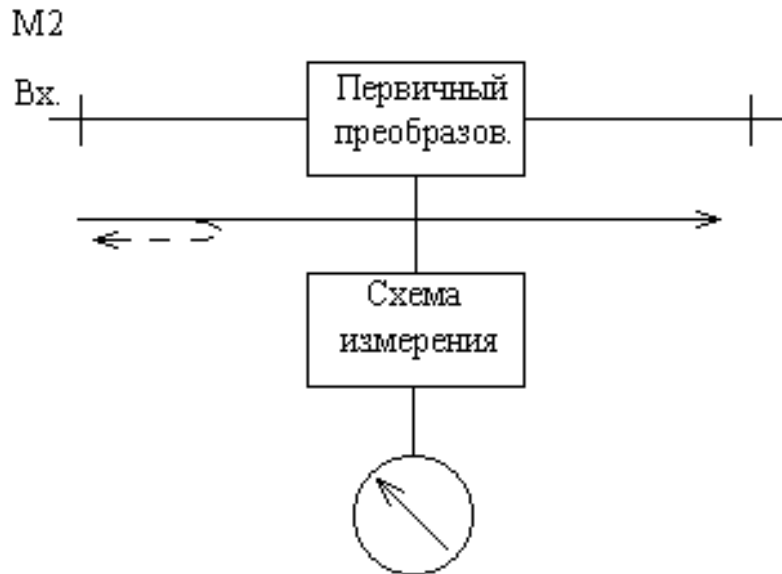


Рис. 2

Единицы измерения: абсолютные (Вт, мВт, мкВт);

относительные (логарифмические  $\alpha(\text{дБ})=10\lg P_x/P_0$ ).

В зависимости от соотношения  $P_x$  и  $P_0$  значение  $\alpha$  может быть со знаком «+» или «-». Знак «-» означает, что  $P_x < P_0$ . Обычно выбирают  $P_0=1\text{Вт}$  или  $1\text{мВт}$ , тогда  $+10\text{дБ}\cdot\text{мВт} = -20\text{дБ}\cdot\text{Вт} \rightarrow 10\text{ мВт}$ . Значение  $30\text{дБ}\cdot\text{Вт} \rightarrow 1\text{кВт}$ ;  $+30\text{дБ}\cdot\text{Вт} \rightarrow 1\text{кВт}$ .

В комплекте с направленными ответвителями, коммутаторами, делителями ваттметры могут применяться для широкого круга измерений. Учитывая наличие цифровых (автоматизированных) ваттметров на их базе возможно построение автоматизированных комплексов и систем диапазона СВЧ, где все измерения очень трудоемки.

Некоторые реальные применения:

- Измерение мощности и интенсивности излучения (плотности потока мощности, напряженности поля, амплитудного распределения поля в пространстве...).
- Определение коэффициента передачи (затухания, усиления, потерь, развязки...):  $K_x = 10\lg P_{\text{ВХ}}/P_{\text{ВЫХ}}$  - затухание;  $K_x = 10\lg P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$  - усиление.
- Определение коэффициента отражения, КСВ, импеданса нагрузки.

- Проверка стробоскопических осциллографов и других СВЧ приборов.

Ваттметры можно классифицировать по различным признакам:

1. По виду используемых первичных преобразователей
  - Тепловые (калориметрические, термоэлектрические, термисторные, болометрические...);
  - Механические (пондеромоторные);
  - Электронные (диодные, на эффекте Холла) и др.
2. По характеру измеряемой мощности:
  - Среднего значения мощности непрерывных сигналов;
  - Импульсно – модулированных сигналов (среднего значения);
  - Импульсной мощности (мощности в импульсе).
3. По типу тракта:
  - Коаксиальные;
  - Волноводные.
4. По классу точности: 2,5; 4,0; 6,0; 10; 15; 25.
5. По уровню средних значений мощности:
  - Малой до 10 мВт;
  - Средней 10 мВт...10 Вт;
  - Большой свыше 10 Вт.

Основные параметры ваттметров определяются первичными преобразователями приборов:

1. Пределы измерений мощности и динамический диапазон. Динамический диапазон преобразователя обычно 30...40 дБ расширяется аттенуаторами. В радиотехнике приходится измерять менее 1 мкВт и более 100 кВт, т.е. динамический диапазон свыше 110 дБ.

2. Рабочий диапазон частот (от сотен МГц до десятков и сотен ГГц)

3. Основная погрешность (от 0,2% до 20%);

4. Импеданс ( $Z_{вх}$ ). В настоящее время наиболее распространены коаксиальные тракты с волновым сопротивлением 50 ом.

5. Коэффициент преобразования – отношение сигнала на выходе к сигналу на входе преобразователя. В зависимости от типа он может иметь разную размерность:

$$K'_{пр} = U/P \quad (\text{термоэлектрический}); \quad K''_{пр} = \Delta R/\Delta P \quad (\text{термисторный}) \text{ и др.}$$

6. Коэффициент эффективности преобразования – отношение коэффициента преобразования преобразователя на СВЧ к коэффициенту преобразования на опорном сигнале (это может быть постоянный ток, НЧ-сигнал и др.):

$$K_э = K_{прСВЧ} / K_{прО}$$

Реальные значения коэффициента в зависимости от класса точности могут изменяться в пределах от  $1 \pm 0,06$  (для 2,5%) до  $1 \pm 0,6$  (для 25%).

7. Время установления показаний  $T_y \approx (5 \dots 6) \tau$  зависит от типа преобразователя и составляет от нескольких периодов колебаний СВЧ до десятков минут.

На результаты измерений в значительной степени влияет рассогласование преобразователя. Для повышения точности измерений при известном модуле коэффициента отражения преобразователя эту погрешность можно учесть, используя корректирующие таблицы, графики или формулы:

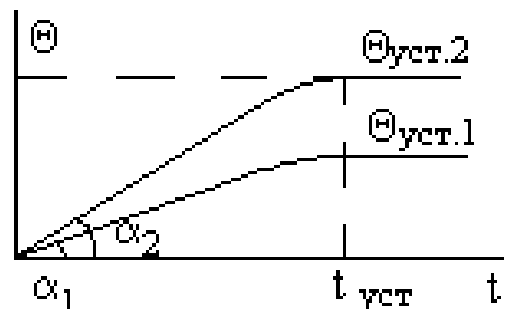
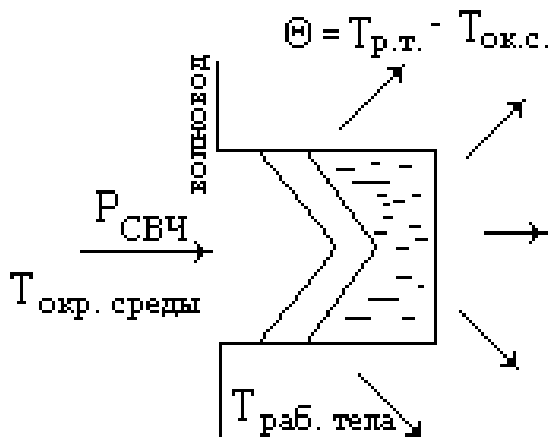
$$P_{\text{пр}} = P_{\text{измеренное}} = P_{\text{пад}} \left( 1 - |\Gamma_{\text{пр}}|^2 \right), \text{ откуда } P_{\text{пад}} = P_{\text{изм}} / \left( 1 - |\Gamma_{\text{пр}}|^2 \right).$$

При автоматической обработке в памяти прибора или ЭВМ может иметься массив данных о значениях коэффициента отражения на разных частотах.

**Калориметрический метод** – используется во всем диапазоне частот как наиболее точный (0,5%), но работающий с уровнем мощности  $\geq 100 \text{ мкВт}$ . Быстродействие низкое. Приборы бывают 2-ух типов:

- Калориметры с переменной температурой
- Колориметры с постоянной температурой

1. *Калориметры с переменной температурой* – используют в первичном преобразователе (ПП) рабочее тело (РТ) жидкое, твердое или сыпучее, которое нагревается при подаче мощности  $P_{\text{СВЧ}}$ .



**Рис. 3**

**Рис. 4**

Вначале температура РТ равна температуре окружающей среды (ОС), но из-за рассеивания мощности СВЧ она начинает плавно изменяться. Начальный участок линейный во времени. Крутизна пропорциональна  $P_{\text{СВЧ}}$ . Как только температура РТ превысит температуру ОС начнется рассеивание тепла во

внешнюю среду. После некоторого продолжительного времени  $t_{уст}$  будет установившийся режим работы, когда разностная температура  $Q = T_{РТ} - T_{ОС}$  постоянна во времени, поскольку вся поступающая мощность  $P_{СВЧ}$ , преобразованная в тепло будет рассеиваться во вне. Мощность превращается в тепло и за счет излучения тепла в пространство температура остается постоянной. Если мощность изменится, то процесс пойдет под другим углом ( $P_2 > P_1$ ) и установившееся значение разностной температуры будет другим. Таким образом, можно измерять либо скорость изменения температуры на начальном участке, либо установившееся значение температуры  $РТ \quad P_{СВЧ} \sim \Theta$ .

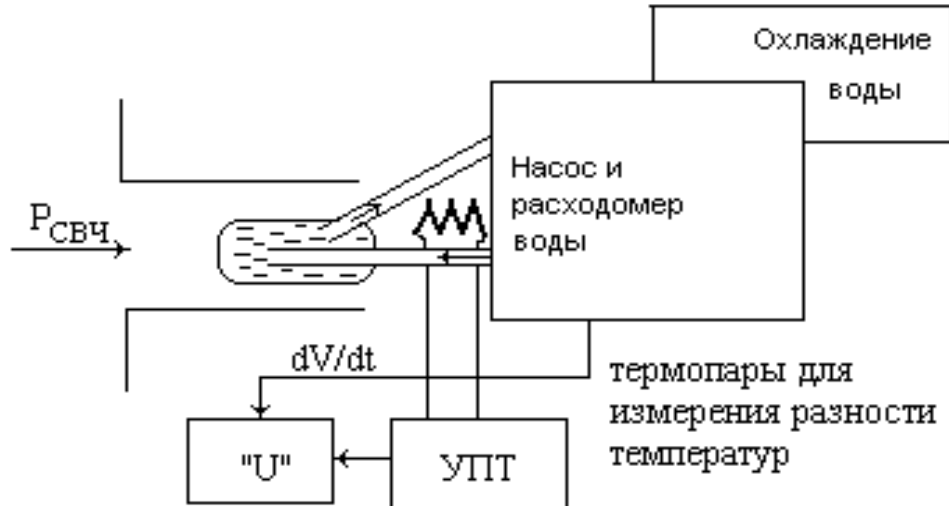


Рис. 5

В приведенной схеме проточного калориметра в качестве РТ применена вода. Для измерения разности температур  $t_2 \text{ } ^\circ\text{C} - t_1 \text{ } ^\circ\text{C}$  используются термопары (например серебро - константан), УПТ и на выходе вольтметр.

Недостатки калориметров переменной температуры:

- Сложность системы подачи воды и учета ее расхода.
- Любое вещество РТ при изменении температуры изменяет свои физические свойства, это приводит к возникновению дополнительной погрешности, обусловленной возникающим рассогласованием в тракте.

2. Калориметры с постоянной температурой работают в неизменной температурной точке и бывают следующих видов:

- С фазовым переходом РТ из одного состояния в другое (вода – пар, лед – вода...). Мощность оценивается по скорости фазового перехода (по скорости образования пара). Приборы очень сложные.
- Компенсационные на методе замещения. Предварительно разогревают РТ до требуемой рабочей температуры. При подаче СВЧ уменьшают разогрев до такой же температуры РТ ( $t^\circ\text{C}$ ), которая является рабочей.
- Компенсационные с охлаждением. Разогрев РТ компенсируется принудительным охлаждением (например с использованием эффекта Пельтье).

Компенсационный колориметр на методе замещения использует процедуру восстановления рабочей температуры в исходную точку. РТ предварительно разогревается с помощью нагревательного элемента постоянным или НЧ током. Мощность расходуемая на нагрев регулируется и измеряется специальной схемой. При подаче СВЧ сигнала происходит дополнительный разогрев рабочего тела, но снизив мощность подаваемую на нагревательный элемент, можно опять привести его температуру в исходное состояние. Мощность СВЧ при этом определяется по разнице мощностей затрачиваемых на разогрев вначале и в конце.

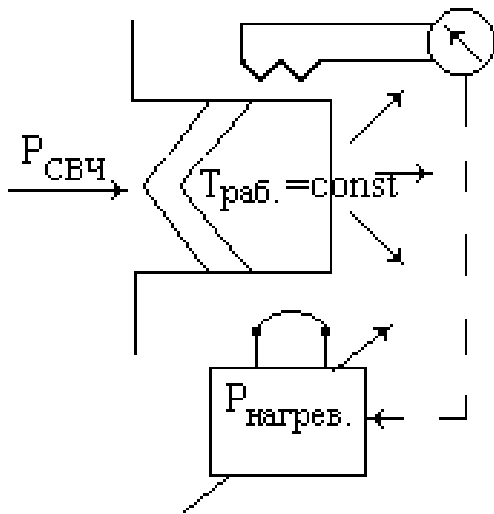


Рис. 6

В основе метода лежит вера, что нагрев РТ сигналами разной частоты должен быть одинаковым при одинаковой мощности.

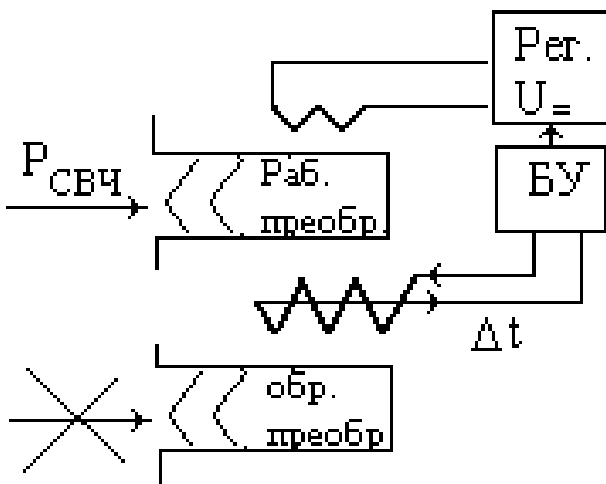


Рис. 7

Преобразователи полностью идентичны. После подачи мощности СВЧ охлаждающими концами верхней термопары температуру РТ приводят к температуре образцового преобразователя. По мощности, затрачиваемой на охлаждение, оценивается мощность СВЧ.

**Терморезистивные методы** используют эффект изменение сопротивления термочувствительного резистора СВЧ при нагревании его мощностью сигнала СВЧ. На СВЧ в качестве термочувствительных резисторов применяются болометры и термисторы.

*Болометры* изготавливают в виде проволоки или тонкой металлической пленки, нанесенной на диэлектрик. Материал покрытия платина или палладий. У них ТКС положительный,  $R_t$  линейно растет с ростом рассеиваемой мощности.

*Термисторы* изготавливают из полупроводникового сплава (окислов меди, марганца, кобальта). Бусинка помещается в стеклянный баллон с золочеными выводами. Для них ТКС отрицательный,  $R_t$  уменьшается при подаче мощности.

И те, и другие непосредственно включаются в тракт, поглощают и рассеивают мощность СВЧ. Элементы являются очень чувствительными и могут работать с сигналами менее 1 мкВт. В настоящее время чаще используют термисторы.



Рис. 8. Болومتر

Рис. 9.

### Термистор

Из-за малых размеров термисторов и болометров они рассеивают небольшую тепловую мощность и применяются для измерения малых мощностей ( $10^{-6} \dots 10^{-2}$  Вт).

Для изменения  $R_t$  применяют мостовые схемы обычно.

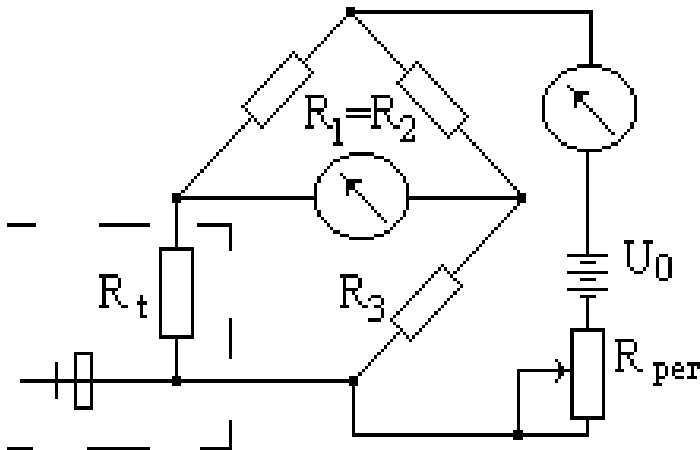


Рис. 10

### Резистивный мост Уитстона

Термистор является оконечной нагрузкой тракта СВЧ. Номиналы резисторов таковы, чтобы

$$R_1 \approx R_2; R_3 \approx R_t \approx Z_B.$$

Цепь содержит индикатор баланса моста («0»-индикатор), а также прибор для измерения постоянного тока (мощности). Начальная балансировка моста

осуществляется сопротивлением  $R_{\text{РЕГ}}$  без подачи сигнала СВЧ. Изменяя общий ток  $I_{\Sigma} = I'_{\Sigma} + I''_{\Sigma}$  регулируется ток в ветвях  $R_1 R_t$  и  $R_2 R_3$ . При этом рабочая точка термистора смещается в требуемую область.

При подаче СВЧ происходит разбалансировка за счет нагрева термистора на  $\Delta R_t$ . При малой  $P_{\text{СВЧ}}$  отклонение стрелки прибора, включенного в диагональ моста,  $I \sim P_{\text{СВЧ}}$ . Главный недостаток подобной методики состоит в том, что изменение  $R_t$  в процессе измерений работе приводит к рассогласованию в тракте. К тому же мал динамический диапазон линейной шкалы.

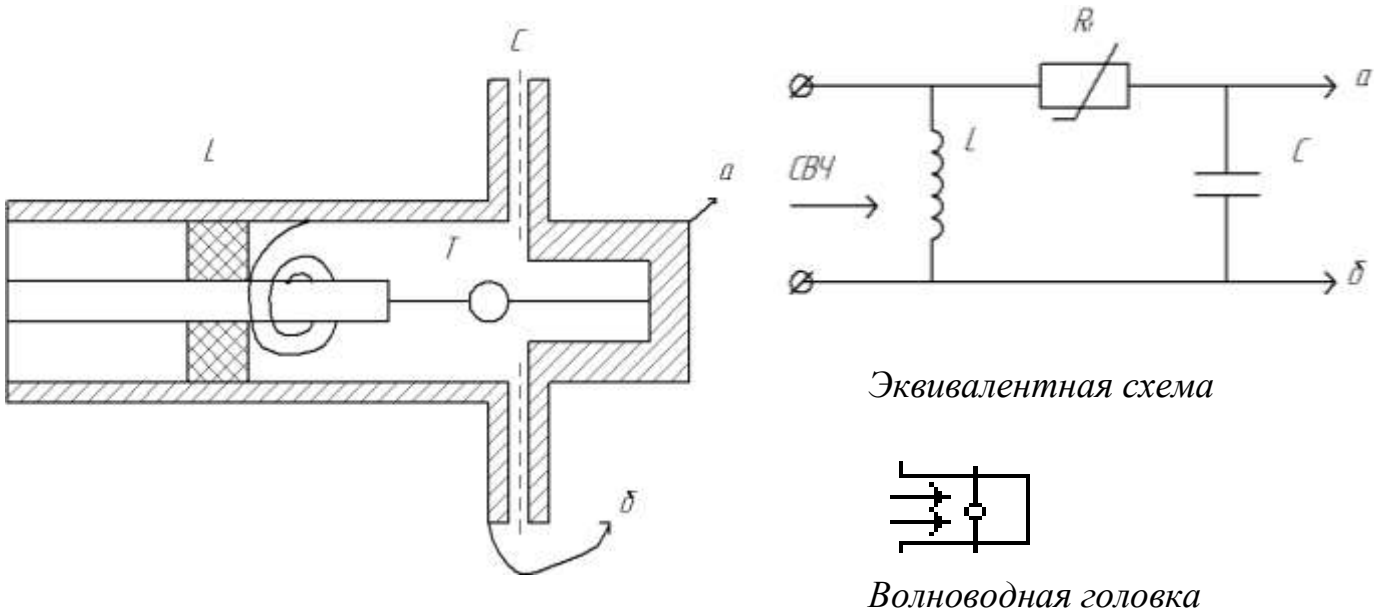
Для устранения этого используют метод замещения. В рабочей точке  $R_t \approx Z_B$  и тракт согласован. После разбалансировки моста при подаче  $P_{\text{СВЧ}}$  его вновь балансируют изменяя  $I_{\Sigma}$  и возвращая  $R_t$  в ту же точку (точку согласования). Мощность СВЧ определяется, как разность мощностей постоянного тока

между первой и второй балансировкой. При равенстве  $I_{\text{НЧ}} = I_{\text{ВЧ}}$  можно измерять общий ток  $I_{\text{с}}$ , так как ток через термистор известен  $I_{R_t} = I_{\text{с}}/2$ . Тогда

$$P_{\text{СВЧ}} = R_t \left( I_{\text{НЧ}}^2 - I_{\text{ВЧ}}^2 \right) / 4$$

На практике применяют более сложные схемы с двойной балансировкой от ПТ и НЧ, с двумя мостами (опорный мост для термокомпенсации).

Метод высокочувствительный, точный, но трудоемкий.



**Рис. 11**

Элементы L и C обеспечивают возможность включения моста в цепь ПТ. Для СВЧ L – не влияет, а C – замыкание (КЗ). Волноводные конструкции близки к конструкциям детекторных головок.

Погрешности обусловлены температурным дрейфом нуля, рассогласованием, погрешностью определения  $K_{\text{э}}$ , погрешностью измерения мощности замещения. Суммарная погрешность 1...5%.

**Термоэлектрический метод** использует преобразование СВЧ энергии в тепловую с помощью СВЧ дифференциальных термопар с дальнейшим измерением термо-ЭДС, вырабатываемой термопарой:

$P_{\text{СВЧ}} = U_{\text{ТЭДС}} / K_{\text{пр}}$ . Метод применяют на малых  $P_{\text{СВЧ}}$ . Здесь не нужна термокомпенсация, так как  $U_{\text{ТЭДС}}$  не зависит от температуры окружающей среды. Термопары сложные в виде напыления на слюдяную подложку или стекловолокно (диаметр 20...40мкм) материалов: висмут – сурьма; хромель – копель (сплавы металлов); теллурид свинца – кремний (п/п материалы).

В преобразователе обычно используют две термопары, включенные в цепь параллельно и последовательно для повышения чувствительности. Конструкции преобразователей достаточно сложные. Обычно используются вставки термопар для преобразователей, которые могут заменяться при перегорании.



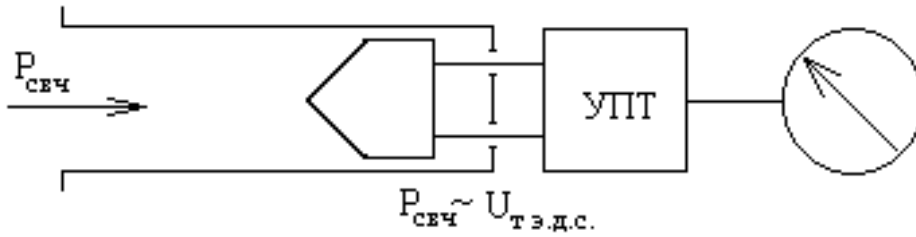


Рис. 12

Слюдяной диск вставляется в специальный держатель. Двусторонняя металлизация диска позволяет получить

разделительные емкости.

*Основные достоинства* коаксиальных преобразователей: широкая полоса рабочих частот, высокая чувствительность и большой динамический диапазон.

*Погрешности:* определения  $K_{np}$ ,  $K_3$ ; нелинейности  $K_{np}$ ; калибровки; рас согласования.

*Недостатки:* плохая устойчивость к перегрузкам (сгорает)

Метод сейчас наиболее широко применяемый.

Например, цифровой ваттметр МЗ – 51 (выход УПТ соединен с АЦП). Имеется режим АВП, ДУ. Встроенный калибратор. Диапазон рабочих частот 0,02...17,85ГГц. Рабочий диапазон измеряемых мощностей 1 мкВт – 10 мВт.

$$\delta = \pm \left( 4 + 0.1 \left( \frac{P_{\text{кон}}}{P_x} - 1 \right) \right) \%$$

Основная погрешность не более 0,4мкВт/мин.

$K_3=0,93...1,06$ . Дрейф нуля

**Пондеромоторный метод** – ос

нован на явлении механического воздействия сил ЭМП на металлические элементы линий передачи.

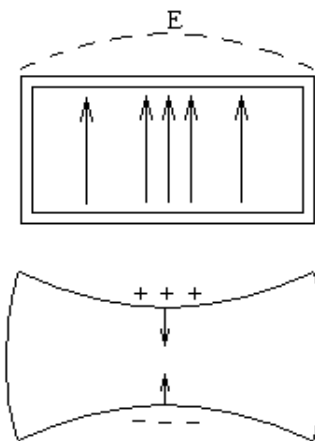


Рис. 13

Наиболее чувствительные – крутильные конструкции.

Проводящая пластина подвешивается на упругой нити. Электрическое поле и заряды на стенках индуцируют

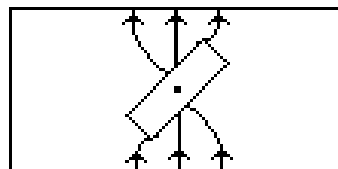
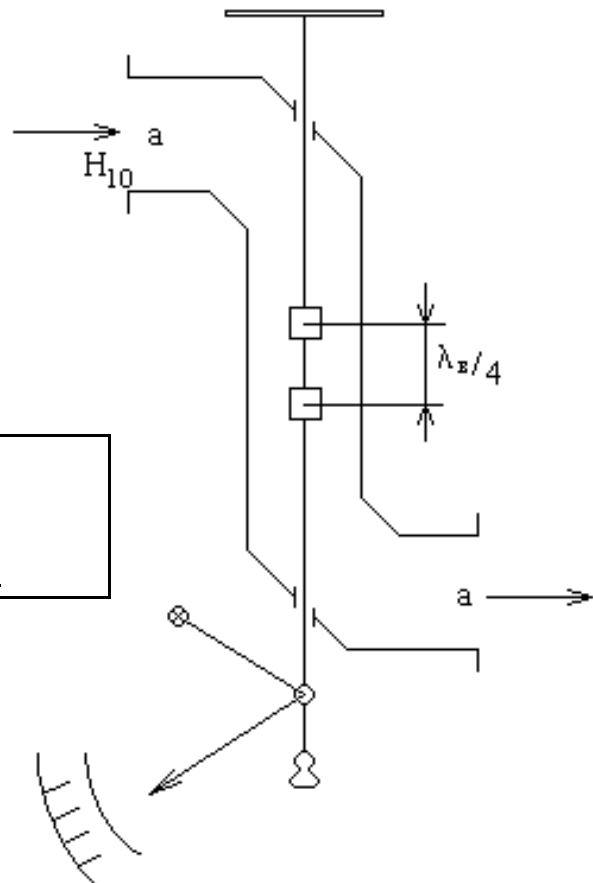


Рис. 14



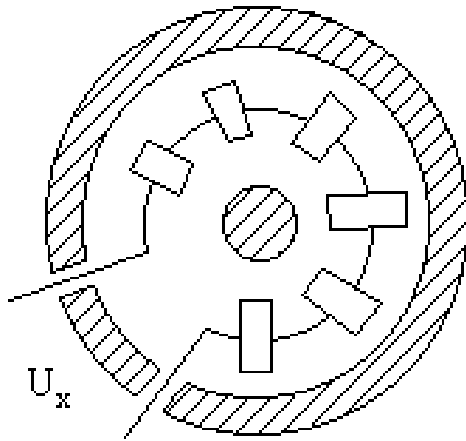
заряды в пластине – возникает вращающий момент.

**Рис. 15**

Начальный угол  $\psi_0 \approx 45^\circ$ . Две пластины для лучшего согласования.

Метод точный, но работающий с большими сигналами (более 1Вт). Обеспечивается измерение проходящей мощности. Метод узкополосный, сложен при калибровке, чувствителен к механическим воздействиям (вибрациям), но точный.

**Метод на эффекте Холла** также предназначен для измерения проходящей мощности. Применяют германий,  $InAs$  (арсенид индия) и др. ЭДС Холла обусловлена накоплением отклоняющихся в магнитном поле зарядов. Эффект Холла приводит к возникновению разности потенциалов в полупроводниковой пластине, по которой в определенном направлении протекает электрический ток, при помещении ее в магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны направлению тока.



**Рис. 16**

Датчики имеют малую чувствительность, поэтому их соединяют последовательно. Напряжение Холла пропорционально мгновенному значению плотности потока мощности. Усреднение по времени дает среднюю мощность.

Максимальная чувствительность 1...3 мкВ/мВт

*Недостатки*

ЭДС зависит от  $t^\circ C$ . Низкая чувствительность, малая точность, малый динамический диапазон.

Достоинство – малая инерционность.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как прибор поглощающей мощности использовать для измерения проходящей?
2. Как ваттметром измерить коэффициент отражения?
3. Назовите области применения ваттметров.
4. Приведите классификацию ваттметров по виду используемых первичных преобразователей.
5. В каких единицах измеряется коэффициент преобразования термоэлектрического и термисторного ваттметра?
6. Поясните устройство и работу калориметрического ваттметра с постоянной температурой.
7. Поясните терморезистивные методы и особенности построения их первичных преобразователей.

8. Поясните работу резистивного моста Уитстона.
9. Поясните термоэлектрический метод.
10. Поясните пондеромоторный метод.
11. Поясните метод на эффекте Холла.
12. Сколько мощности в Вт, если она равна  $\pm 3N$  дБ·мВт ?
13. Ваттметр среднего значения мощности показал величину  $+3N$  дБ·мВт. Какова импульсная мощность (мощность в импульсе), если скважность равна  $3N$ ?
14. Какова погрешность измерения  $4N$  мВт на шкале 100 мВт ваттметром класса точности 1 без учета рассогласования в тракте?
15. Какова погрешность измерения  $4N$  мВт на шкале 100 мВт ваттметром класса точности 1 с учетом рассогласования в тракте, если  $|\Gamma|=0,1N$  ?

Примечание: N – номер студента по списку группы.

### **ЛЕКЦИЯ: ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СИГНАЛОВ (ОСЦИЛЛОГРАФЫ)**

**Осциллограф** – *осциллум* (лат.) – колебание + *графо* (греч.) – пишу.

Электронный осциллограф предназначен для наблюдения, измерения и регистрации, электрических сигналов. Он позволяет осуществлять временной анализ, т.е. обеспечивает качественное и количественное исследование сигнала от времени.

Осциллограф – один из наиболее универсальных приборов, позволяющий измерять самые разнообразные характеристики и параметры сигналов и цепей (частота, период, скважность, амплитуда, длительность фронта, спад вершины, импеданс, нелинейные искажения, коэффициент передачи ...).

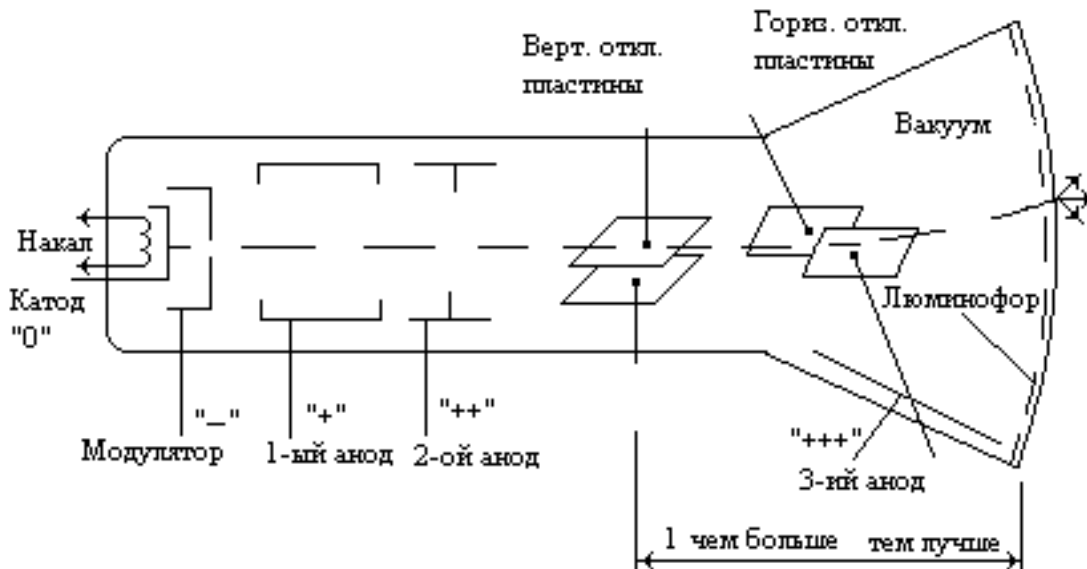
Подгруппы: С1 – универсальные, С7 – стробоскопические, С8 – запоминающие, С9 – специальные.

Осциллографы классифицируются также:

- По количеству каналов (одновременно исследуемых сигналов) – 1,2,4...;
- Ширине полосы пропускания (универсальные - до десятков МГц, ВЧ - до 300...500 МГц, стробоскопические - до десятков ГГц);
- По чувствительности канала вертикального отклонения (1мВ/см, 10мВ/см...);
- По виду индикатора (электронно – лучевые, газоразрядные, жидкокристаллические);
- По условиям эксплуатации и т.д.

#### **Индикаторные устройства**

Основой обычного осциллографа является ЭЛТ, которая в своей конструкции содержит: накал; катод; модулятор; 1-й анод; 2-й анод; вертикальные отклоняющие пластины (Y); горизонтальные отклоняющие пластины (X); 3-й анод; экран, покрытый люминофором, стеклянный баллон.

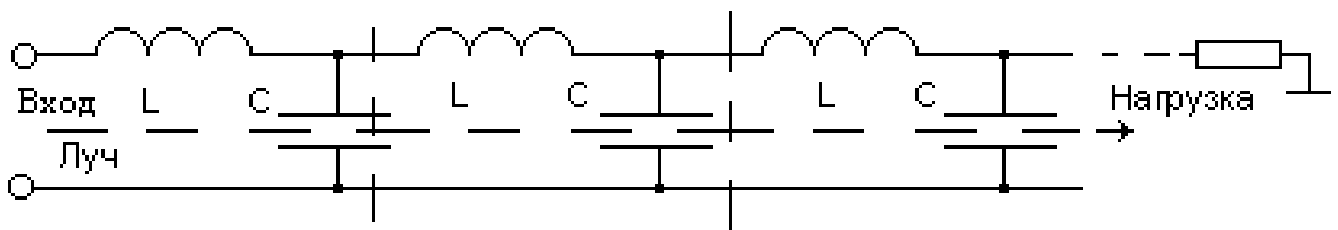


**Рис. 1**

Это трубка с электростатическим управлением (отклоняющие пластины конденсатора). Экран – люминесцентный. Аноды ускоряют луч, модулятор – фокусирует и изменяет яркость светового пятна.

Время свечения люминофора превышает время воздействия на него электронов (эффект послесвечения). Обычная ЭЛТ имеет полосу пропускания десятки МГц, улучшенные (специальные удлиненные ЭЛТ) - уже до сотен МГц.

Для обычной ЭЛТ, чем ниже чувствительность, тем шире полоса пропускания и наоборот. Чем больше скорость электронов, тем при том же напряжении вертикального отклонения будет меньше угол отклонения луча, т.е. меньше чувствительность прибора. С другой стороны большая скорость уменьшает угол пролета электронов и расширяет полосу пропускания. Дальнейшее расширение полосы пропускания достигается построением отклоняющей системы типа бегущей волны (ОСБВ), изготовленной в виде секций за-



медляющей системы.

**Рис. 2**

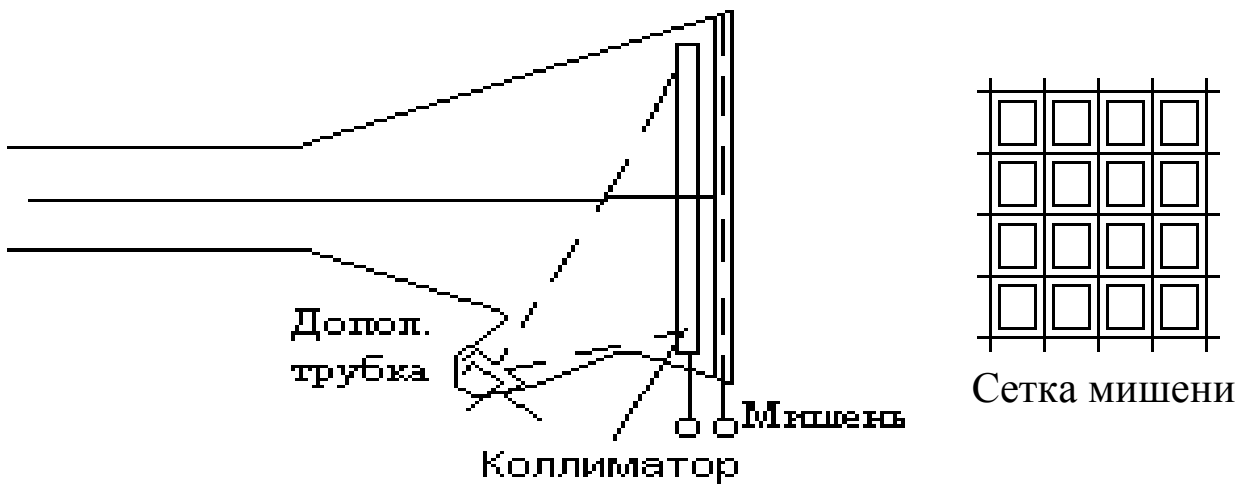
Фазовая скорость бегущей волны сигнала примерно равна скорости электронов. Их взаимодействие и, следовательно, отклонение обеспечивается в более широкой полосе частот, примерно на порядок выше обычных ЭЛТ (до нескольких ГГц) при высокой чувствительности. Сопротивление обеспечивает согласование.

Основные недостатки обычных ЭЛТ:

- Большая длина трубки (для лучшего отклонения);

- Высокие питающие напряжения;
- Ограниченные (малые) размеры экрана;
- Трудность согласования (сопряжения) экрана ЭЛТ с ЭВМ.

*Запоминающие трубки* имеют расположенную параллельно экрану ми-



*Рис. 3*

шень – мелкоструктурную сетку, покрытую слоем диэлектрика. Электронный луч высокой энергии «записывает» сигнал на мишени (осаждаются электроны) и проходит далее на люминофор. На мишени создается потенциальный рельеф сигнала, который длительно может сохраняться (особенно, если отключено питание ЭЛТ).

Узел воспроизведения создает поток электронов малой скорости, которые с помощью **коллиматора** равномерно облучают мишень. Потенциалы подбираются так, чтобы медленные электроны проходили мишень только там, где более высокий потенциальный рельеф. Их свечение (на люминофоре) повторяет записанный потенциальный рельеф. Стирание осуществляется подачей на мишень отрицательного выравнивающего импульса, под действием которого осевшие на мишени электроны разлетаются по сторонам.

В последнее время разработаны другие типы индикаторов: газоразрядные индикаторные панели, жидкокристаллические дисплеи и др.

Газоразрядные панели (матричного типа).

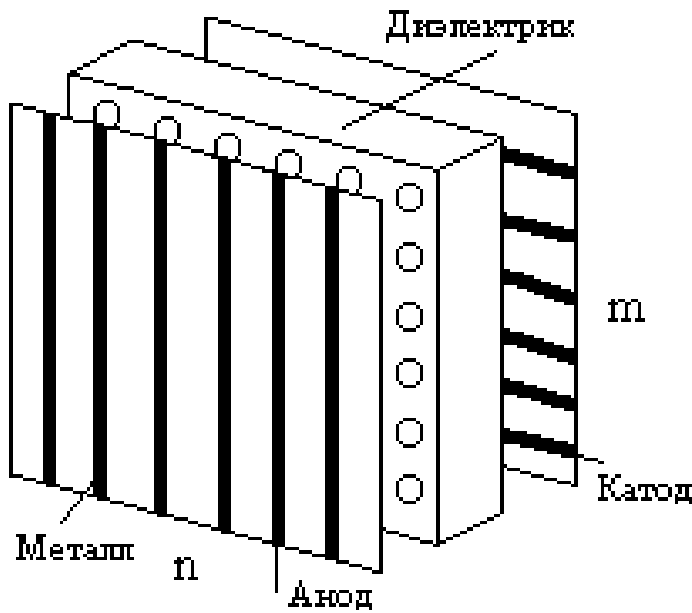


Рис. 4

Электроды лицевой пластины полупрозрачны – это аноды, другие – катоды. Отверстия в точках, где пересекаются аноды и катоды. Внутренний объем отверстий заполнен инертными газами, т.о. отверстия это газоразрядные ячейки, которые светятся при подаче потенциала около 250 В.

Выбором номеров столбца и строки можно зажигать и гасить соответствующие ячейки. Панель плоская, управляется кодом (цифрой). Число элементов  $m \times n$ . Например ГИП –

10000 (100×100 элементов).

Жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ) и жидкокристаллические дисплеи (ЖКД) находят все более широкое применение благодаря таким своим свойствам, как экономичность, малый вес и размер, абсолютно плоский экран и, что немаловажно, почти нулевое электромагнитное излучение. У этой технологии есть и некоторые ограничения, которые не позволяют ей полностью вытеснить электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), это: они потребляют достаточно большую энергию, а выводимая информация трудно читаема в некоторых условиях.

Главный компонент ЖКИ - жидкие кристаллы. Это вещества, которые имеют свойства жидкости, но молекулы в них ориентированы не хаотично. При воздействии сравнительно слабого магнитного поля молекулы ориентируются вдоль вектора магнитной индукции поля. При изменении ориентации молекул происходит изменение поляризации света, проходящего через ЖКИ.

Рассмотрим подробнее устройство ЖКИ. Тонкий слой жидких кристаллов находится между двумя стеклянными пластинами, покрытыми с внешней стороны прозрачным электропроводящим слоем (например, оксидом индия). Внутренняя поверхность этих пластин имеет микронасечки, по которым ориентируются молекулы жидкого кристалла в непосредственной близости от поверхности. Микронасечки на одной поверхности перпендикулярны микронасечкам на другой. Из-за свойств жидкого кристалла по мере удаления от одной пластины и приближения к другой, молекулы постепенно меняют ориентацию, так что получается структура, равномерно закрученная на  $90^\circ$  (иногда этот угол доходит до  $270^\circ$  - он определяется свойствами используемого жидкого кристалла). Для того чтобы было видно изменение поляризации света, необходим внутренний (зеркальная поверхность) или внешний (подсветка) источник света. В зависимости от применяемого источника света ЖКИ подразделяются на три типа: отражающие (reflective), использующие как отраженный, так и

встроенный источник света (transflective) и только внутренний источник (transmissive).

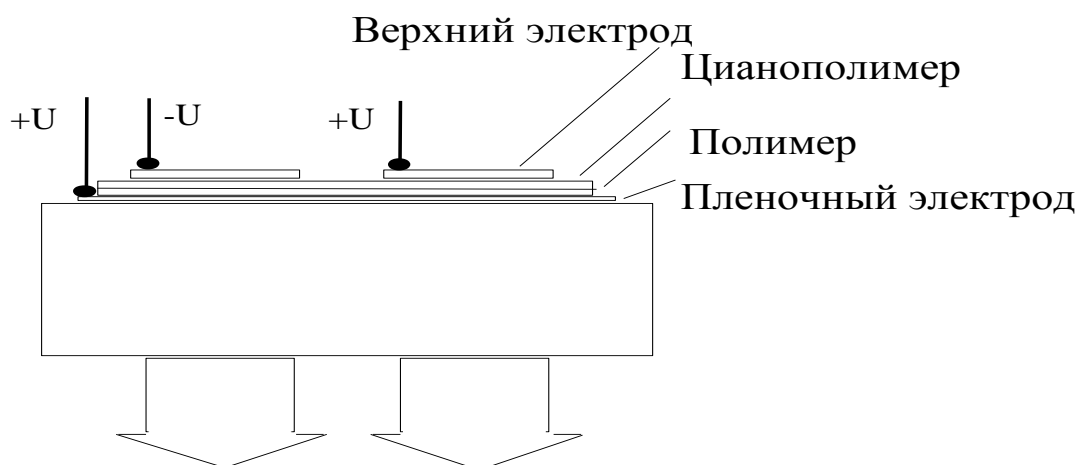
На текущий момент существует несколько технологий изготовления ЖКИ. Для небольших по количеству пикселей ЖКИ применяется *метод прямой адресации* (матрица с разрешением  $M \times N$  имеет  $M \times N + 1$  выводов) - каждый пиксел отдельно подсоединяется к управляющей схеме. В случае большого числа адресуемых пикселей применяется либо *мультиплексирование* (матрица с разрешением  $M \times N$  имеет  $M + N + 1$  выводов, но ухудшается контрастность, угол зрения и инерционность), либо *активная матрица* (каждый пиксел управляется отдельным транзистором).

**Пассивные ЖКИ.** Это наиболее распространенный тип ЖКИ, благодаря относительной дешевизне и отработанной технологии изготовления. При использовании специальных жидких кристаллов с углом закручивания, достигающим до  $270^\circ$  достаточно меньшее изменение напряжения для переключения пиксела. С приемлемым качеством можно мультиплексировать до 480 строк. Эти индикаторы отличаются повышенной контрастностью изображения и большим углом обзора.

**Ферроэлектрические ЖКИ.** Используются жидкие кристаллы, имеющие полярные молекулы. При приложении положительного электрического поля молекулы стремятся ориентироваться в направлении одной из стеклянных пластин. При приложении отрицательного электрического поля они ориентируются в другом направлении. Максимальное разрешение до 1000 строк, очень высокая контрастность изображения, низкая инерционность, но они более дорогие.

**Полимерно-дисперсные ЖКИ.** Маленькие пузырьки жидких кристаллов помещают внутрь прозрачного полимера. При подаче электрического поля молекулы в пузырьке ориентируются. При согласовании оптических параметров полимера и ориентированных под действием поля жидких кристаллов свет проходит через ЖКИ, не рассеиваясь. Так как поляризаторы не требуются, то изображение очень яркое. Однако возможности мультиплексирования ограничены.

**Светозлучение полимеров (СИП-технологии)** Основное преимущество - сочетание высокой производительности с низкой ценой. Дисплеи могут быть изготовлены в виде гибких листов пластмассы при использовании стандартных недорогих технологий. В СИП-дисплеях применяются низковольтные источники напряжения. Они излучают всей поверхностью, и поэтому подсветка не требуется.



**Рис. 5**

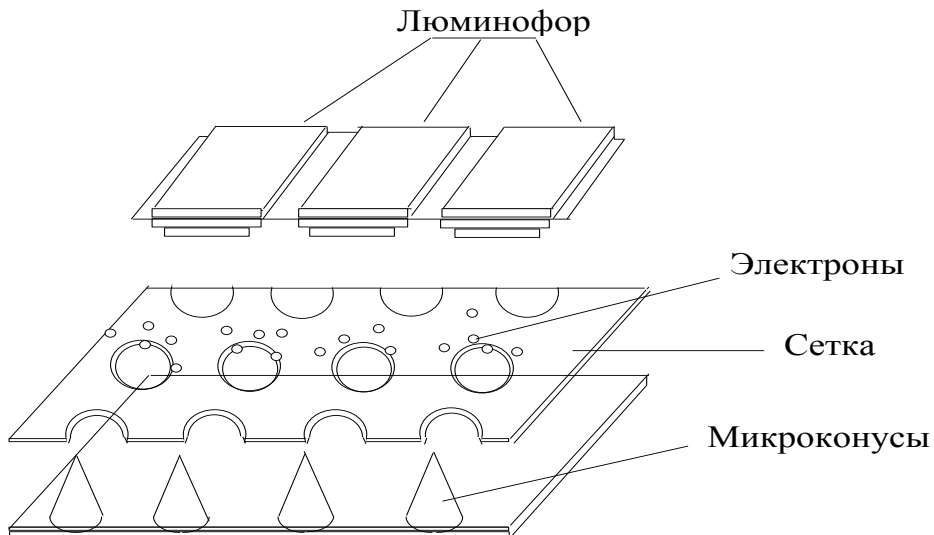
СИП-дисплеи изготавливают путем напыления тонкого слоя полимера на стекло или прозрачную пластмассу, предварительно покрытую окисью индия. Алюминиевый электрод располагается на поверхности полимера. При возникновении электрического поля между двумя электродами генерируется свет.

Можно получать различные цвета, изменяя структуру полимера; цвет связан непосредственно с шириной запрещенной зоны материала. Для PPV - это 2,4 эВ, что соответствует желтому/зеленому свечению. В структуре, показанной на рис. 5, к подложке примыкает слой цианополимера (2,1 эВ, т.е. красный/оранжевый цвет). Если ширина запрещенной зоны равна 2,8 эВ, то получается синий цвет. Таким образом, можно получить полную цветовую гамму последовательным созданием на подложке точечных или прямоугольных областей красного, зеленого и синего светоизлучающего полимера.

Эксперименты с СИП показывают, что можно добиться яркости более  $10000 \text{ кд/м}^2$  и времени переключения в микросекундном диапазоне. Еще одно их преимущество - угол зрения  $180^\circ$ .

**Дисплеи с полевой эмиссией** (ДПЭ) проще ЖК-дисплеев. Там, где в ЖК-дисплее необходимо три транзистора для управления каждым пикселем, в ДПЭ не нужно ни одного. Вместо этого имеется сетка, которая управляет потоком электронов, продуцируемых микроконусами (эмиттерами), непосредственно переводя пиксел во включенное или выключенное состояние (рис. 6). Основная проблема - сделать работу эмиттера более эффективной. Кроме этого существует задача снижения потребляемой мощности.





**Рис. 6**

Преимуществом ДПЭ является их размер. Другие их положительные особенности - высокая цветовая насыщенность, большой угол зрения и малая зернистость. Но самое большое преимущество ДПЭ состоит в том, что они очень просто изготавливаются: число производственных операций меньше чем у ЖК-дисплеев и активных матричных экранов.

**Типовая структурная схема универсального осциллографа (рис. 7)**

1. Входной блок – узлы согласования входа, аттенюатор, цепи развязки.
2. Линия задержки – обеспечивает задержку сигнала по отношению к развертке.
3. ГЛИН - генератор линейно изменяющегося напряжения (генератор развертки по X для горизонтального отклонения луча).
4. Система синхронизации – вырабатывает синхросигнал начала развертки из сигнала внешнего запуска, внутреннего, от сети или др.
5. ПУ – предварительный усилитель.
6. УВО и УГО – усилители вертикального и горизонтального отклонения.
7. Устройства управления яркостью (канал Z).

Не показаны средства измерения параметров сигнала, которые позволяют измерить напряжение (уровень) и интервалы времени. Это калибраторы усиления, с помощью которых проверяют и осуществляют градуировку экрана по X и Y. В простейшем случае – это генераторы сигналов с известными параметрами: длительностью импульсов и амплитудой (10мс, 100мВ).

В более сложных приборах – это цифровые измерители уровней и длительностей, которые на экране отмечаются метками времени и уровня (линии уровня и времени измерения).

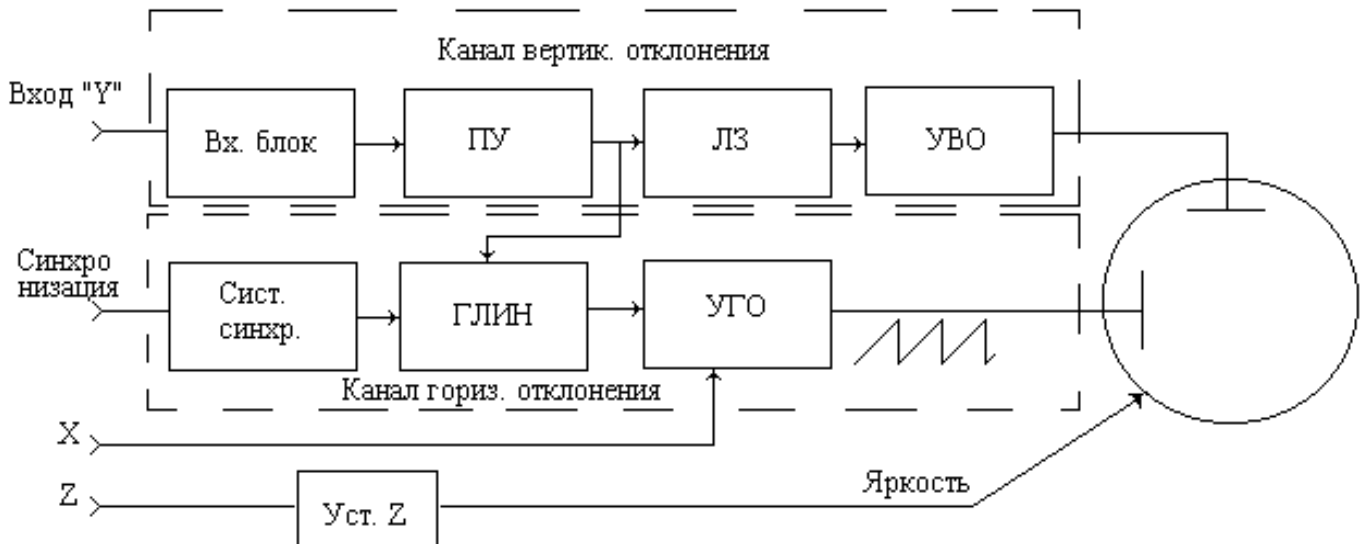
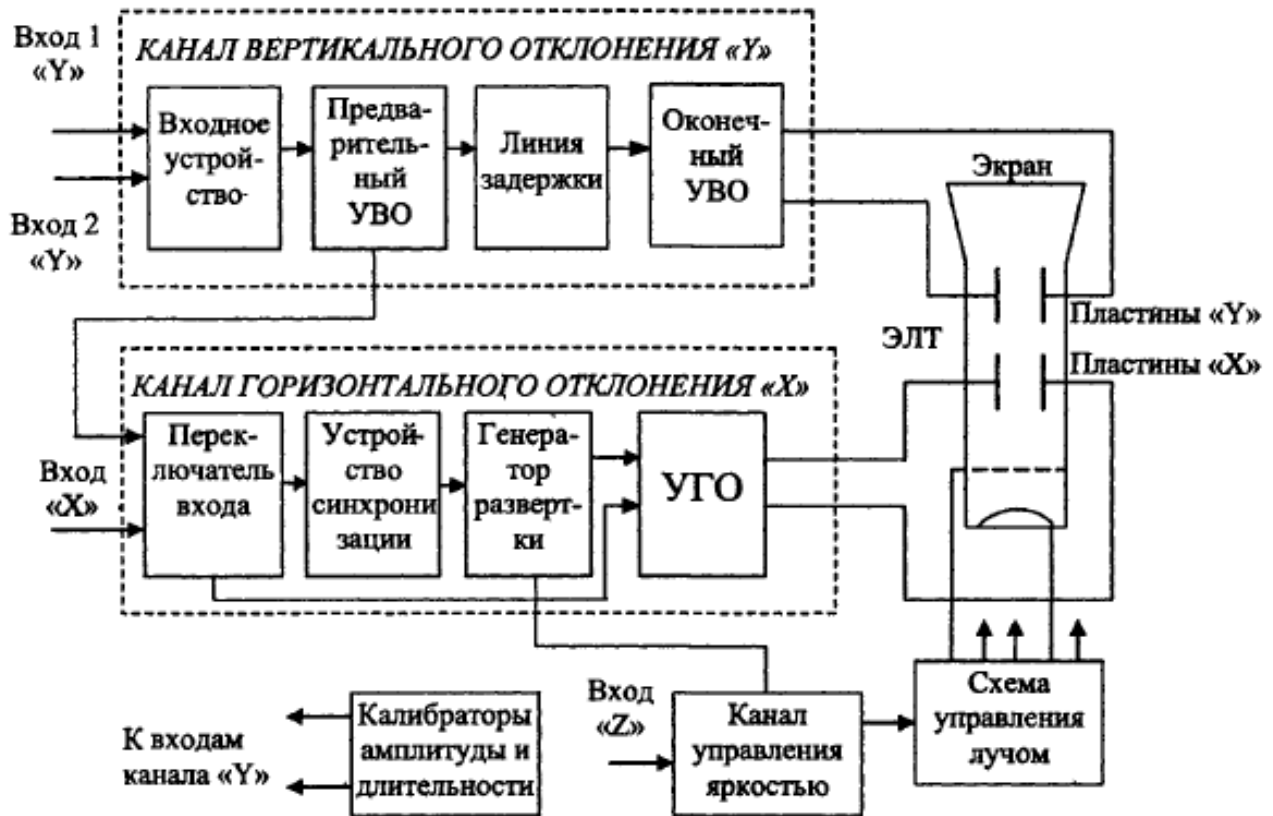


Рис. 7



На входном разьеме обычно указано входное сопротивление и вид входа: открытый или закрытый (пропускающий или не пропускающий постоянный ток). В диапазоне СВЧ, УВЧ входной импеданс обычно 50 или 75 Ом. Входной блок устанавливает режим калибровки, регулирует чувствительность канала вертикального отклонения: 1 мВ/см .... 10 В/см.

В канале горизонтального отклонения основные регулировки:

- Вид синхронизации: внутренняя, внешняя.
- Уровень синхронизации (плавный регулятор).
- Скорость (время) развертки: 1 мс, 10 мс; 100 мс; 1 с...

**Осциллограф с встроенной МПС (программируемый)**

Один из первых «интеллектуальных» осциллографов – сочетание аналогового универсального осциллографа и МПС (устройства цифровой обработки).

Верхняя часть (рис. 8) – обычный осциллограф. МПС обеспечивает программное управление и цифровую обработку. Основное звено связи – АЦП, обрабатывающий аналоговые сигналы. ЦАП управляет режимами работы, формирует сигнал развертки (ступенчато - изменяющееся напряжение). Для измеряемого интервала времени можно сосчитать число ступенек (шагов развертки).

С помощью клавиатуры выполняются различные функции:

- Измерение  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$ , размаха, длительности, периода, частоты.....;
- Изменяются режимы работы (запоминание, регулировка масштабов по X и Y);
- Ввод констант, выполнение математических операций;
- Управление метками и др.

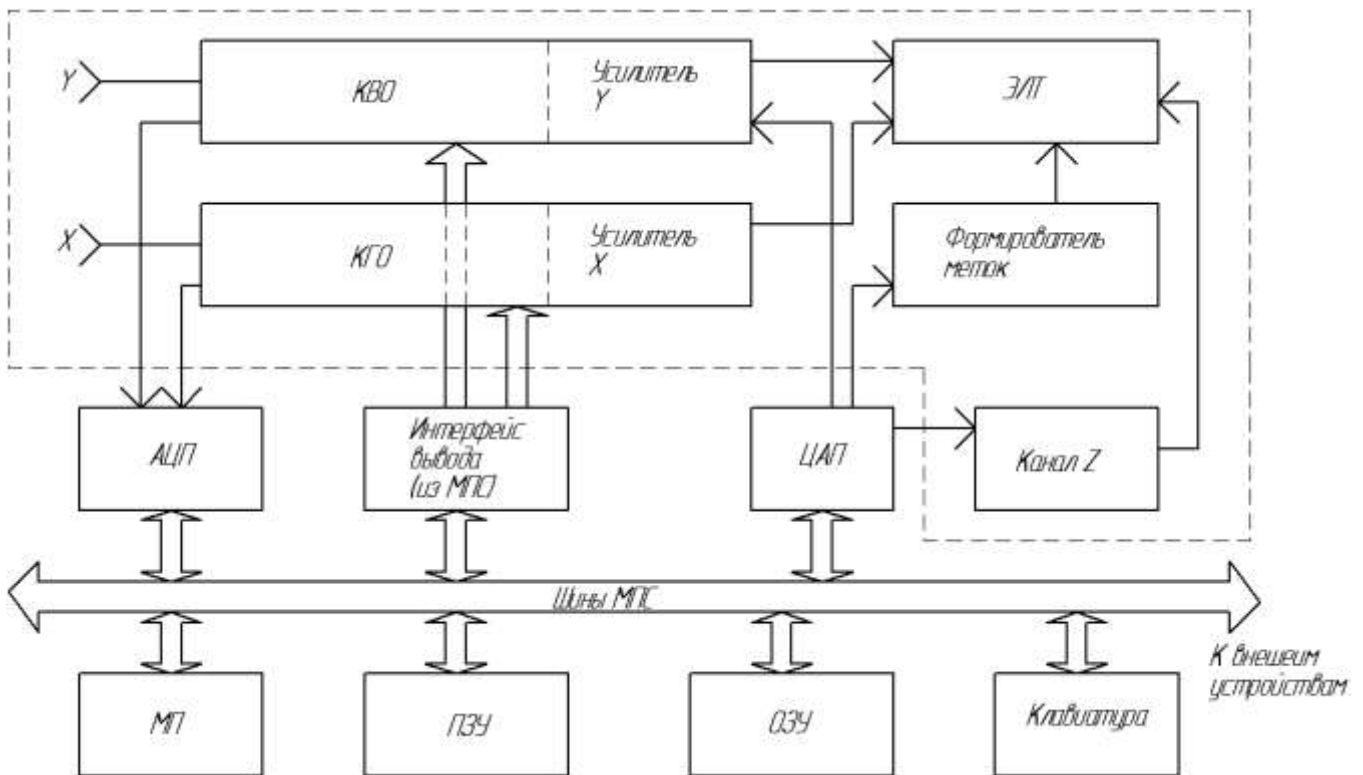


Рис. 8

**Программируемый цифровой осциллограф** - в отличие от рассмотренного выше, здесь иной подход и структура построения (рис 9).

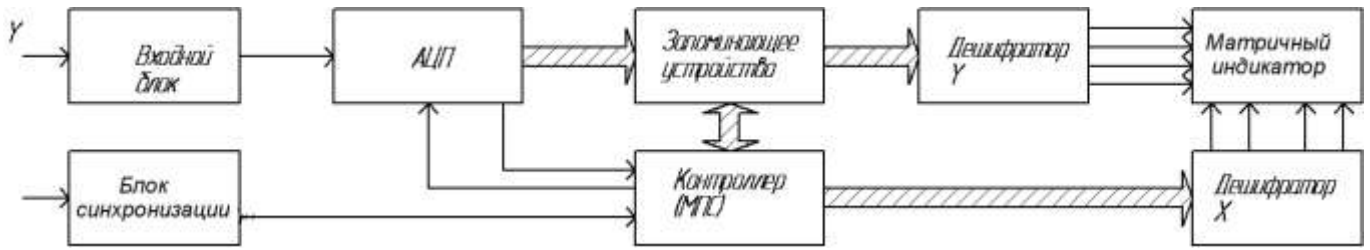


Рис. 9

Контроллер – устройство управления на основе МПС. На выходах дешифраторов стоят ключевые схемы. Поочередно осуществляется коммутация элементов по X. Синхронно коммутируются элементы Y в соответствии с сигналом.

**Стробоскопические осциллографы** позволяют исследовать только периодические сигналы. Главное отличие - стробоскопический преобразователь

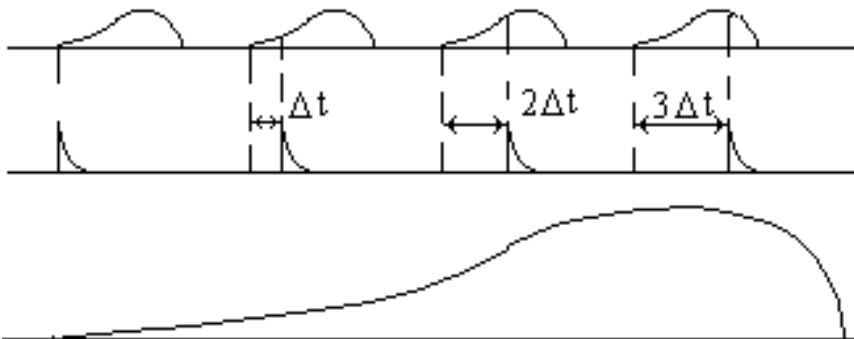


Рис. 10

на входе (трансформатор спектра). Коэффициент трансформации временного масштаба достигает  $10^7 \dots 10^8$ .

Короткие строб-импульсы осуществляют выборку мгновенных значений сигнала со сдвигом по

времени через  $n$  периодов или  $nT$  (на рис. 10 показана выборка каждый период).

Простейшая схема строб – преобразователя приведена на рис. 11.

Диод должен быть быстродействующий, работающий в ключевом режиме. При отсутствии строб-импульса диод заперт напряжением  $+U_{см}$  смещения.

Строб – импульс отпирает диод, что приводит к заряду конденсатора  $C$  до значения мгновенного напряжения сигнала, т.е. напряжение на  $C$  пропорционально входному сигналу в точке стробирования. Период повторения строб-импульсов должен быть почти равен целому числу периодов сигнала, но иметь заданный сдвиг, равный шагу считывания:  $T_{сн} = nT \pm \Delta t$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Трансформированный период огибающей равен  $nT/\Delta t$ , где интервал  $\Delta t$  – шаг считывания,  $T$  – период сигнала. Число выборок  $k = T/\Delta t$ .

Условие неискаженной передачи вытекает из теоремы Котельникова:

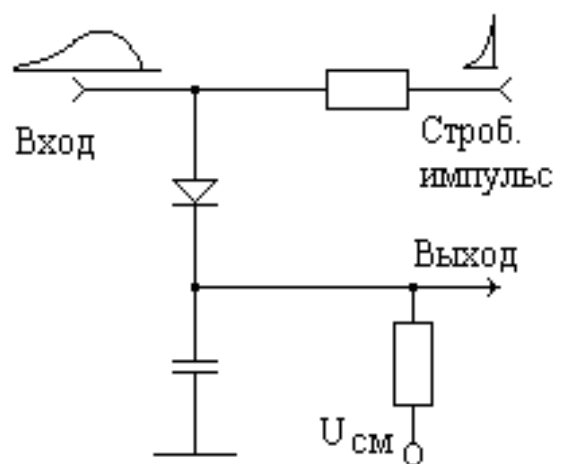


Рис. 11

$n_{\min} = 2T_c f_{гр}$ , где  $f_{гр}$  – верхняя граничная частота спектра исследуемого процесса.

Современные стробоскопические осциллографы имеют полосу пропускания до 18 ГГц и более.

### **Техника осциллографических измерений**

1. Основной метод – метод калиброванных шкал и разверток. Процесс измерения сводится к подсчету числа клеток по вертикали (амплитуда) и горизонтали (длительность).

2. Компенсационный метод – индикатор осциллографа является нуль – индикатором. При этом можно использовать самую чувствительную шкалу осциллографа, подавая на дифференциальный вход компенсирующий сигнал (обычно по амплитуде).

Погрешности осциллографических измерений разнообразны. Это в первую очередь субъективные по индикатору; инструментальные (калибровки, нелинейности КВО, КГО...); методические (дискретизации, аппроксимации...).

### **Выбор осциллографа**

#### ***Достоинства аналоговых осциллографов***

- мгновенное обновление экрана при отображении изменяющихся сигналов
- привычные и понятные средства управления для используемых настроек (чувствительности, времени развертки, уровня запуска и т.д.)
- широкая полоса пропускания
- низкая стоимость

#### ***Недостатки аналоговых осциллографов***

- низкая точность, определяемая размерами экрана
- мерцание экрана в зависимости от частоты сигнала и скорости развертки
- нет возможности отображения сигнала до момента запуска
- ограниченные возможности измерения параметров сигналов.

#### ***Достоинства цифровых осциллографов***

- возможность записи изображения
- высокая точность измерений
- яркий, хорошо сфокусированный экран на любой скорости развертки
- возможность отображения сигнала до запускающего момента
- автоматические средства измерения параметров сигналов
- возможность подключения к компьютеру, принтеру или плоттеру
- возможности математической и статистической обработки сигнала
- средства самодиагностики и самокалибровки.

#### ***Недостатки цифровых осциллографов***

- ограниченная возможностями АЦП полоса пропускания
- более сложное управление
- более высокая стоимость

Приборы, которые измеряют переменные сигналы, имеют некоторую максимальную частоту, выше которой точность измерения ухудшается. Эта частота определяет полосу пропускания прибора и обычно определяется, как частота, на которой амплитуда сигнала уменьшается на 3дБ.

Для цифрового осциллографа характерны две принципиально разные полосы пропускания: полоса для повторяющихся сигналов и полоса для однократных сигналов. Цифровые осциллографы, работая в режиме стробирования, имеют полосу пропускания для повторяющихся сигналов гораздо более высокую, чем может обеспечить их частота дискретизации. При этом полоса пропускания повторяющихся сигналов является характеристикой аналоговых усилителей осциллографа и не зависит от частоты дискретизации.

Полоса пропускания для непериодических (однократных) сигналов, которые оцифровываются за один такт, зависит от частоты дискретизации осциллографа. Соотношение между частотой дискретизации и полосой пропускания для однократных сигналов может изменяться. Если осциллограф имеет встроенные средства интерполяции, тогда это соотношение равно 4:1. В противном случае, используется соотношение 10:1, когда на периоде будет не менее 10 точек дискретизации.

Многие сигналы содержат частотные составляющие, которые во много раз превышают основную частотную составляющую исследуемого сигнала. Например, прямоугольный сигнал содержит частотные составляющие, которые, по крайней мере, в десять раз больше по частоте по сравнению с основной частотной компонентой. Осциллографы с большей полосой пропускания предоставят более детальную информацию об этих высокочастотных составляющих.

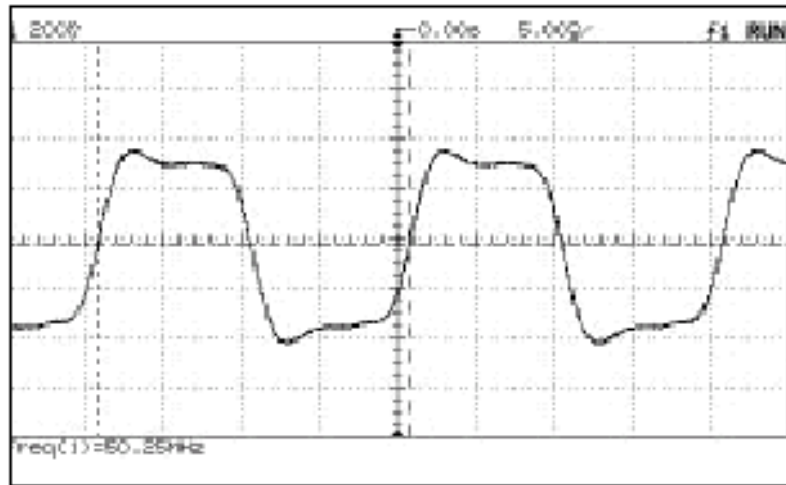
Копии экранов, изображенные на рис. 12 и 13, показывают один и тот же прямоугольный сигнал, отображенный на экранах осциллографов с различной полосой пропускания. Осциллограф с полосой 150 МГц воспроизводит сигнал со срезанными высокочастотными составляющими. Фронты сигналов кажутся более длинными, чем они есть на самом деле. Когда сигнал отображается осциллографом с полосой меньшей, чем основная частотная составляющая прямоугольной волны, результирующий сигнал становится еще более искаженным.

Как правило, полоса пропускания осциллографа должна быть **по крайней мере** в три раза больше по частоте по сравнению с основной частотной исследуемого сигнала. Чтобы провести точные измерения амплитуды, полоса пропускания осциллографа должна быть в десять раз больше, чем частота измеряемого сигнала.

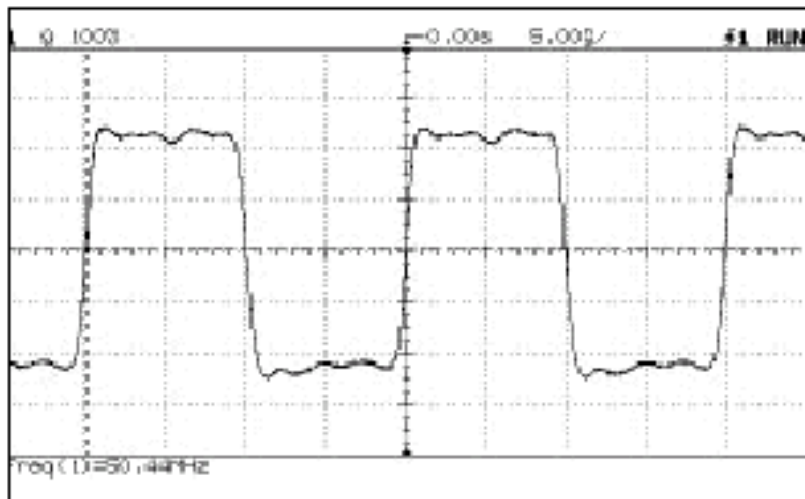
Для измерений временных параметров справедливо следующее правило: чем больше соотношение длительности фронта сигнала ( $T_C$ ) и фронта осциллографа ( $T_\Phi$ ), тем меньше ошибка измерения. Чем больше полоса пропускания осциллографа (тем короче фронт), тем более точными будут результаты измерений.

Соотношение $T_C$ к $T_\Phi$	Вычисленная ошибка
------------------------------	--------------------

1:1	41.4%
3:1	5.4%
5:1	2.0%
10:1	0.5%



*Рис. 12. Импульсный сигнал 50 МГц и полоса пропускания 50 МГц*



*Рис. 13. Импульсный сигнал 50 МГц, а полоса пропускания 150 МГц*  
**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое осциллограф и что им можно измерить?
2. Назовите элементы конструкции ЭЛТ.
3. Почему, чем ниже чувствительность, тем шире полоса пропускания и наоборот?
4. Почему отклоняющая система типа бегущей волны (ОСБВ) обеспечивает расширение полосы пропускания?
5. Как работают запоминающие трубки?
6. Поясните устройство и работу ЖКИ.
7. Назовите основные типы и особенности ЖКИ.
8. Какие узлы содержит типовая структурная схема универсального осциллографа?

9. Какова структура погрешности (с классификацией) в режиме измерения интервала времени?
10. Какова структура погрешности (с классификацией) в режиме измерения уровня?
11. Поясните работу стробоскопического осциллографа.
12. Назовите достоинства и недостатки цифровых осциллографов.
13. С какой минимальной абсолютной и относительной погрешностью можно измерить сдвиг фазы  $5 \cdot N^0$  на частоте  $10 \cdot N$  кГц 2-х канальным осциллографом? Обоснуйте выбор времени развертки и цену деления по X.
14. Строб – импульсы формируются с шагом считывания  $\Delta t = TN/360 = T/360/N$ . Что будет на экране ЭЛТ при подаче на вход синусоиды, если число выборок  $k=90$ ?

Примечание: N – номер студента по списку группы.

### ЛЕКЦИЯ: АНАЛИЗ СПЕКТРА И НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА

Очень часто математическое описание даже несложных по структуре детерминированных сигналов является весьма трудной задачей. Поэтому в теории электрических цепей и радиоэлектронике используется прием, при котором реальные сигналы заменяют (аппроксимируют, представляют, декомпозируют) набором идеализированных математических моделей, описываемых простыми функциями. Это дает инструмент для анализа прохождения сигналов через радиотехнические цепи. В начале XI в. французскому физико-математику Ж. Фурье удалось доказать, что любую периодическую функцию можно представить в виде конечной или бесконечной суммы ряда гармонических колебаний с разными амплитудами, частотами и начальными фазами. В радиоэлектронике этой функцией может быть ток или напряжение в цепи.

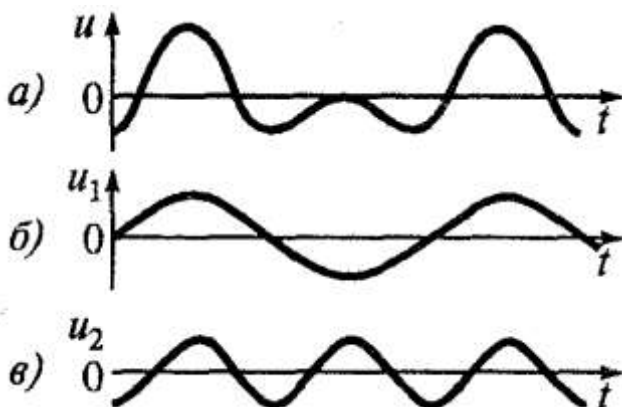
Пример показан на рис. 1. Периодическая, внешне сложная по форме кривая напряжения  $u(t)$  (рис. 1а) — это сумма двух синусоид равной амплитуды, но разных частот и начальных фаз: первой (б) и второй (в) гармоник.

Преобразования Фурье позволяют представить сложный процесс  $U_x(t)$  множеством простейших компонентов: гармонических колебаний со своими амплитудами и начальными фазами.

Для периодического сигнала ряд Фурье имеет вид:

$$U_x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \cos(2\pi f_k t + \varphi_k)$$

Для непериодических процессов совокупность амплитуд (плотностей амплитуд) и начальных фаз всех час-





тотных компонентов процесса  $U(t)$  называют спектральной функцией:

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

**Рис. 1**

Для процесса, наблюдаемого на конечном интервале времени оценивают текущий спектр на момент  $T$ .

$$S_T(\omega) = \int_{-\infty}^T U(t) \exp(-i\omega t) dt \quad \text{или} \quad \int_{-T}^T \dots \quad \text{или} \quad \int_{-T/2}^{T/2} \dots$$

На практике часто представляет интерес  $|S_T(\omega)|^2$  - энергетический спектр (размерность мощности).

Промышленность выпускает специализированные приборы - анализаторы спектра (АС):

1. Аналоговые, использующие методы:

- Фильтрации (последовательный и параллельный анализ);
- Дисперсионный (или рециркуляционный);

2. Цифровые, использующие методы:

- Сжатия временного масштаба;
- Цифровой фильтрации;
- Цифрового гетеродинного преобразования.
- Вычислительные на базе БПФ (быстрого преобразования Фурье) и др.

*Основные характеристики АС:*

- Чувствительность  $10^{-7} \dots 10^{-14}$  Вт (доли мкВ и нВ);
- Рабочий диапазон частот и полоса обзора (до десятков ГГц);
- Разрешающая способность по  $f$  (от долей Гц);
- Время анализа и др.

#### АС параллельного действия на основе фильтрации

При параллельном анализе спектров сигналов применяется набор узкополосных фильтров (резонансных), настроенных на различные частоты (рис. 2). Исследуемый сигнал подается одновременно на все фильтры. Напряжения на выходах фильтров определяются составляющими спектра анализируемого процесса. Далее спектральные составляющие, после детектирования в детекторе, поступают на регистрирующие устройства, например, осциллографический панорамный индикатор. Погрешность параллельного анализа определяют следующие факторы: конечность времени установления колебаний на выходе фильтра и зависимость ее от полосы пропускания последнего, отличие характеристик фильтров, настроенных на разные частоты.

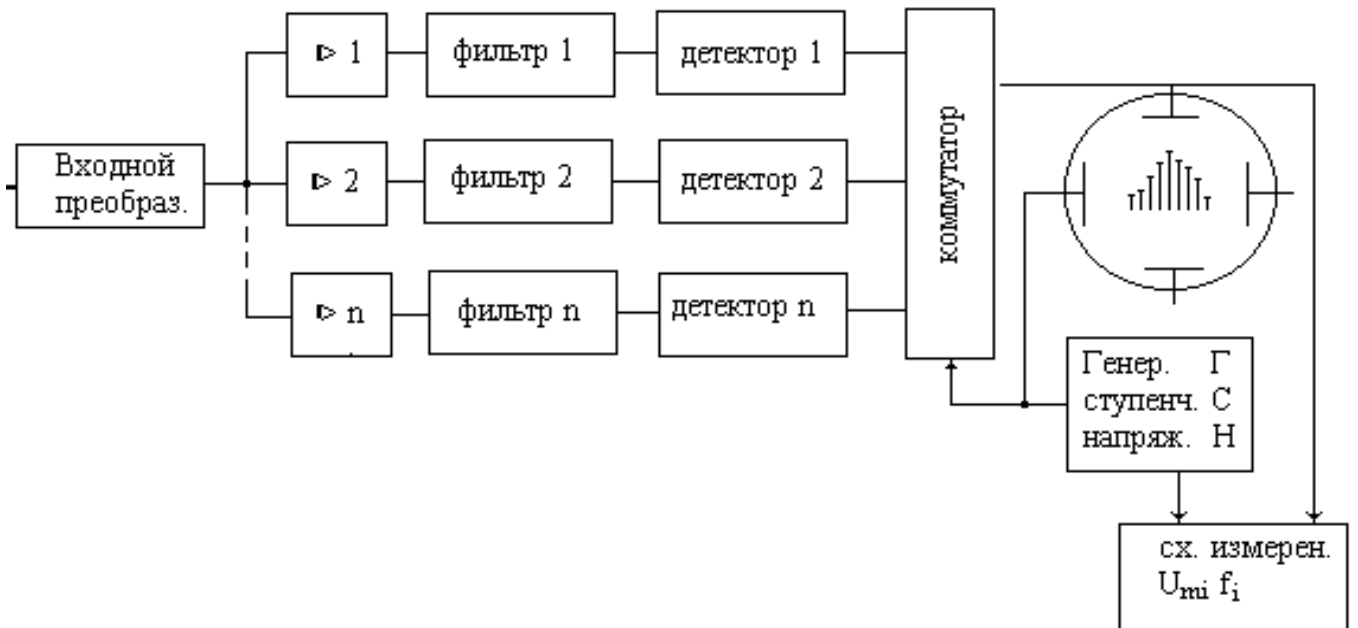


Рис. 2

Анализаторы такого типа применяют в основном для анализа спектров одиночных импульсных сигналов. Для выделения  $n$  спектральных составляющих в диапазоне частот необходимо не менее  $n$  фильтров. Полоса пропускания фильтров определяет статическую разрешающую способность анализатора. Разрешающая способность анализатора — это его способность различать гармонические составляющие спектра с близкими частотами. Чем уже полоса пропускания фильтра, тем выше разрешающая способность. При широкой полосе пропускания несколько гармонических составляющих не будут разделяться. Если время анализа сигнала мало, то имеет место динамическая разрешающая способность.

Анализ осуществляется с помощью фильтров с не перекрывающимися (рис. 3 — верх) или перекрывающимися (рис. 3 — низ) частотными характеристиками. В первом случае возможна потеря информации о составляющих, лежащих вне полос пропускания фильтров (составляющие спектра 2 и 4). Во втором случае возможна регистрация одной составляющей ( $m$ ) двумя соседними фильтрами ( $i$  и  $i+1$ ) с ошибочным выводом о наличии обеих компонент. Сигналы с выхода фильтров детектируются, последовательно коммутируются, анализируются и подаются на индикатор.

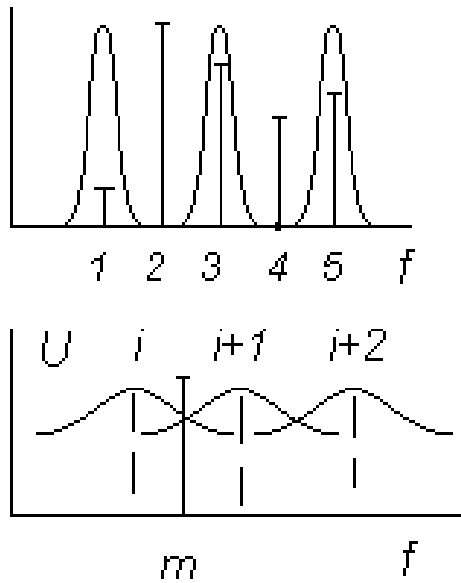


Рис. 3

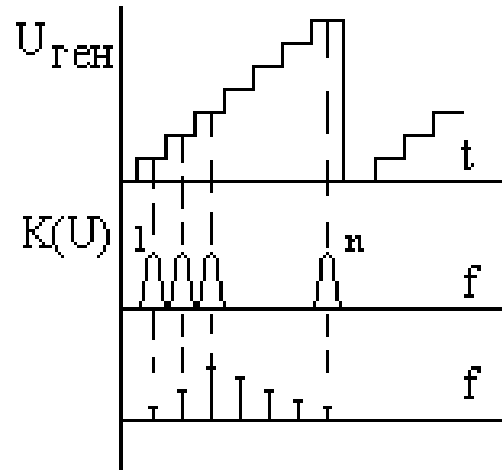


Рис. 4

Скорость анализа резко снижается при сужении полосы пропускания фильтра. К достоинствам анализаторов параллельного действия относятся малое время анализа и возможность регистрировать спектры одиночных импульсов. Однако из-за сложности системы фильтров анализаторы не получили широкого распространения. Их применение целесообразно тогда, когда положение спектральных линий известно заранее, но неизвестны их амплитуды. Это задачи испытаний оборудования на регламентированных частотах (1000 Гц в звуковом диапазоне, фиксированные значения ПЧ приемников сигналов и др.).

Таким образом, метод сложен, требует много фильтров. Имеет узкое применение для анализа известных спектров.

#### АС гетеродинные с последовательной фильтрацией

Для исследования спектров периодических сигналов чаще всего применяют последовательный анализ. Это наиболее распространенный класс АС общего применения. В основе работы лежит перенос спектра на ПЧ и фильтрация (выделение) отдельных линий с помощью УПЧ, полоса которого очень узкая.

На рис. 5 показана упрощенная структурная схема анализатора последовательного типа с двукратным преобразованием частоты, а на рис. 6 и 7- диаграммы, поясняющие принцип его действия. Двойное преобразование применяют для улучшения характеристик АС.

Анализатор спектра электрических сигналов последовательного типа представляет собой супергетеродинный приемник, который состоит из входного устройства (входной фильтр), смесителя, широкополосного перестраиваемого гетеродина 1 (генератора качающейся частоты – ГКЧ), широкополосного усилителя ПЧ (УПЧ 1), второго смесителя, второго гетеродина, узкополосного усилителя промежуточной частоты (УПЧ 2), квадратичного детектора, выходного усилителя вертикального отклонения и индикаторное устройство (обычно осциллографическая трубка). Управление входным устройством, ге-

теродином 1 и разверткой осуществляет генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН).

Супергетеродинный приемник служит для последовательного во времени выделения анализируемых гармонических составляющих спектра входного сигнала. Настройку этого приемника на разные частоты производят с помощью сигнала, поступающего с выхода генератора качающейся частоты, который, в свою очередь, запускается от генератора развертки.

Индикаторное устройство анализатора предназначено для наблюдения спектра исследуемого процесса и по существу действует как электронный осциллограф. Оно содержит ЭЛТ с устройствами управления лучом, усилители вертикального и горизонтального отклонения, генератор напряжения развертки.

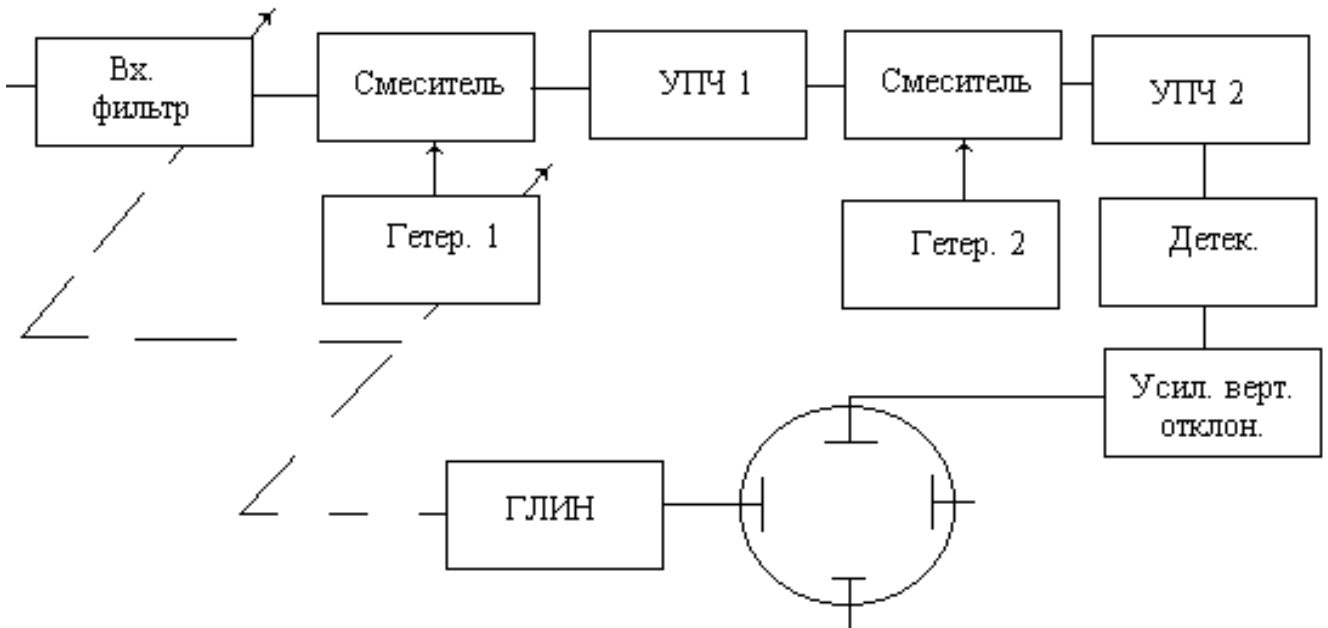


Рис. 5

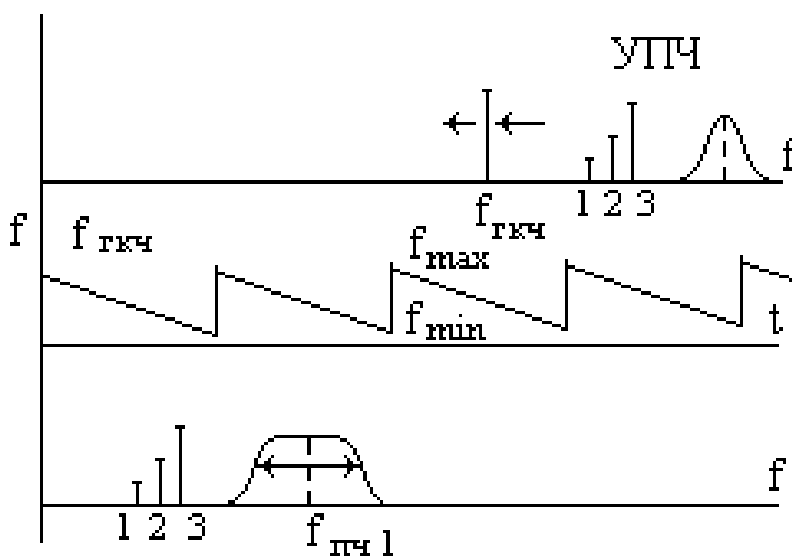


Рис. 6

Рассмотрим процессы, протекающие в анализаторе спектр. Входной сигнал  $u(t)$  подается на смеситель через входное устройство. На второй вход смесителя подается сигнал от генератора качающейся частоты.

На рис. 7 приведены диаграммы напряжений в анализаторе спектра последовательного типа при одночастотном гетеродинировании с помощью ГКЧ:

$a$  — изменение частоты ГКЧ;  $b$  — иссле-

дуемый спектр и АЧХ УПЧ;  $\epsilon$ —линейное изменение частоты во времени;  $\zeta$ —сигнал на выходе УПЧ;  $\delta$  — сигнал на выходе детектора.

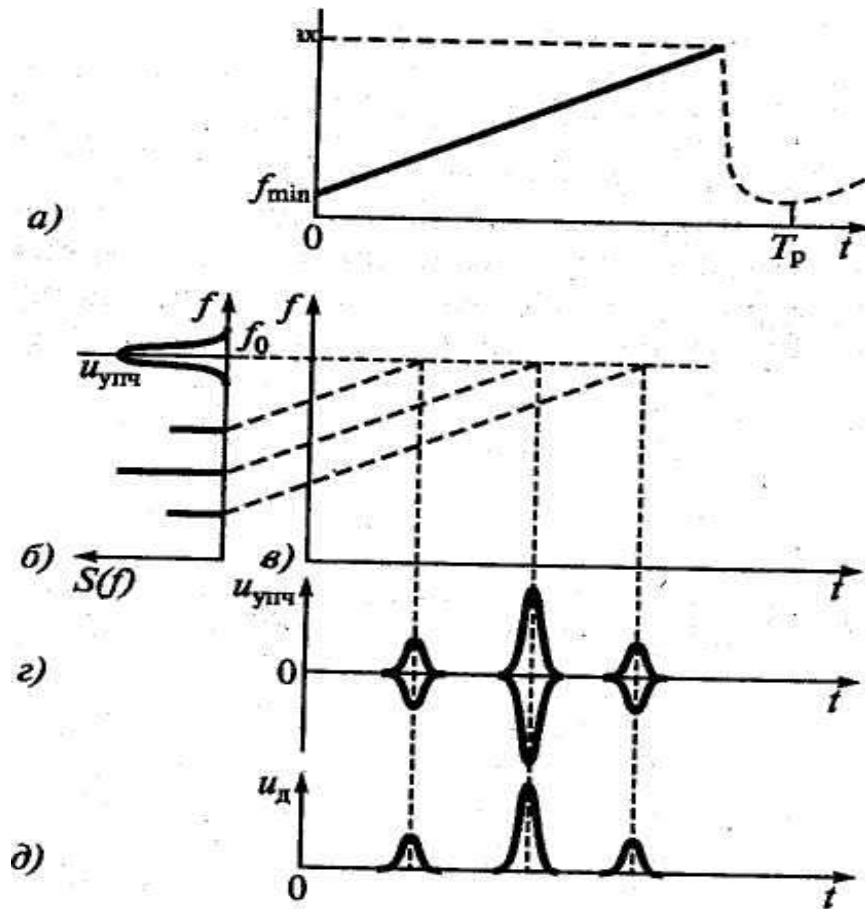


Рис. 7

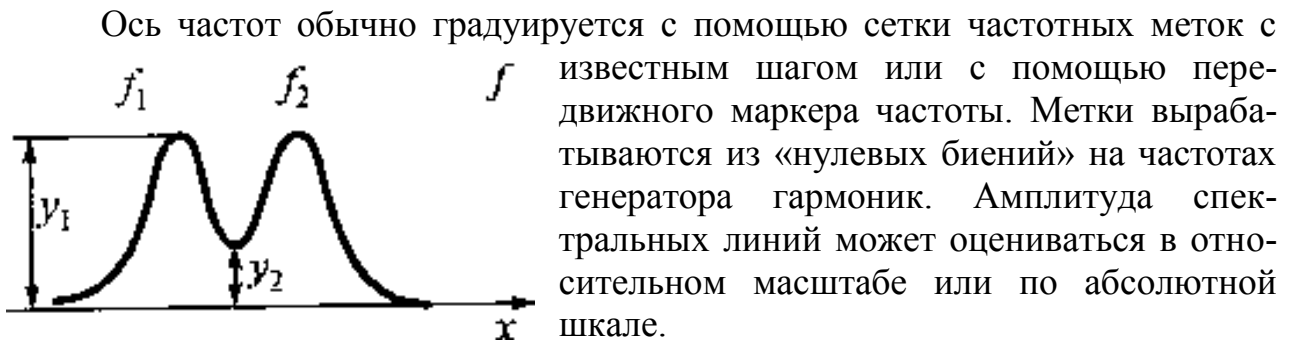
На рис. 7 а, б показаны соответственно изменение во времени частоты ГКЧ от минимума до максимума в такт с изменением напряжения генератора развертки, форма амплитудно-частотной характеристики УПЧ и диаграмма спектра исследуемого сигнала (он представлен тремя гармоническими составляющими одно-тонального амплитудно-модулированного колебания).

В результате воздействия на смеситель исследуемого сигнала и напряжения ГКЧ составляющие спектра преобразуются в диапазон промежуточных частот УПЧ. Форма спектра сигнала при этом сохраняется. С линейным изменением частоты ГКЧ составляющие преобразованного спектра также линейно изменяются во времени и последовательно попадают в полосу пропускания УПЧ (рис. 7 в). Напряжение на выходе УПЧ имеет вид радиоимпульсов (рис. 7 г), амплитуды которых при постоянном напряжении ГКЧ пропорциональны амплитудам составляющих спектра.

С выхода УПЧ радиоимпульсы подаются на амплитудный детектор. На выходе детектора возникают видеоимпульсы (рис. 7 д), поступающие через усилитель на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. На горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ подается пилообразное напряжение генератора развертки (ГЛИН), в результате чего на экране появляются видеоимпульсы,

изображающие спектр исследуемого сигнала. Этот сигнал отображается на экране.

Диаграммы построены при условии, что разность частот соседних составляющих спектра много больше полосы пропускания УПЧ, при этом возможна сравнительно малая статическая разрешающая способность (т.е. большой интервал частот). На практике допускается некоторое перекрытие изображений гармоник сигналов (рис. 8). Параметры спектра измеряют вспомогательными устройствами. Положение на оси частот отдельных спектральных составляющих и характерных участков спектра определяют частотными метками.



**Рис. 8**

*Динамическая разрешающая способность* анализатора спектра зависит от скорости изменения (перестройки) частоты ГКЧ. При увеличении скорости перестройки напряжение на выходе УПЧ не успевает изменяться с изменением напряжения на входе, так как энергия, запасенная в избирательной системе (например, в контуре), не может измениться мгновенно. Это явление имеет место в том случае, если длительность переходного процесса в УПЧ соизмерима со временем изменения частоты колебаний на входе и в пределах его полосы пропускания. Динамические искажения изображения спектра ограничивают допустимую скорость изменения частоты ГКЧ.

Необходимо, чтобы ширина спектра была меньше, чем  $f_{нч}$ , а  $\Delta f_{нч}$  меньше расстояния между линиями спектра. Для повышения разрешающей способности используют АС последовательной фильтрации с двойным преобразованием частоты.

#### АС на дисперсионных линиях задержки (ДЛЗ)

В дисперсионных линиях задержки время задержки зависит от частоты. При линейной зависимости задержки от частоты спектральные составляющие **импульсного сигнала** будут задержаны на разное время. При линейной аномальной дисперсии высшие гармоники придут на выход ДЛЗ быстрее, а низшие – позже. В результате огибающая выходного напряжения ДЛЗ соответствует форме спектральной функции импульса (радиоимпульса).

$$U(t) \sim S(\omega)$$

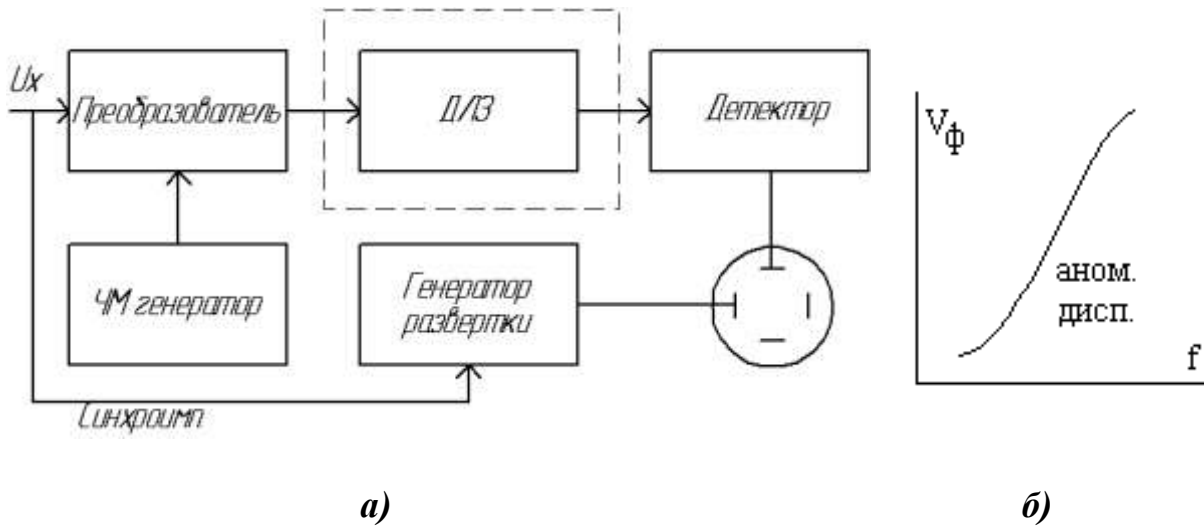


Рис. 9

На рис. 9 представлена схема АС и дисперсионная характеристика. Здесь ЧМ-генератор, запускаемый синхронно с импульсом  $U_x(t)$ , линейно изменяет свою частоту (ЛЧМ), что расширяет возможности преобразования. АС на ДЛЗ по быстродействию близки к АС параллельной фильтрации, но из-за недостаточной полосы пропускания ДЛЗ распространены ограниченно. Главное их достоинство в возможности анализа спектров одиночных радиоимпульсов и радиоимпульсов с большой скважностью. Приборы на ДЛЗ серийно не выпускаются.

#### Цифровые АС со сжатием временного масштаба

Для последовательного анализа спектра шириной  $\Delta F_C$  аналоговым АС с полосой пропускания избирательного фильтра (УПЧ)  $\Delta f_\phi$  требуется время  $T_{\text{посл}} \sim \Delta F_C / (\Delta f_\phi)^2$ . Тогда при  $\Delta f_\phi \ll \Delta F_C$  время  $T_{\text{посл}}$  становится очень большим. Кроме того, для низкочастотных спектров изготовление фильтра с узкой  $\Delta f_\phi$  сложно технически. Оба недостатка устраняются, если расширить полосу  $\Delta F$  в  $n$ -раз:  $\Delta F' = n \Delta F$ . При этом можно аналогично увеличив  $\Delta f' = n \Delta f$  можно уменьшить  $T_{\text{посл}}$  в  $n$  раз.

Подобная трансформация масштаба времени может быть реализована с помощью запоминающих устройств (ЗУ), а также путем транспонирования (умножения) спектра. В некоторых АС (СК4-72, СК4-72/2) используют цифровой блок памяти, запись в который идет в темпе поступления сигнала, а считывание – с предельной скоростью по быстродействию. При этом могут исследоваться как периодические, так и непериодические процессы. Может осуществляться анализ случайных процессов. Коэффициент сжатия (транспонирования) достигает десятков тысяч.

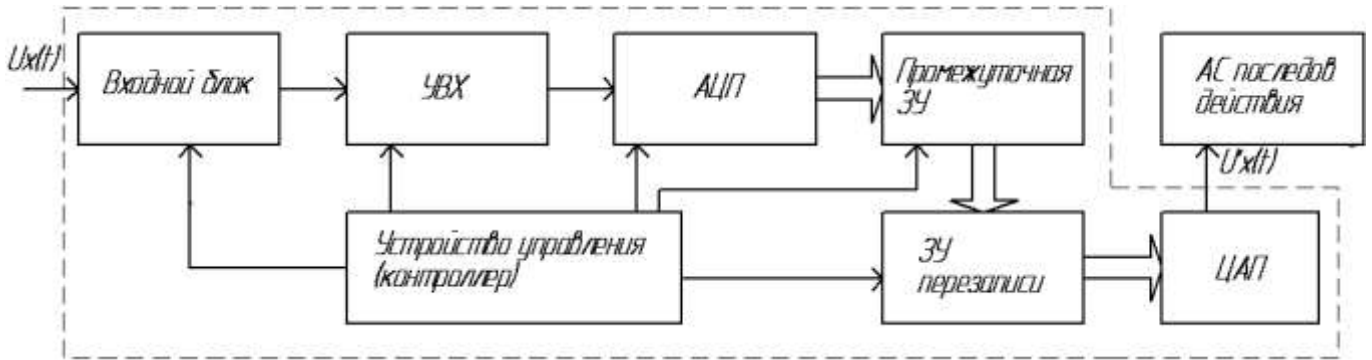


Рис. 10

УВХ – устройство выборки и хранения – осуществляет дискретизацию напряжения исследуемого сигнала с частотой  $F_o \approx 3F_в$ , где  $F_в$  – верхняя частота установленного поддиапазона. Промежуточное ЗУ по мере окончания медленного запоминания выборки передает информацию в ЗУ перезаписи. Пока промежуточное ЗУ обновляется идет процесс быстрого считывания (со скоростью  $\approx 10$  МГц) и преобразование в  $U'_x(t)$ . Далее осуществляется анализ спектра сжатой копии обычным способом. Наличие МПС позволяет использовать в качестве гетеродина синтезатор частот (цифровое гетеродинирование), что упрощает отсчет частоты (частота гетеродина в каждой момент известна).

#### Вычислительные АС на базе БПФ (цифровые АС)

Развитие вычислительной техники позволило создать новый класс АС за счет замены интеграла в выражении спектральной функции на сумму из  $N$  выборок. Преобразование называют дискретным преобразованием Фурье (ДПФ):

$$S(\omega) \approx \Delta t \sum_{S=0}^{N-1} a_S U_S \exp(-j\omega S),$$

где  $a_S$  – значение весовой функции,  $U_S$  – значение функции.

Специальный алгоритм БПФ позволяет существенно ускорить анализ. Структурная схема приведена на рис. 11. Она содержит АЦП и вычислитель. Примером является прибор СК4-71.

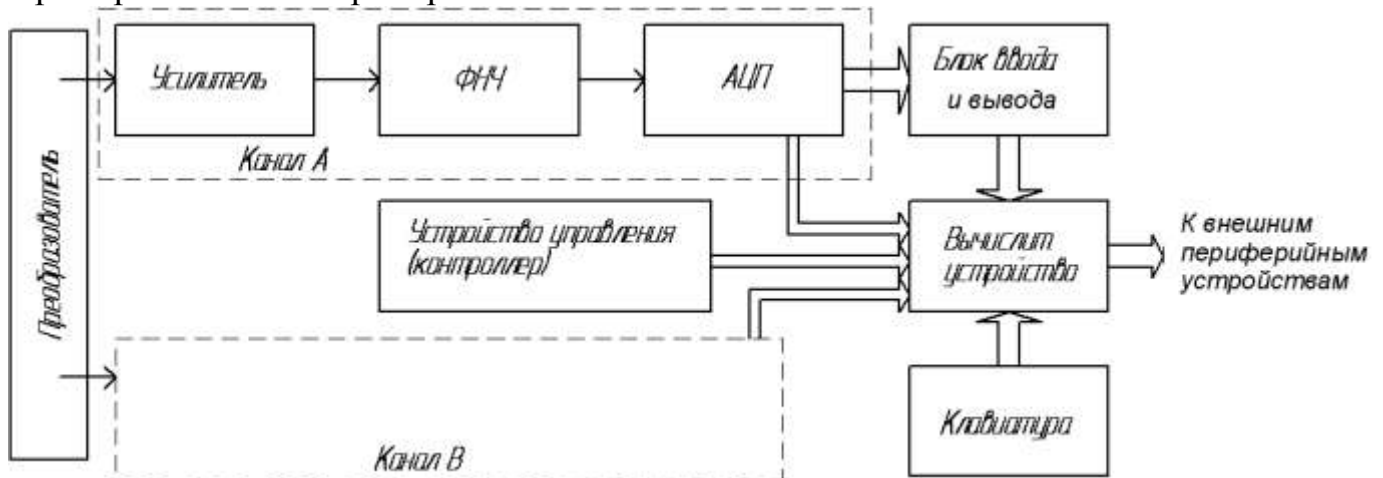


Рис. 11

В настоящее время созданы панорамные АС перекрывающие диапазон частот от 10 Г до 39,6 ГГц. Возможности приборов очень высокие:



- измерение частот, амплитуд, отношения амплитуд спектральных составляющих;
- панорамная индикация спектра с запоминанием;
- измерение нелинейности четырехполюсника и нелинейных искажений сигнала;
- измерение и наблюдение АЧХ в динамическом диапазоне (до 120...140 дБ).

Области применения АС очень широкие. Можно оценивать и измерять: стабильность частоты, чистоту спектральной линии; устойчивость к внешним факторам; параметры модуляции, ширину спектра частот; уровень паразитных составляющих; динамический диапазон; частотные характеристики; потери и нелинейность преобразования, развязку; подавление спектральных составляющих; искажения сигналов и др.

#### Измерители нелинейных искажений (ИНИ) – подгруппа Сб

Нелинейные искажения сигнала определяют по коэффициенту нелинейных искажений (КНИ) (коэффициенту гармоник, коэффициенту несинусоидальности). КНИ показывает вес высших гармонических составляющих в спектре сигнала по отношению к первой гармонике (в СКЗ) в относительном масштабе или в процентах:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100\%$$

Иногда используют коэффициент нелинейных искажений  $n$ -го порядка  $K_n = U_n/U_1$ .

Методы измерения КНИ:

1. Спектральные – на базе селективных приборов (АС, селективных вольтметров, измерительных приёмников)
2. Квазиспектральные – на базе подавления первой гармоники (режекции).

Спектральный метод достаточно сложно реализуется аппаратно, поэтому на практике более широкое распространение получил квазиспектральный метод, который отличается от спектрального тем, что в выражение для  $K_{\Gamma}$  другой знаменатель:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_{\Sigma}} 100\%$$

где  $U_{\Sigma} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$ . Заметные отличия по этим методам проявляются лишь при  $K_{\Gamma} > 10\%$ . Поскольку КНИ измеряется для высококачественной аппаратуры звуковых частот, у которой допускаемые значения не превосходят 10-х и 100-х долей %, то использование квазиспектрального метода оправдано.

Типовая схема режекторного ИНИ приведена на рис. 12. Входной сигнал  $U(t)$ , имеющий высшие гармоники, через входной блок (делитель) соединен с усилителем сигнала. В режиме калибровки сигнал, минуя фильтр, проходит на

вольтметр среднеквадратического значения. Показания индикатора устанавливаются на 100 (точка 100%), при этом весь сигнал проходит на вольтметр СКЗ.

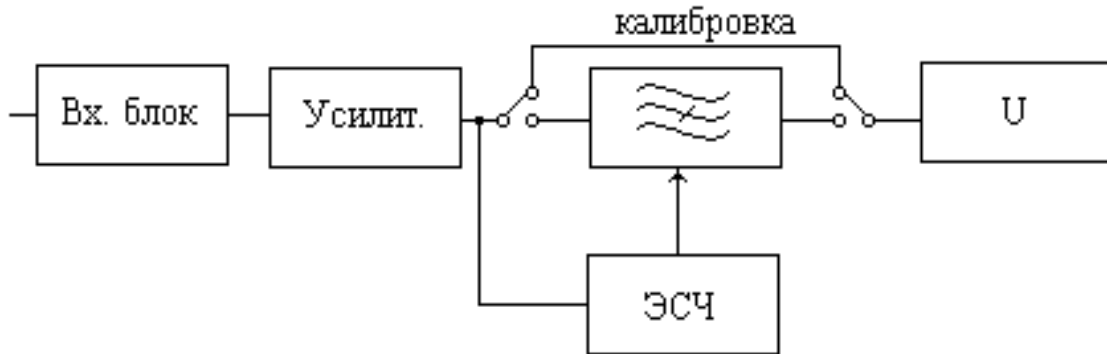


Рис. 12

В режиме измерения КНИ включается режекторный фильтр, вырезающий первую гармонику. Для этого частота первой гармоники измеряется с помощью встроенного ЭСЧ, и в соответствии с результатами измерения осуществляется настройка фильтра. На выходе фильтра вольтметр измеряет СКЗ суммы всех гармоник без первой, определяя их вес по отношению к полному сигналу, который при калибровке был принят за 100%.

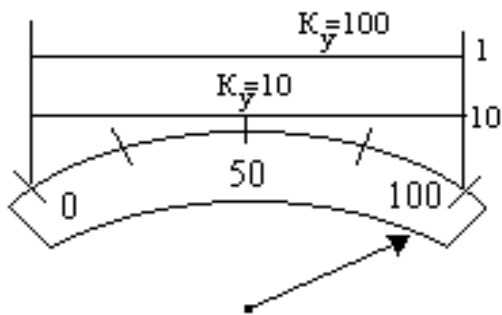


Рис. 13

Если в 10 раз увеличить коэффициент передачи входного блока и усилителя, то также в 10 раз повысится чувствительность прибора (см. рис.13) со шкалой измерения 10 %. Если увеличить коэффициент передачи входного блока и усилителя в 100 и 1000 раз, то соответственно получим шкалы 1 % и 0,1 %.

Шкала прибора градуируется в % или дБ. Образцовые ИНИ имеют погрешность 0,01...0,05%.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего используется спектральное представление сигналов?
2. Какие методы спектрального анализа используются в АС?
3. Поясните работу АС параллельной фильтрации.
4. Какова структура погрешности (с классификацией) параллельного АС по оси частот и по оси амплитуд?
5. Каковы требования к фильтрам параллельного АС?
6. Поясните работу АС с последовательной фильтрацией.
7. Поясните работу АС на дисперсионных линиях задержки (ДЛЗ).
8. Какова структура погрешности (с классификацией) последовательного АС по оси частот и по оси амплитуд?
9. Когда в цифровых АС применяется сжатие временного масштаба?
10. Поясните работу вычислительных АС.

11. Назовите области применения АС.
12. Что такое нелинейные искажения, как и чем их оценивают?
13. Поясните работу ИНИ.
14. Какова структура погрешности (с классификацией) ИНИ?
15. На какой шкале, и с какой погрешностью можно измерить  $K_{\Gamma}=(0,05+0,01N)\%$ , если класс точности прибора 0,01?

Примечание: N – номер студента по списку группы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 8.000-2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения. – М: Издательство стандартов, 2000. – 5 с. – ISBN
2. Басаков М.И. Основы стандартизации, метрологии и сертификации: 100 экзаменационных ответов. – Москва – Ростов на Дону: Март, 2003. – 256 с. – ISBN-5-241-00293-6
3. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения. - М.: Высшая школа, 1986. - 351 с.
4. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения. - М: Радио и связь, 1993. - 320 с. – ISBN-5-256-01020-4
5. Зограф И.А., Новицкий П.Ф. Оценка погрешностей результатов измерений. - Л: Энергоатомиздат, 1991. - 304 с. – ISBN-5-283-04513-7
6. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. – М: Пост-маркет, 2000. – 352 с. – ISBN-5-901095-02-2
7. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 535 с. – ISBN-5-03-001510-8
8. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, Е.В. Федорова и др.: Пол ред. В.И. Нефедова. - М.: Высш. шк., 2001 - 383 с. – ISBN-5-06-004069-0