



Основы метрологии и радиоизмерения

Рисунки и графики

Измерение напряжений. Аналоговые вольтметры

Измерение напряжений. Аналоговые вольтметры

ЗНАЧЕНИЕ напряжения – параметр, характеризующий масштаб сигнала (уровень сигнала). Используют среднее, среднеквадратическое (действующее), пиковое (амплитудное) и средневыпрямленное значения напряжения.

Среднее значение сигнала (постоянная составляющая) определяется на интервале усреднения T как среднее значение зависимости $u(t)$:

$$U_{\text{ср}} = \bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

Амплитудное (пиковое) значение сигнала – наибольшее мгновенное значение напряжения за время измерения $T_{\text{изм}}$:

$$U_m = \max u(t) \Big|_{t \in [0, T_{\text{изм}}]}$$

Средневыпрямленное значение сигнала – это среднее значение модуля временной зависимости напряжения:

$$U_{\text{ср. в}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

Среднеквадратическое значение сигнала (*root mean square – RMS*) определяется как корень из среднего значения квадрата временной зависимости

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

Мощность сигнала определяют через произведение значений напряжения и тока в цепи (мгновенная мощность).

$$p(t) = u(t)i(t) = \frac{u^2(t)}{R_H}$$

Средняя мощность, измеренная за заданный интервал времени T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{U^2}{R_H}$$

Относительная мощность

.Используют опорный уровень

$P_0 = 1$ мВт, реже 1 Вт, соответственно,

логарифмическая единица

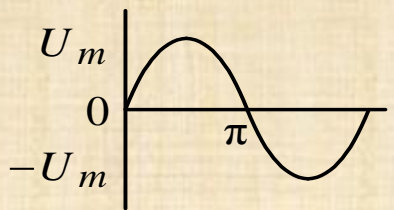
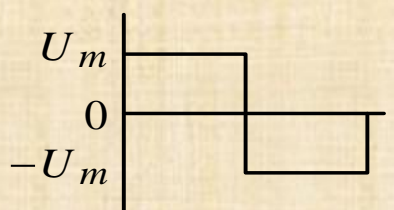
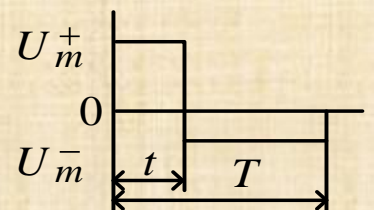
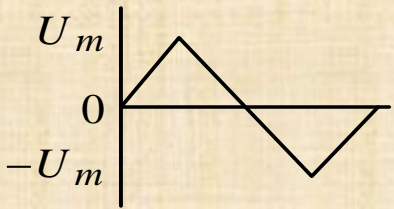
обозначается дБмВт (или дБм)

$$P_{\text{дБ}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{Вт}}}{P_0} \right)$$

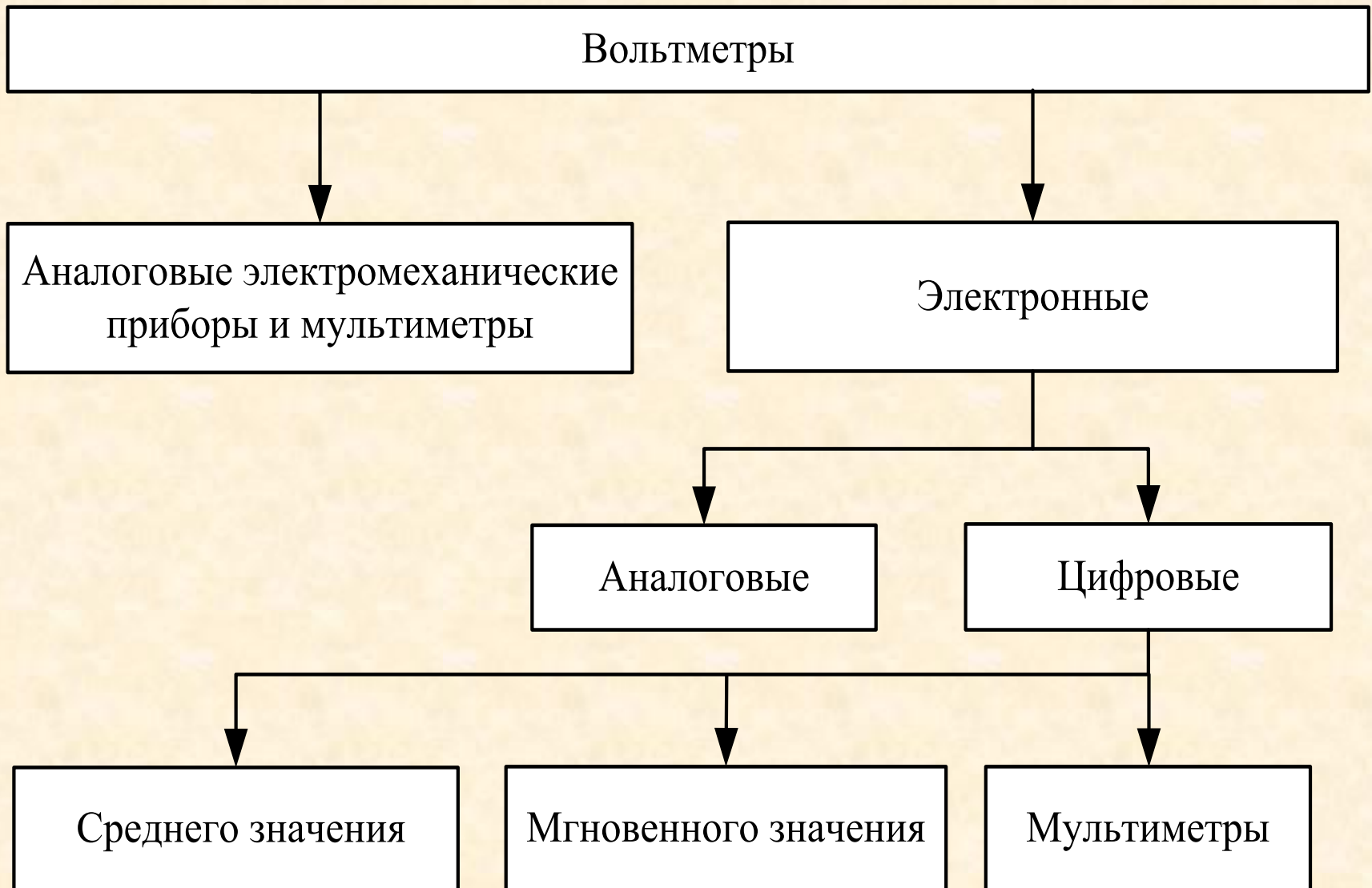
Связь между значениями напряжения устанавливается через коэффициент амплитуды K_a (пик-фактор) и коэффициент формы K_f

$$K_a = \frac{U_m}{U}$$

$$K_f = \frac{U}{U_{\text{ср. в}}}$$

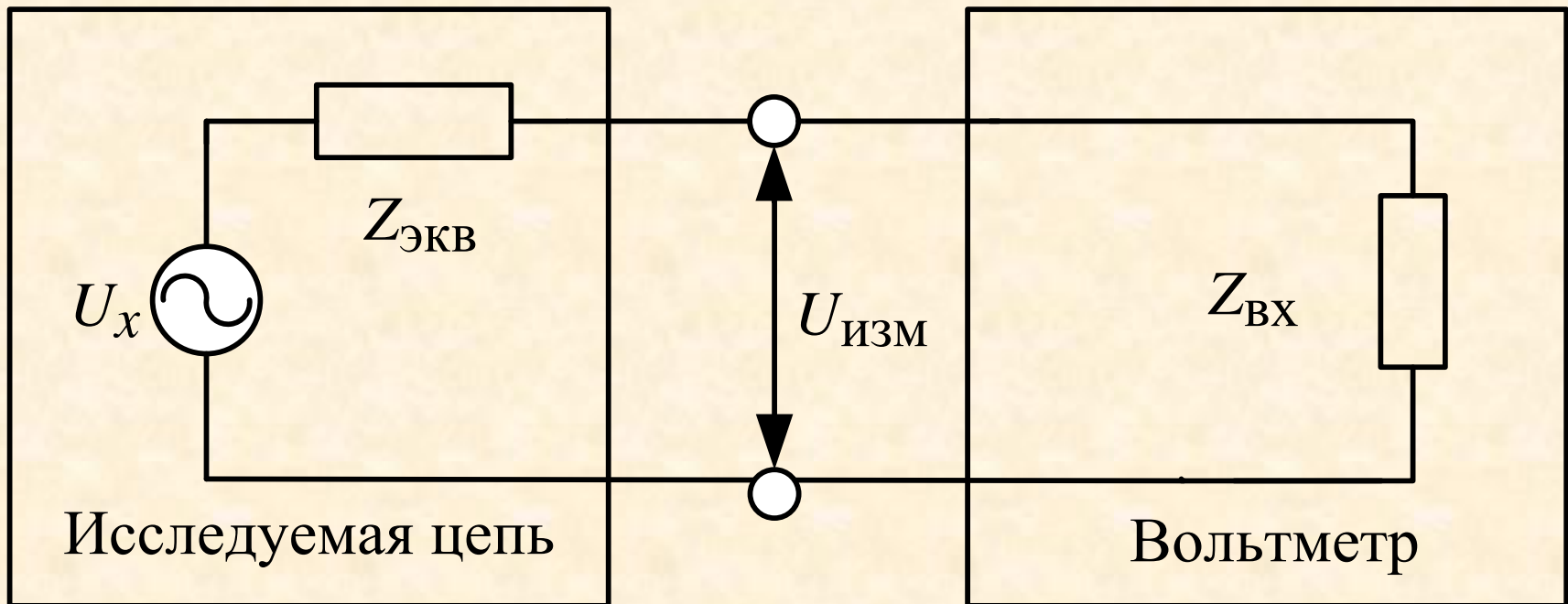
Форма сигнала	Параметры сигнала			
	$U_{\text{ср. в}}$	U	K_{ϕ}	K_a
	$\frac{2}{\pi} U_m$	$0.707 U_m$	1.11	1.414
	U_m	U_m	1	1
 <p> $U_{p-p} = U_m^+ + U_m^-$ $q = T / t$ </p>	$2 \frac{q-1}{q^2} U_{p-p}$	$\sqrt{\frac{1}{q} \left(1 - \frac{1}{q} \right)} U_{p-p}$	1	$\sqrt{q-1}$
	$0.5 U_m$	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_m$	1.155	1.733

Классификация вольтметров по принципу действия



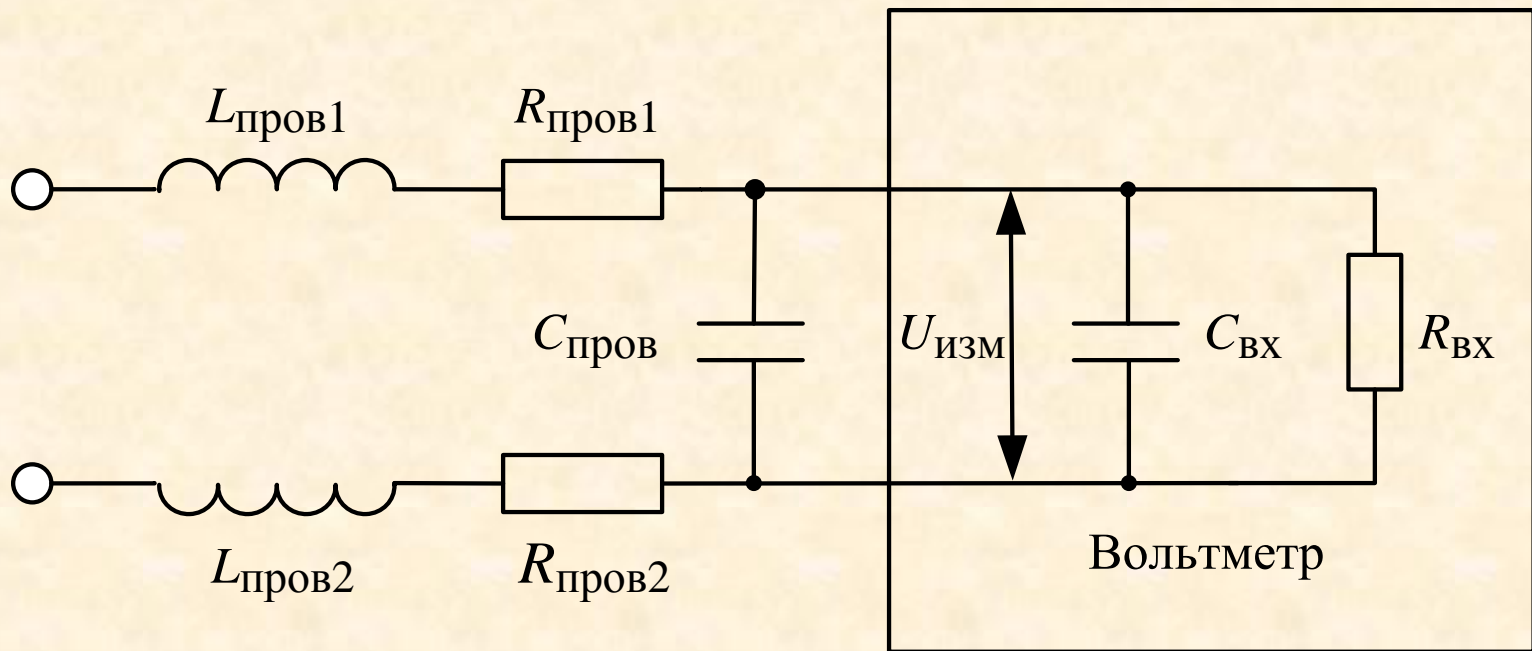
Влияние входного импеданса вольтметра на результаты измерения напряжения

Подключение вольтметра к исследуемой цепи

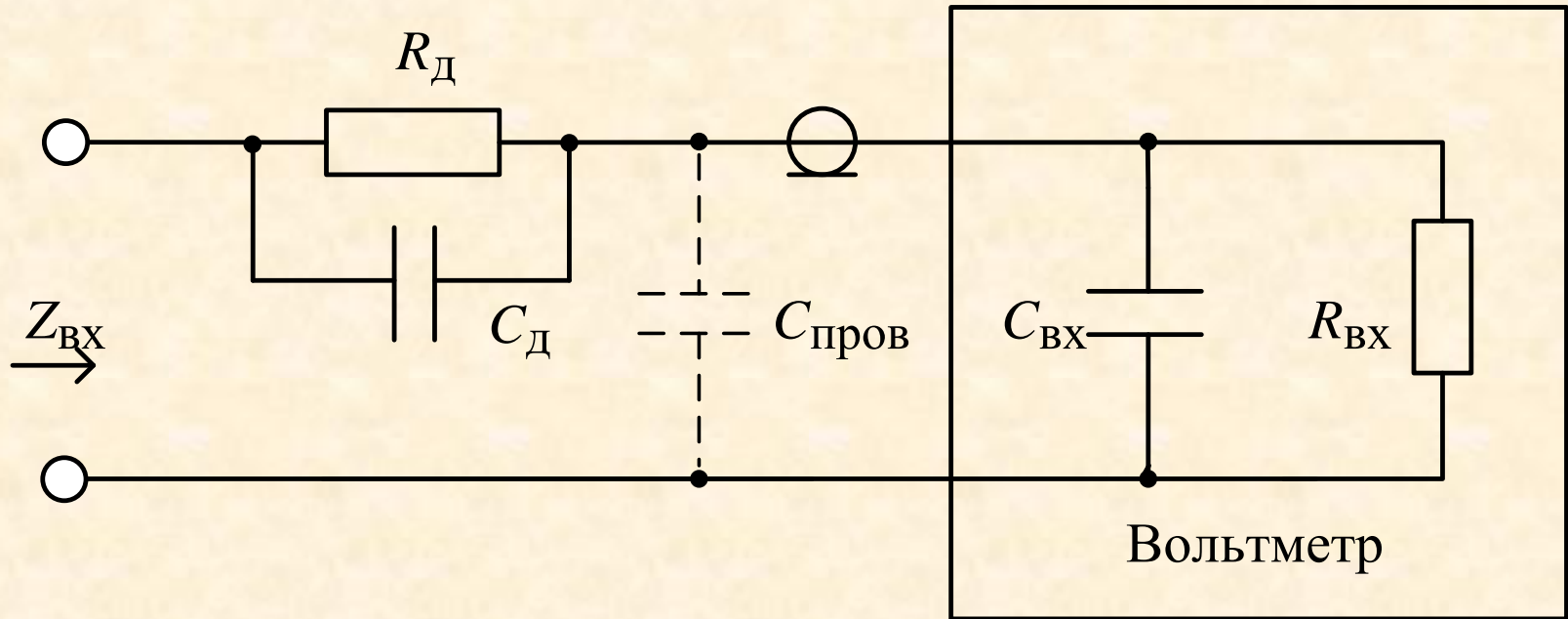


$$U_{\text{ИЗМ}} = \left(\frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_{\text{ВХ}} + Z_{\text{ЭКВ}}} \right) U_x = \left(\frac{1}{1 + Z_{\text{ВХ}} / Z_{\text{ЭКВ}}} \right) U_x.$$

Эквивалентная схема входной части ВЧ-вольтметра

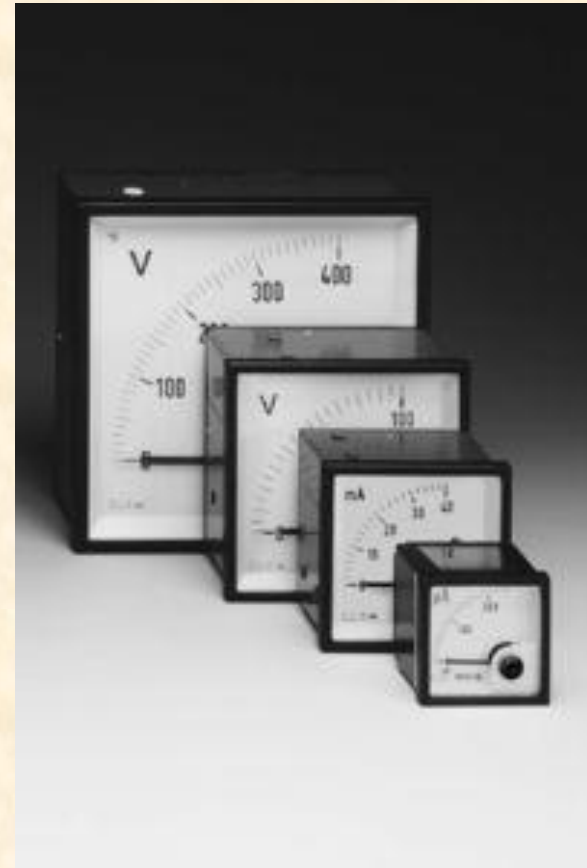


Выносной делитель напряжения (пробник, probe)

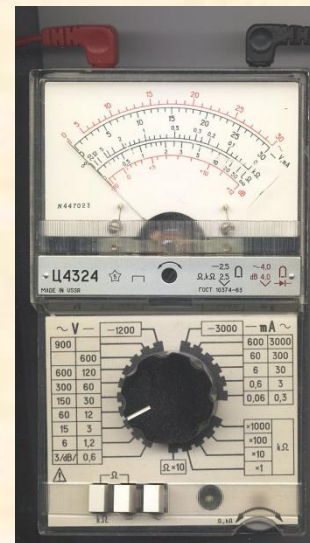


Снизить влияние паразитных параметров проводов – перенос входной части вольтметра в выносную головку (пробник, *probe*), которая подключается к точке измерения. В импульсных вольтметрах в выносной головке размещают схему амплитудного детектора, в вольтметрах переменного тока – входной усилитель

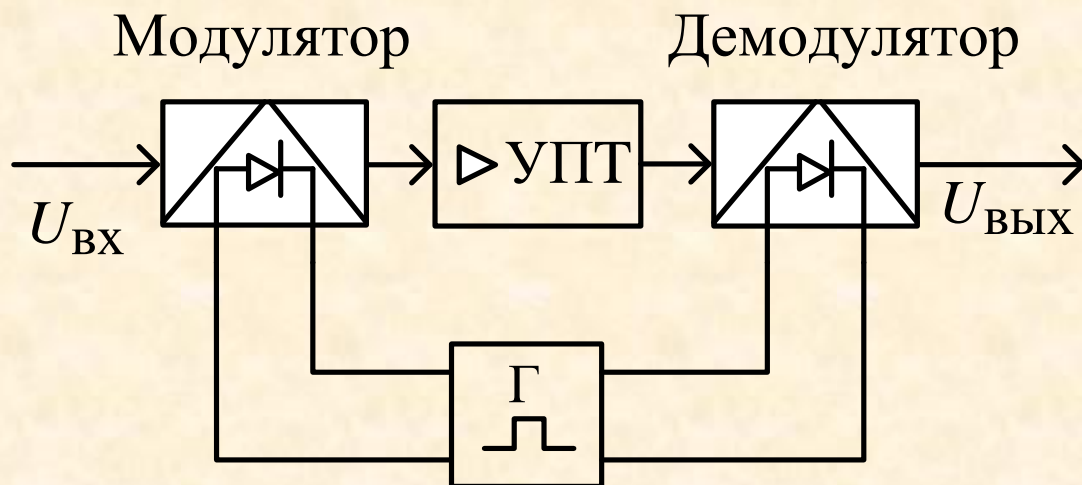
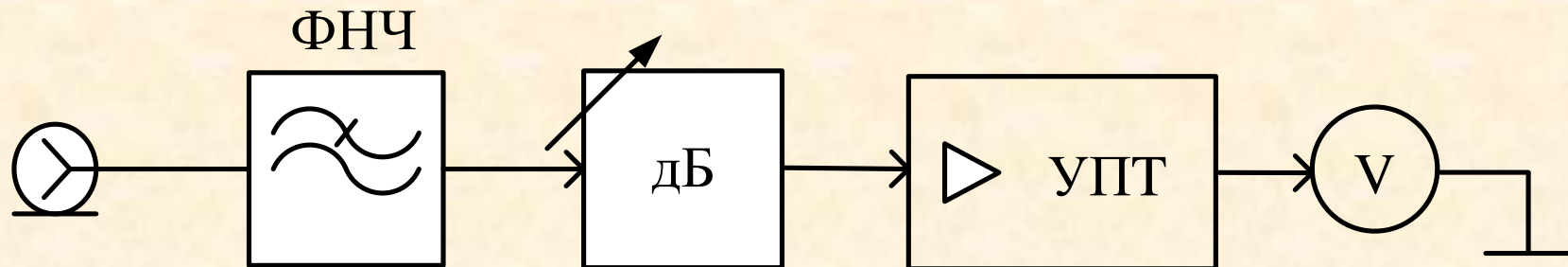
Электромеханические стрелочные вольтметры



Электромеханические мультиметры (тестеры)

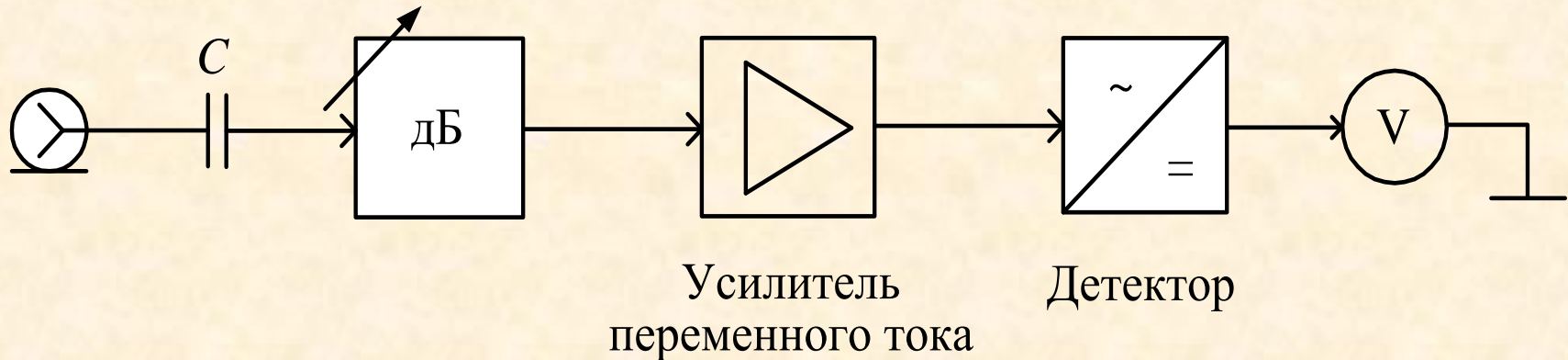


Электронные аналоговые вольтметры постоянного тока



УПТ типа
«модулятор –
демодулятор»
(МДМ) с малым
дрейфом нуля

Измерение переменного напряжения



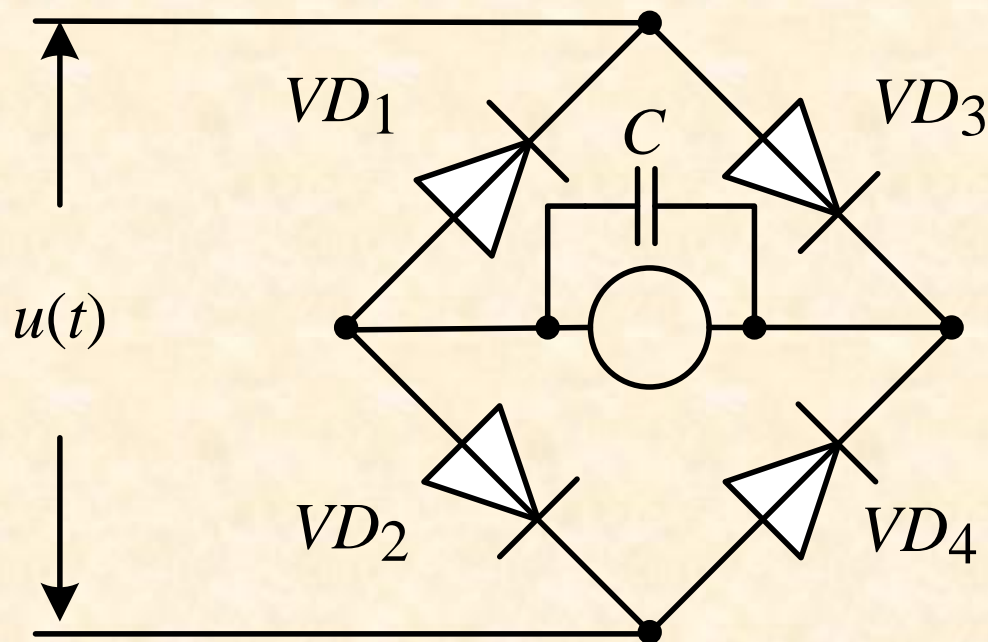
Вольтметр переменного тока типа **«усилитель-детектор»** - высокая чувствительность, большое входное сопротивление, ограниченный частотный диапазон

Вольтметр переменного тока типа **«детектор-усилитель»** - широкий частотный диапазон, малая чувствительность

Вольтметр средневыпрямленного значения

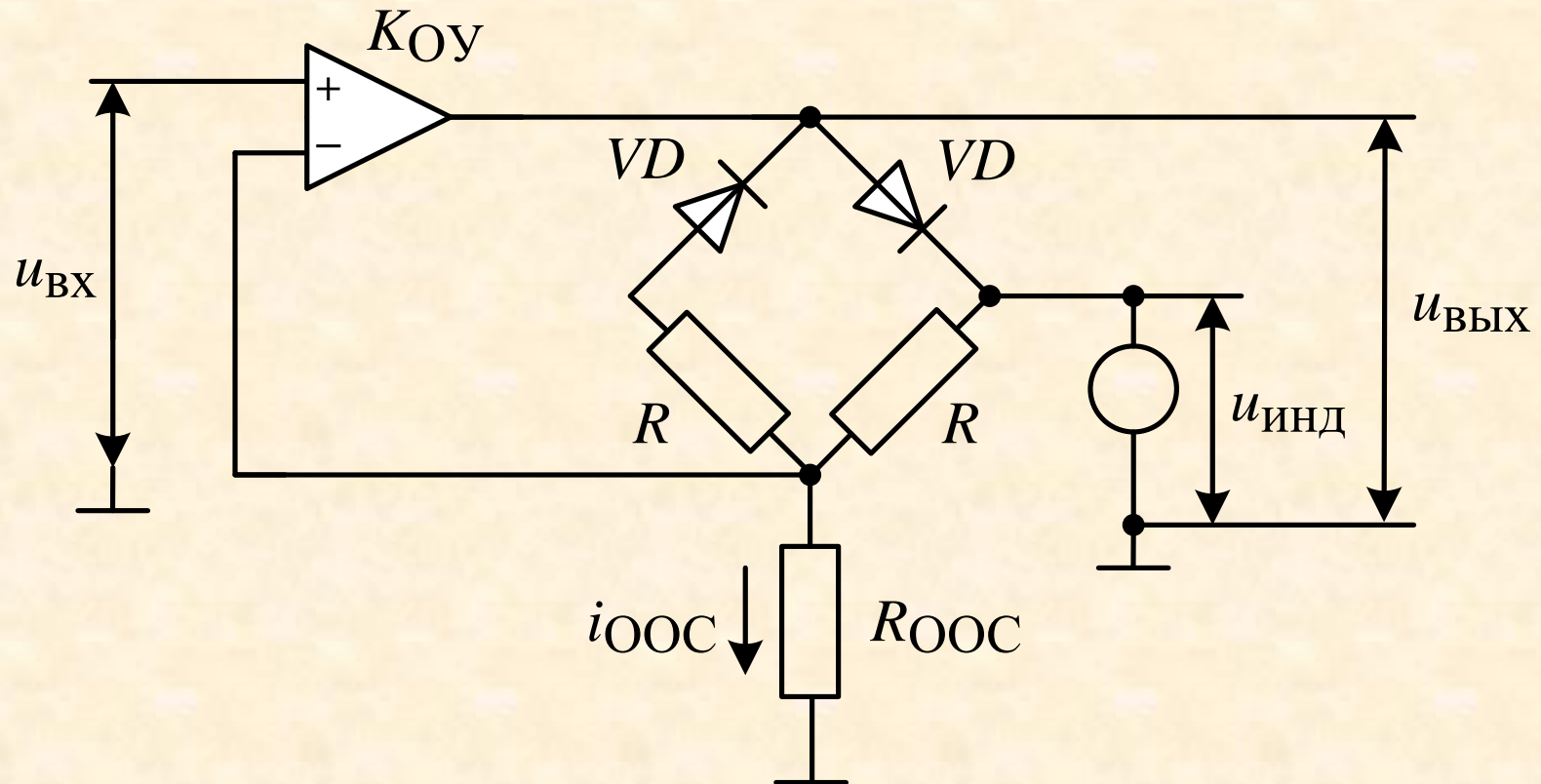
$$u(t) \rightarrow |u(t)| \rightarrow \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

Преобразования в детекторе
средневыпрямленного значения



Детектор
средневыпрямленных
значений

Схема детектора средневывпрямленных значений с ООС



Вольтметр среднеквадратического значения

$$u(t) \rightarrow u(t)^2 \rightarrow \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt \rightarrow \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}$$

Преобразования в
детекторе средне-
квадратического значения

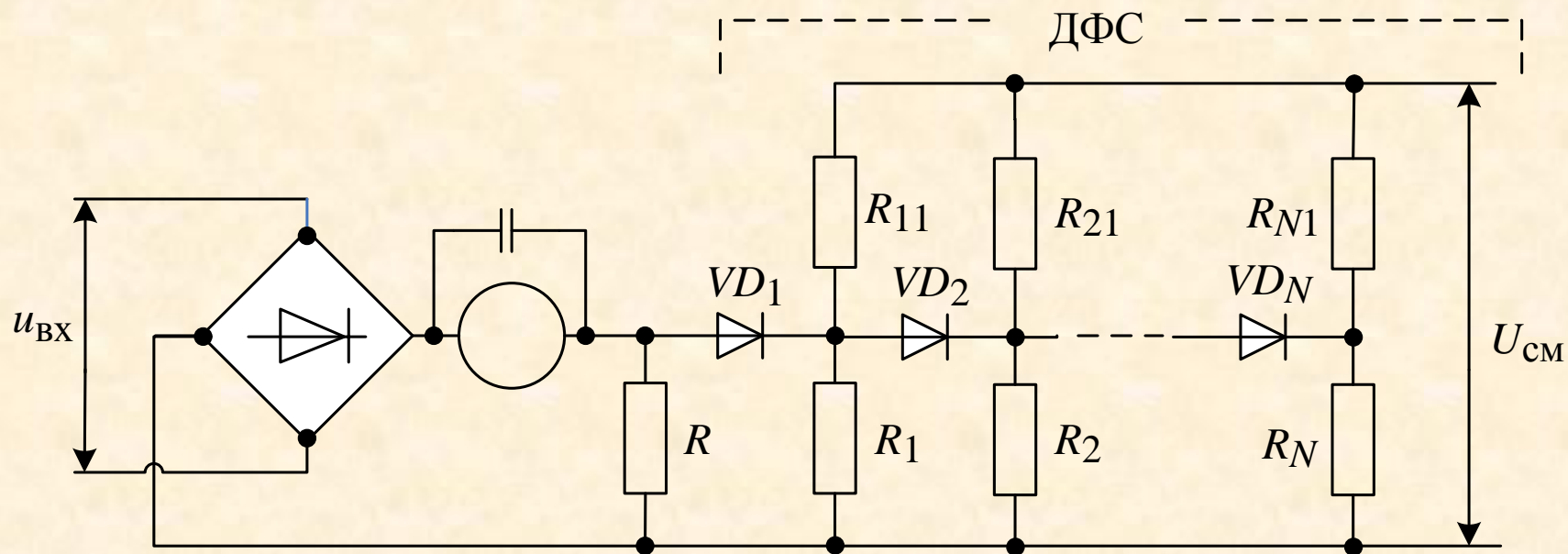
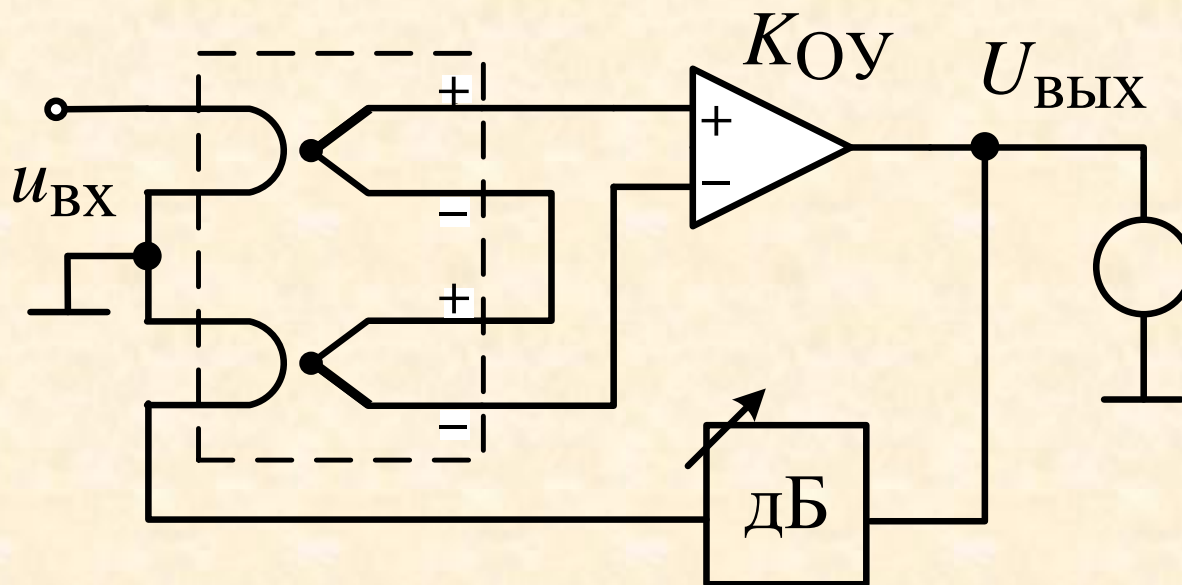


Схема детектора среднеквадратичных значений с ДФС

Детектор с термоэлектрическим преобразователем.

$$u(t) \rightarrow P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt \rightarrow \frac{U^2}{R_h} \rightarrow t_2^0 - t_1^0 / R_t \rightarrow E_t = K_t (t_2^0 - t_1^0) = \frac{K_t}{R_h R_t} U^2,$$



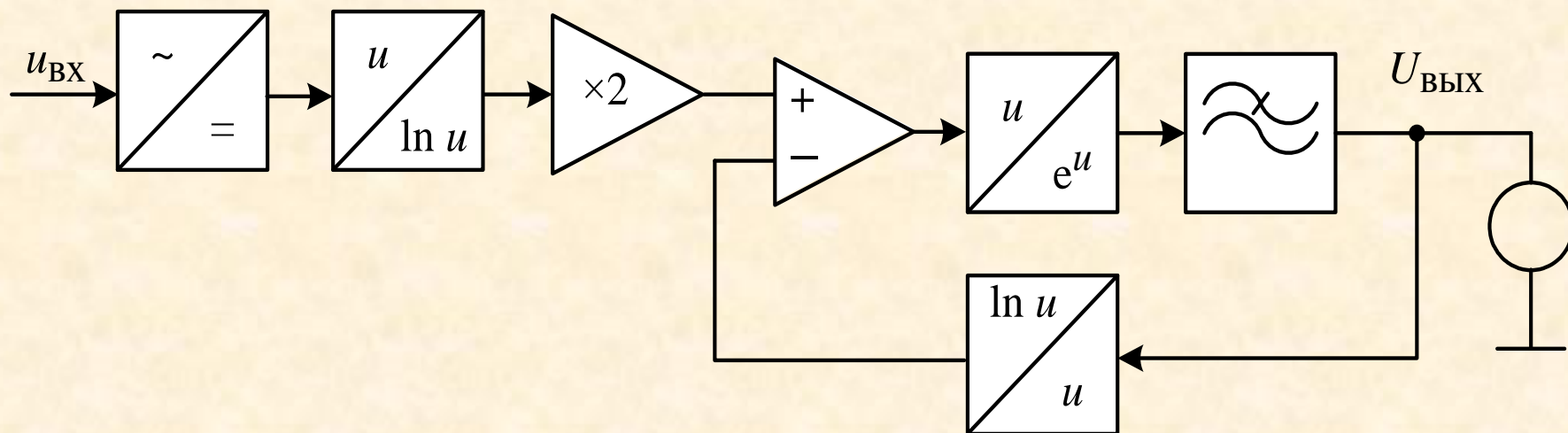
$$U_{BXX} = \frac{K}{R_h R_t} U_{BX}^2 - U_{BXX}^2 K_{AT}^2$$

$$U_{BXX} \cong \frac{U_{BX}}{K_{AT}}$$

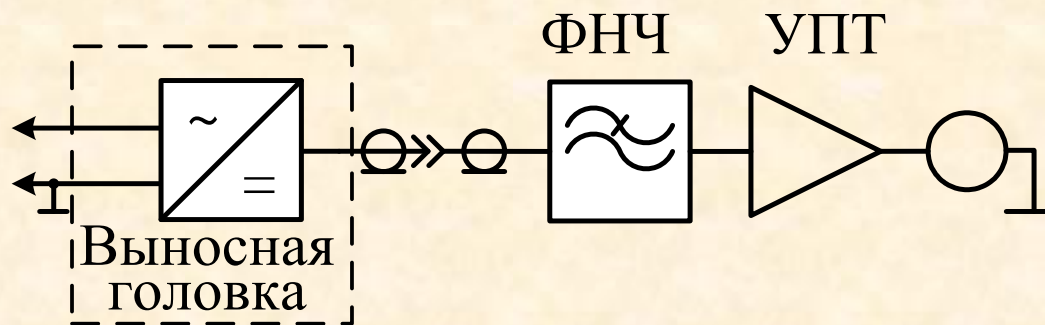
Детектор среднеквадратического значения с логарифмическими функциональными преобразователями

$$u(t) \rightarrow |u(t)| \rightarrow \ln |u(t)| \rightarrow 2 \ln |u(t)| \rightarrow \ln (u^2(t)) - \ln U = \ln \left(\frac{u^2(t)}{U} \right) \rightarrow$$

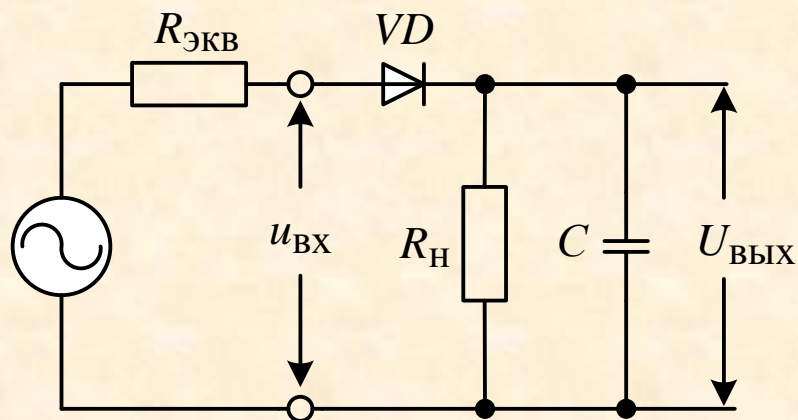
$$\rightarrow \exp \left(\ln \left(\frac{u^2(t)}{U} \right) \right) = \frac{u^2(t)}{U} \rightarrow \frac{1}{UT} \int_0^T u(t)^2 dt = U.$$



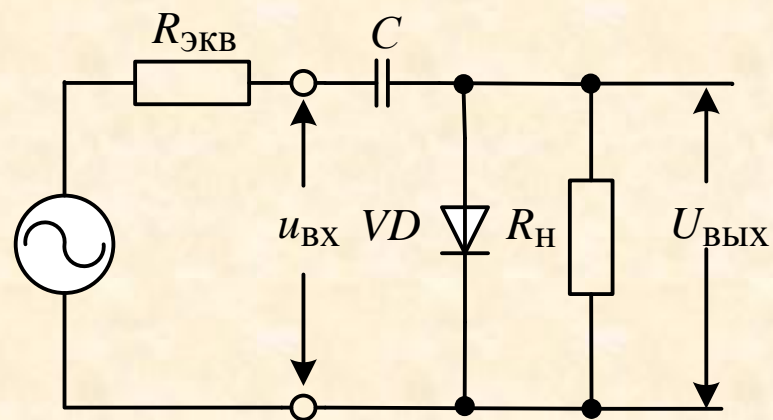
Вольтметры амплитудного значения (импульсные вольтметры)



Структурная схема
амплитудного
вольтметра
типа «детектор–
усилитель»

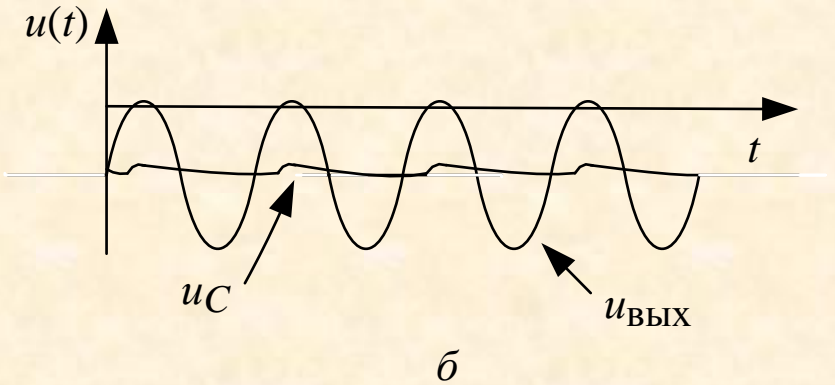
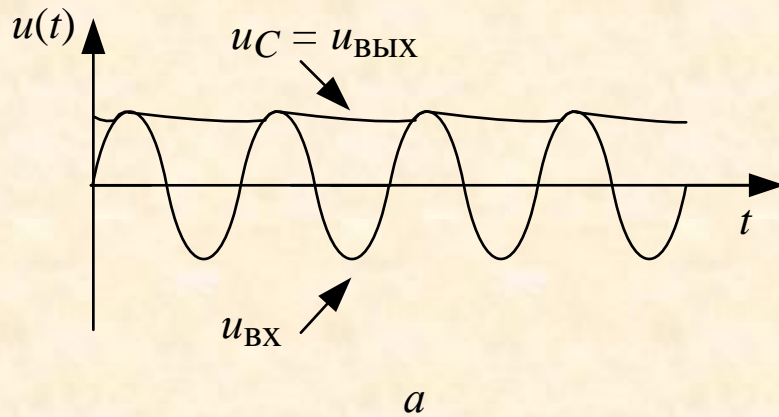


а



б

Амплитудный детектор:
а – с открытым входом; б – с закрытым входом



. Временные диаграммы напряжений амплитудного детектора:

a – с открытым входом; *б* – с закрытым входом

$$\tau^{+} \cong C R_{VD}^{+} + R_{\text{ЭКВ}}$$

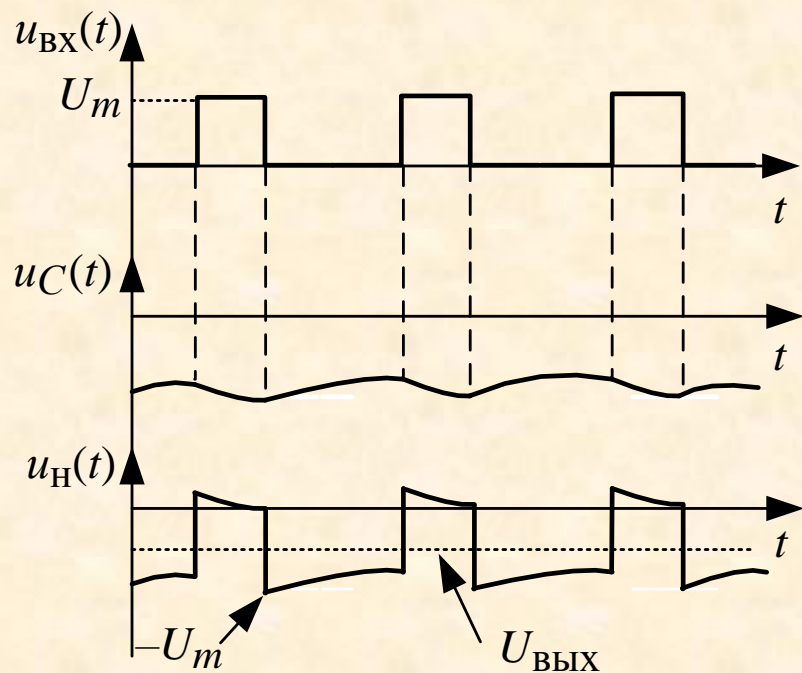
$$\tau^{-} = C R_{VD}^{-} + R_{\text{ЭКВ}} \parallel R_{\text{Н}}$$

. Постоянные времени заряда и разряда конденсатора в схеме с закрытым входом

. Постоянные времени заряда и разряда конденсатора в схеме с открытым входом

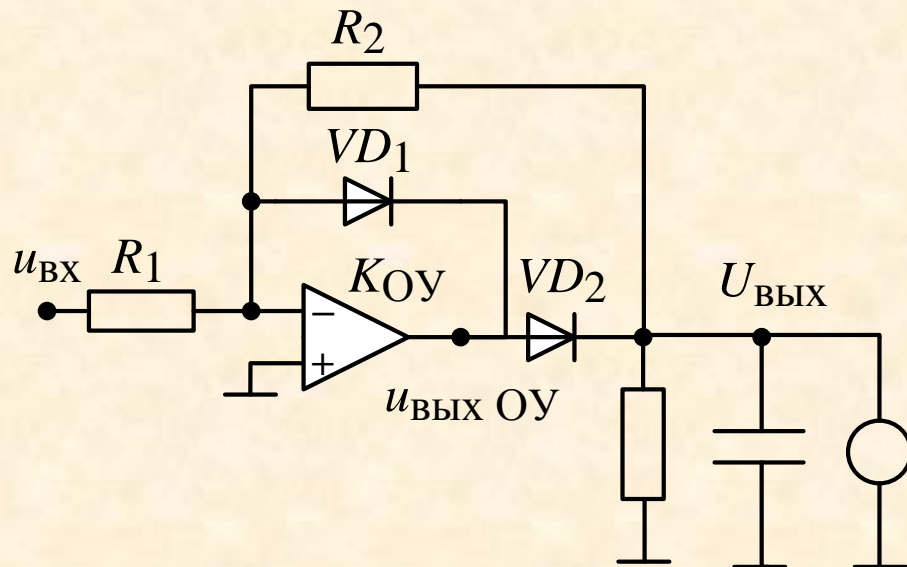
$$\tau^{+} \cong C R_{VD}^{+} + R_{\text{ЭКВ}}$$

$$\tau^{-} = C R_{\text{ЭКВ}} + R_{VD}^{-} \parallel R_{\text{Н}}$$



Диаграммы напряжений
пикового детектора
при импульсном сигнале на
входе

Амплитудный детектор
с нелинейной ООС



Электронные вольтметры



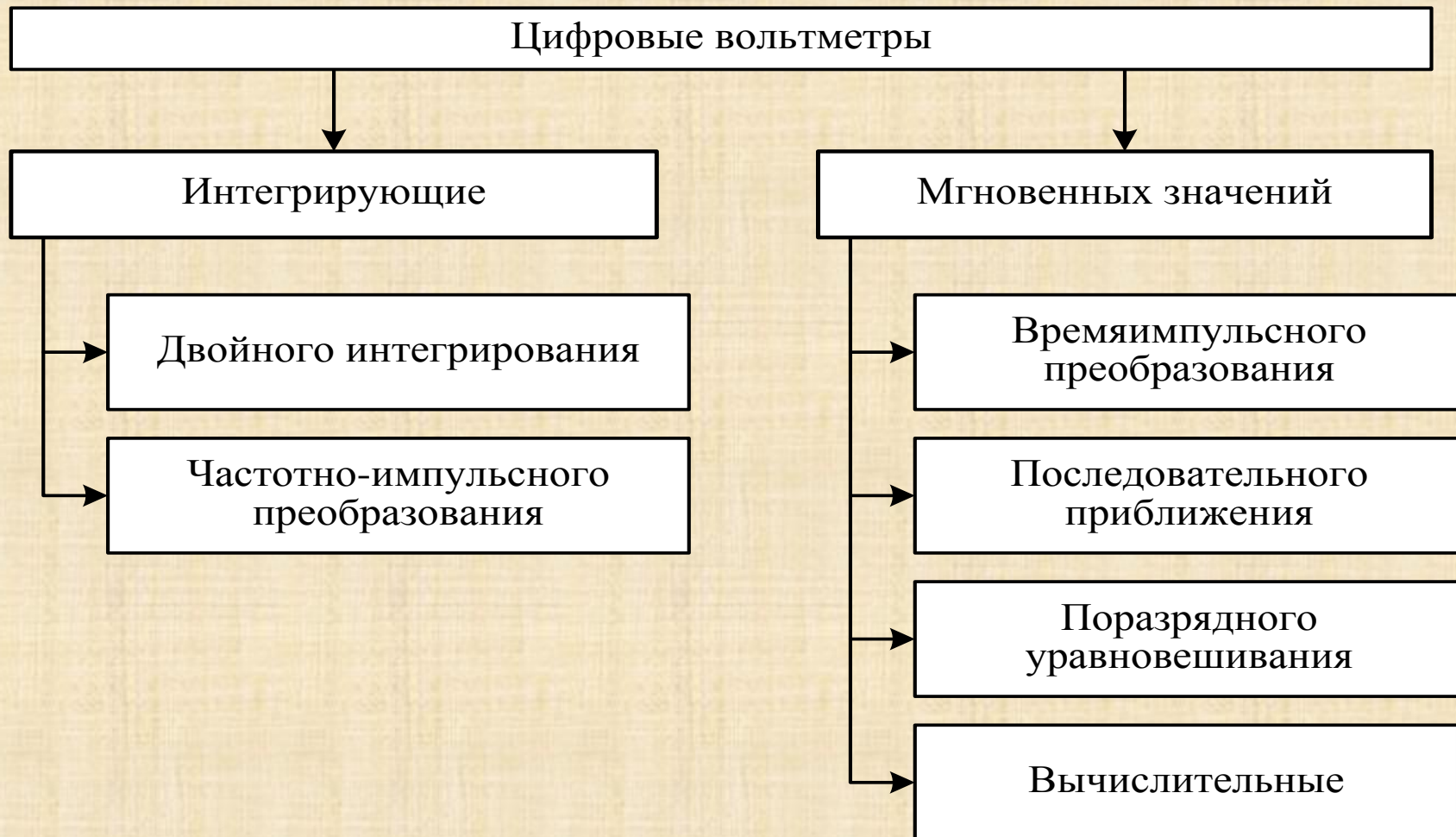


Вольтметр
среднеквадратического
Значения
0,3мВ - 300В, 50 МГц.

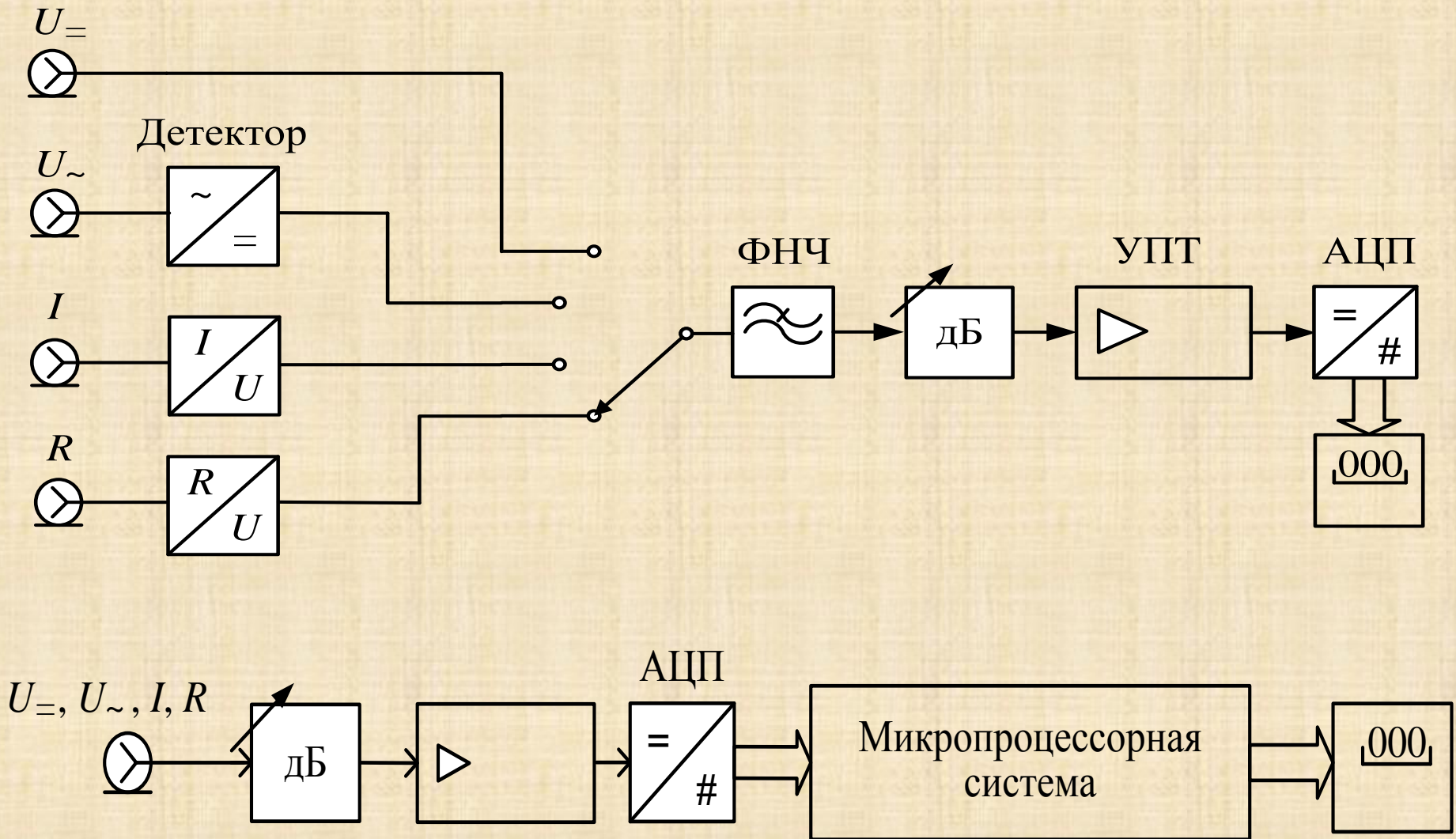


Вольтметр
средневыпрямленного
значения
0,01 мВ - 300 В; 5 Гц - 5 МГц

Цифровые вольтметры

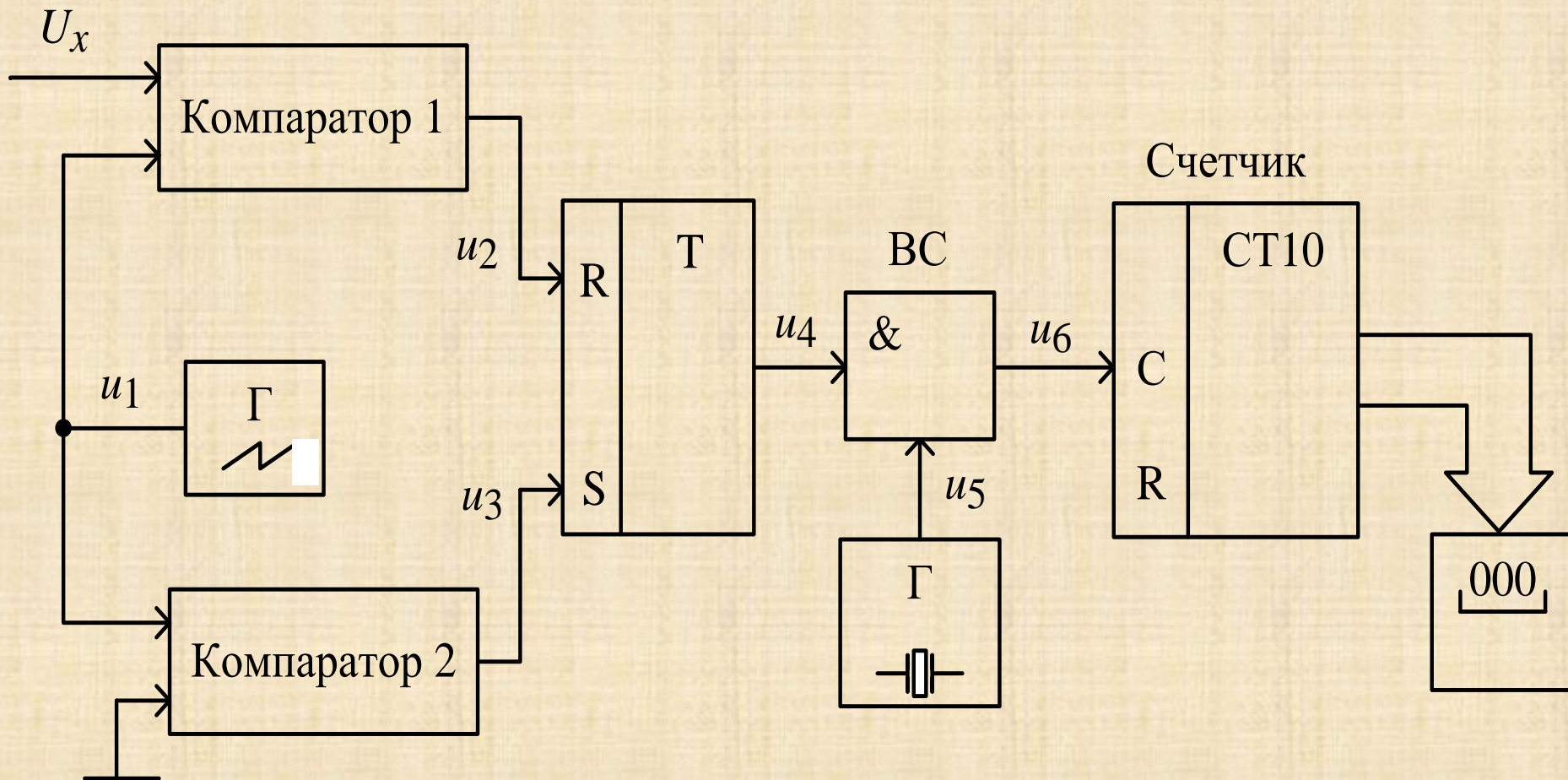


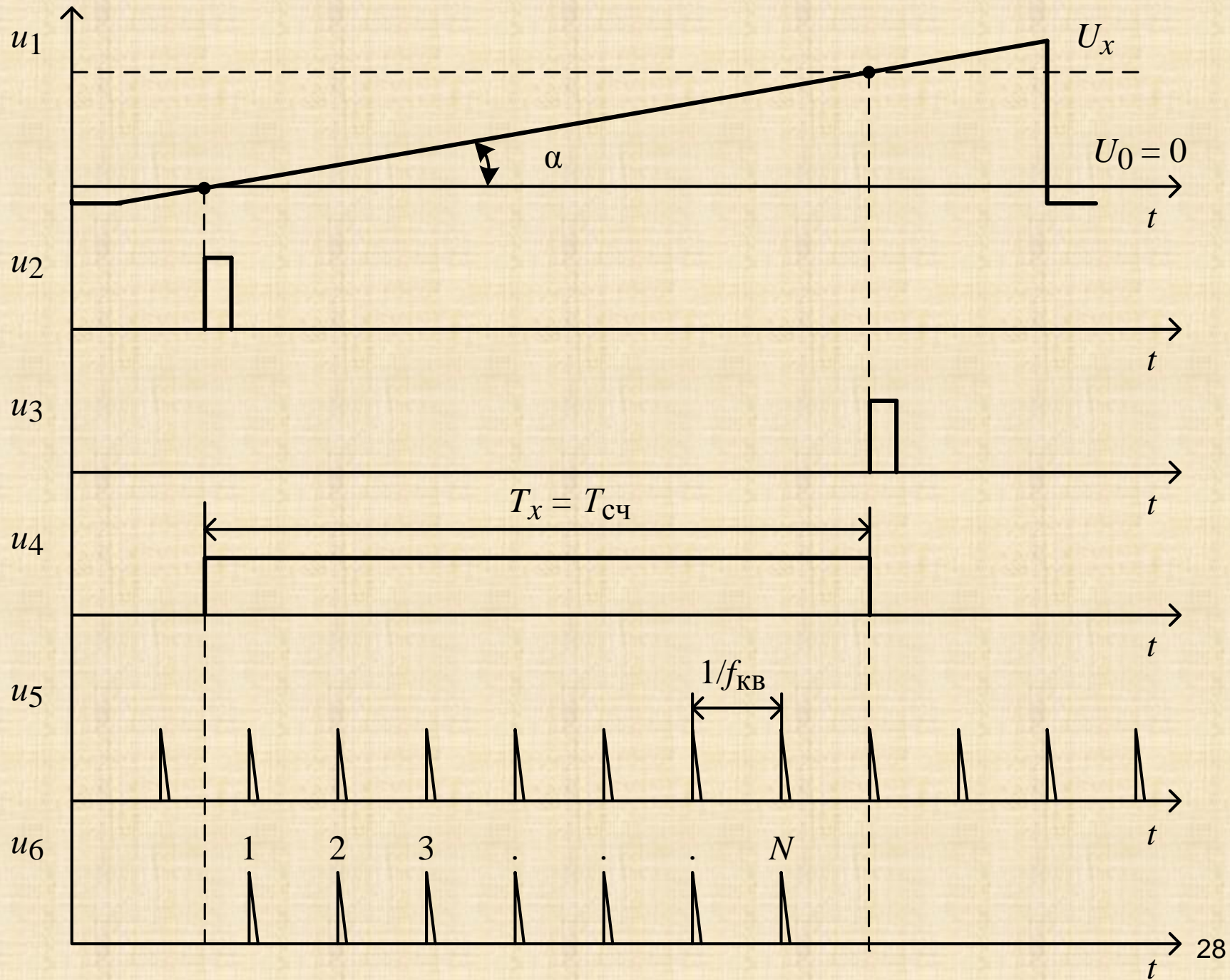
Структурная схема цифрового вольтметра-мультиметра



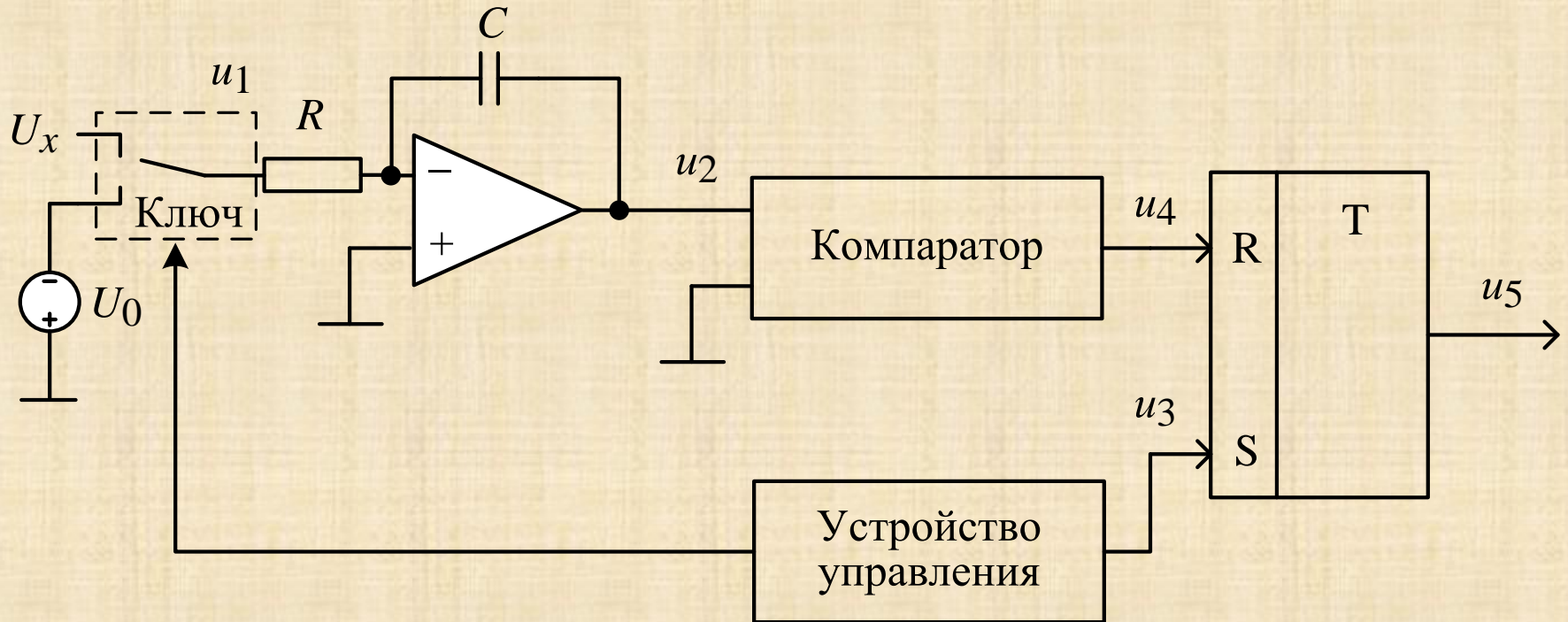
Структурная схема вычислительного цифрового вольтметра

ЦВ временного преобразования



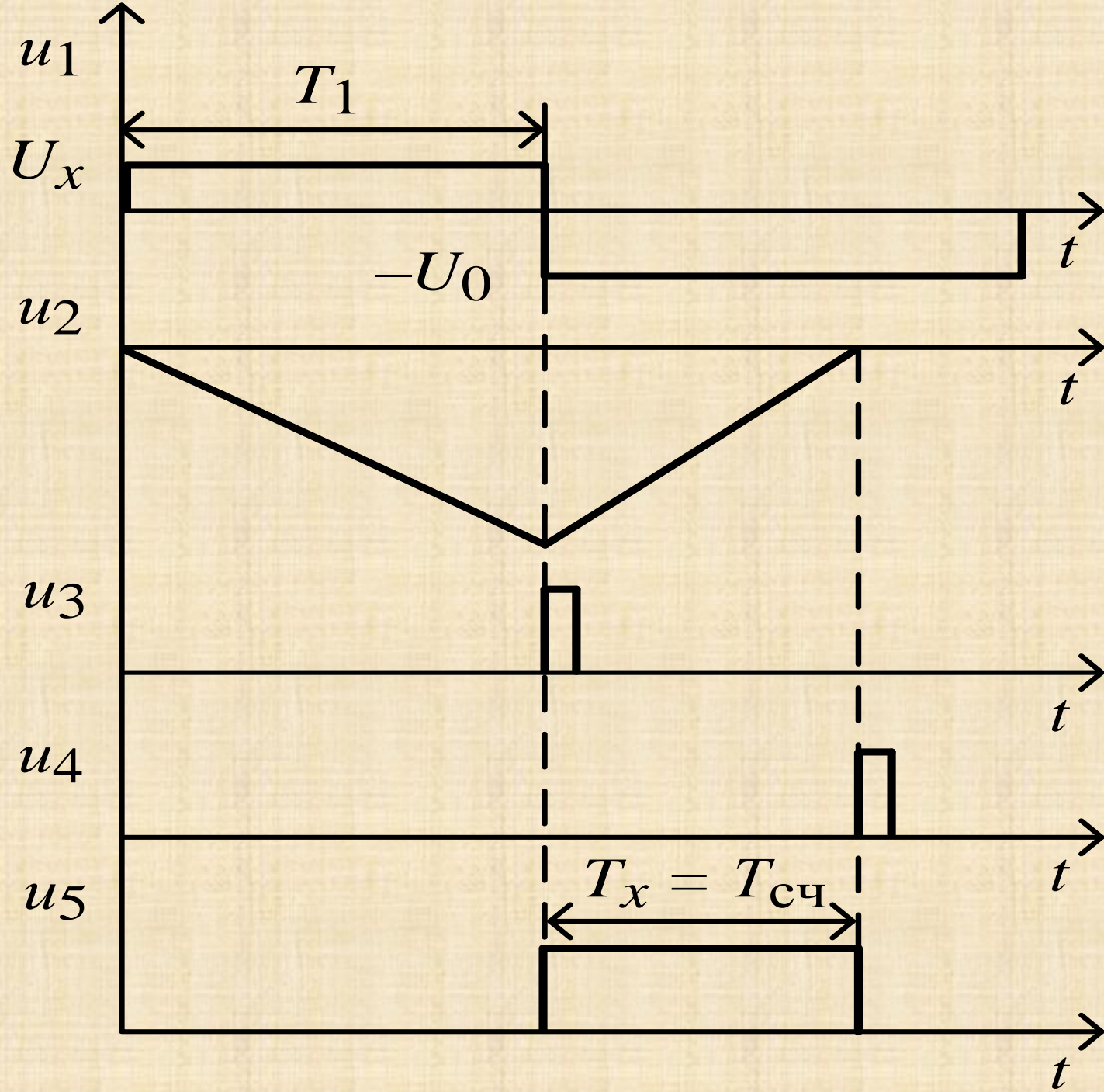


ЦВ двойного интегрирования

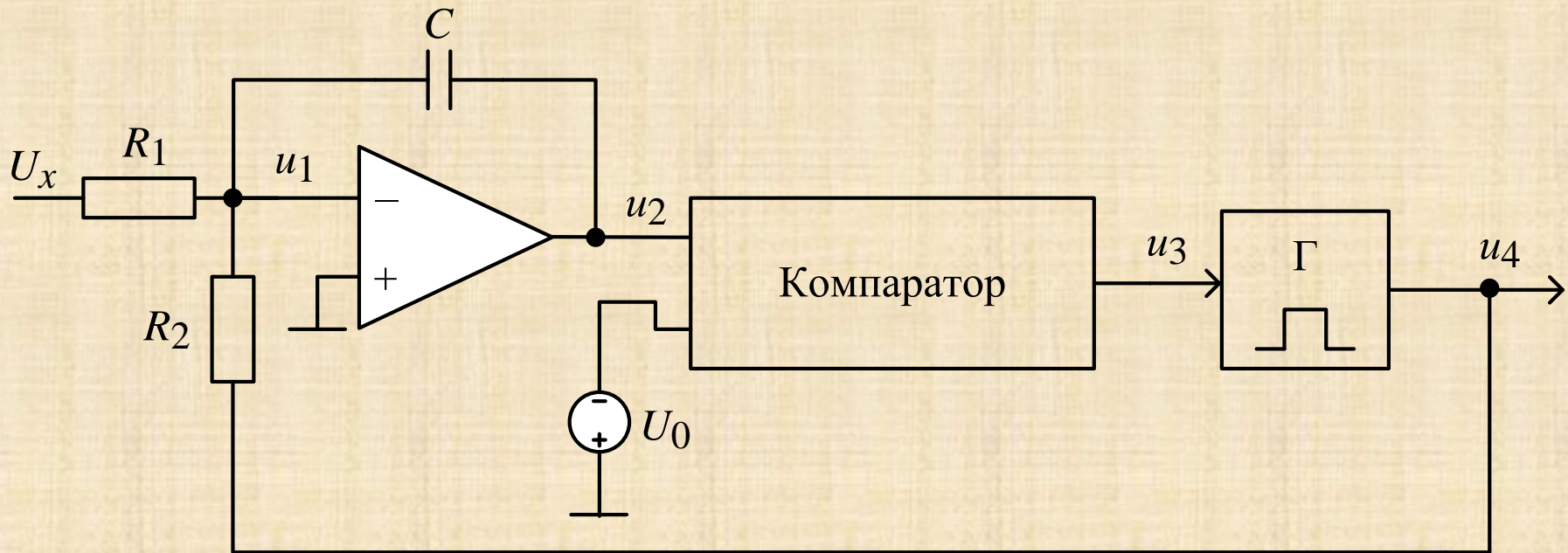


Основа - интегратор. Это функциональный блок на операционном усилителе, обеспечивающий связь между входным u_1 и u_2 напряжениями

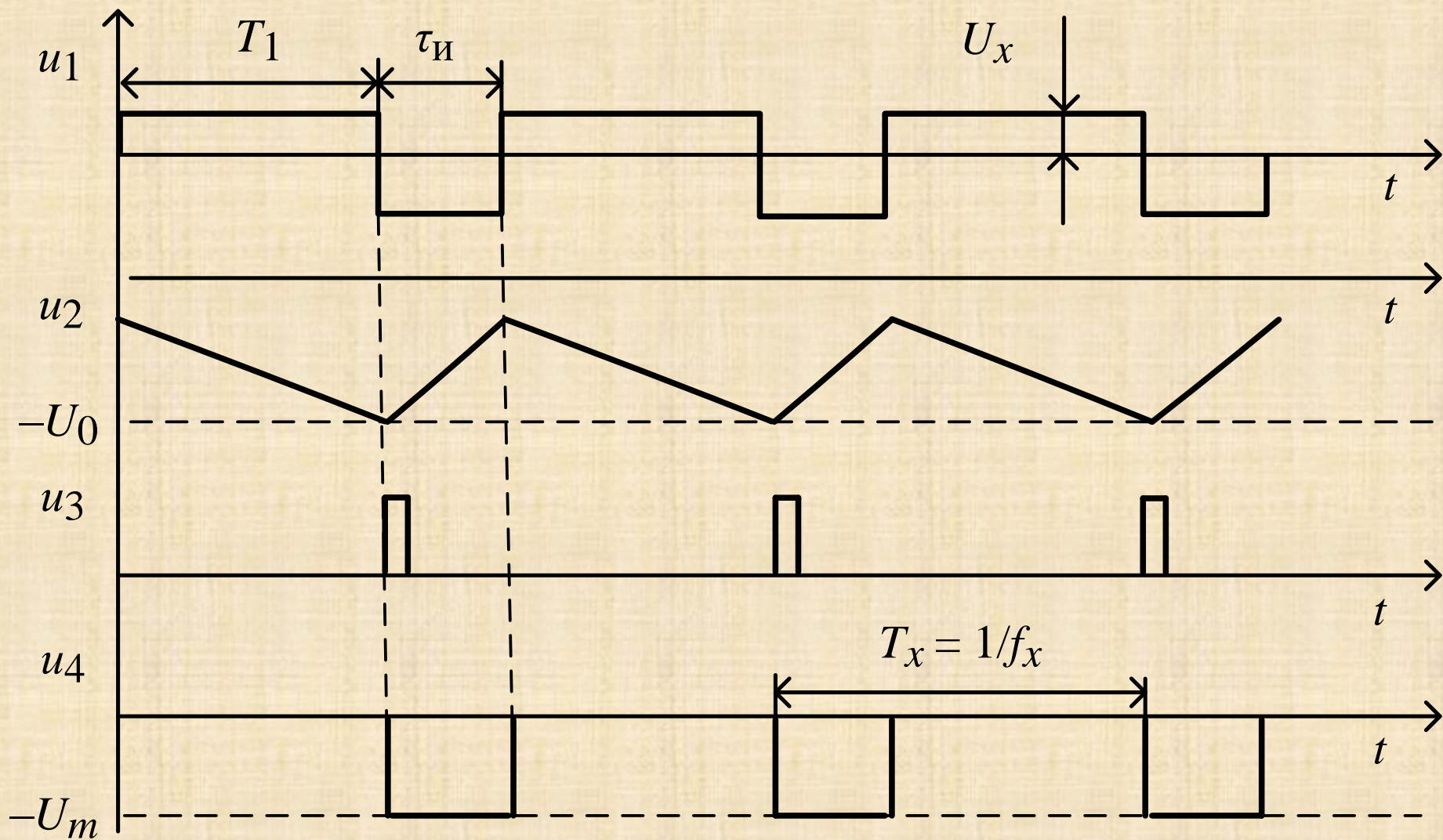
$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{ВХ}}(t) dt$$



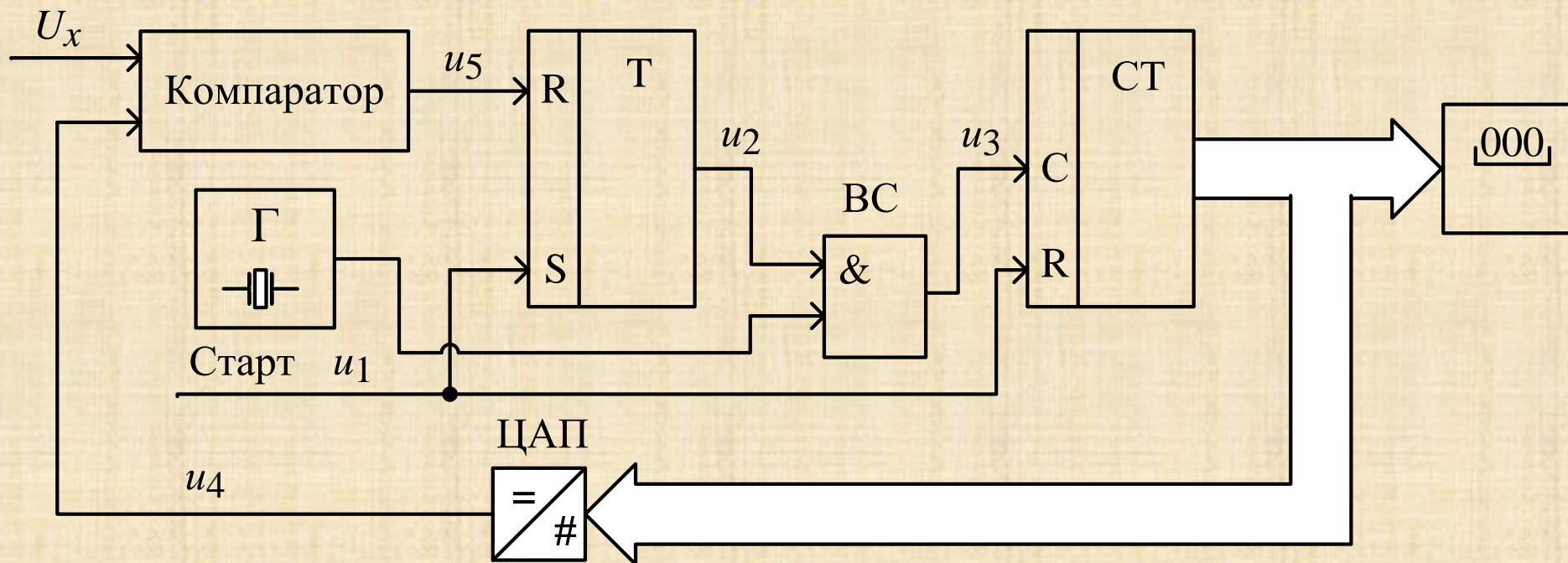
ЦВ с преобразованием напряжения в частоту



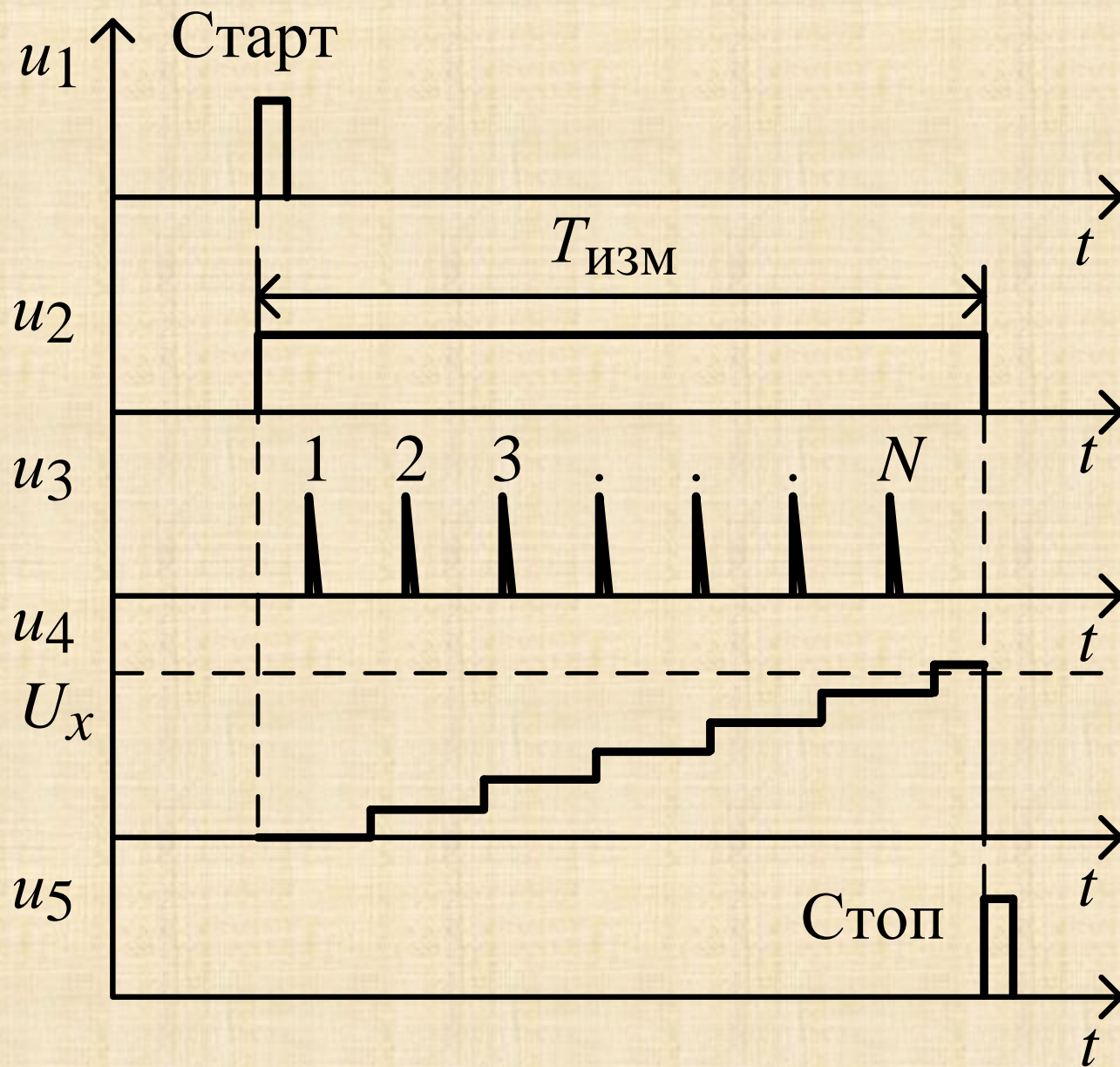
Используется преобразователь «напряжение–частота» (ПНЧ). В ПНЧ осуществляется двойное интегрирование суммы входного напряжения и импульсов, генератора u_4 . Линейно нарастающее и убывающее напряжение u_2 сравнивают с опорным напряжением U_0 .



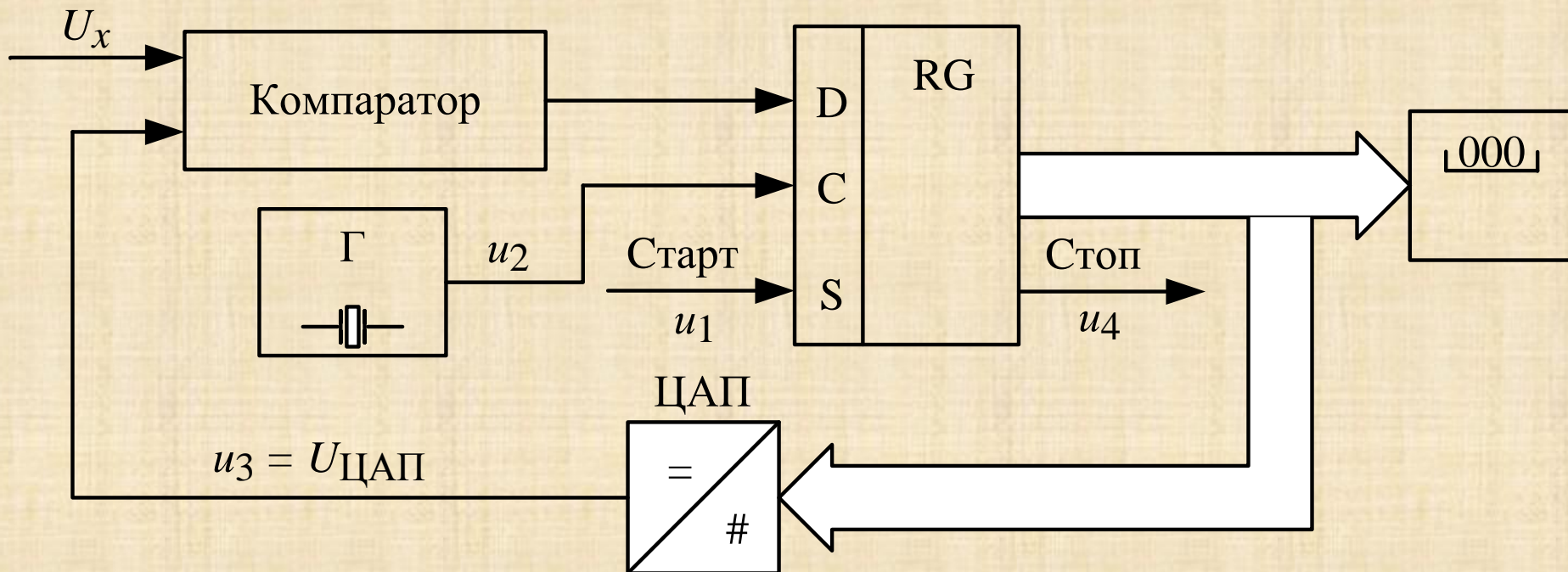
ЦВ с АЦП последовательного счета



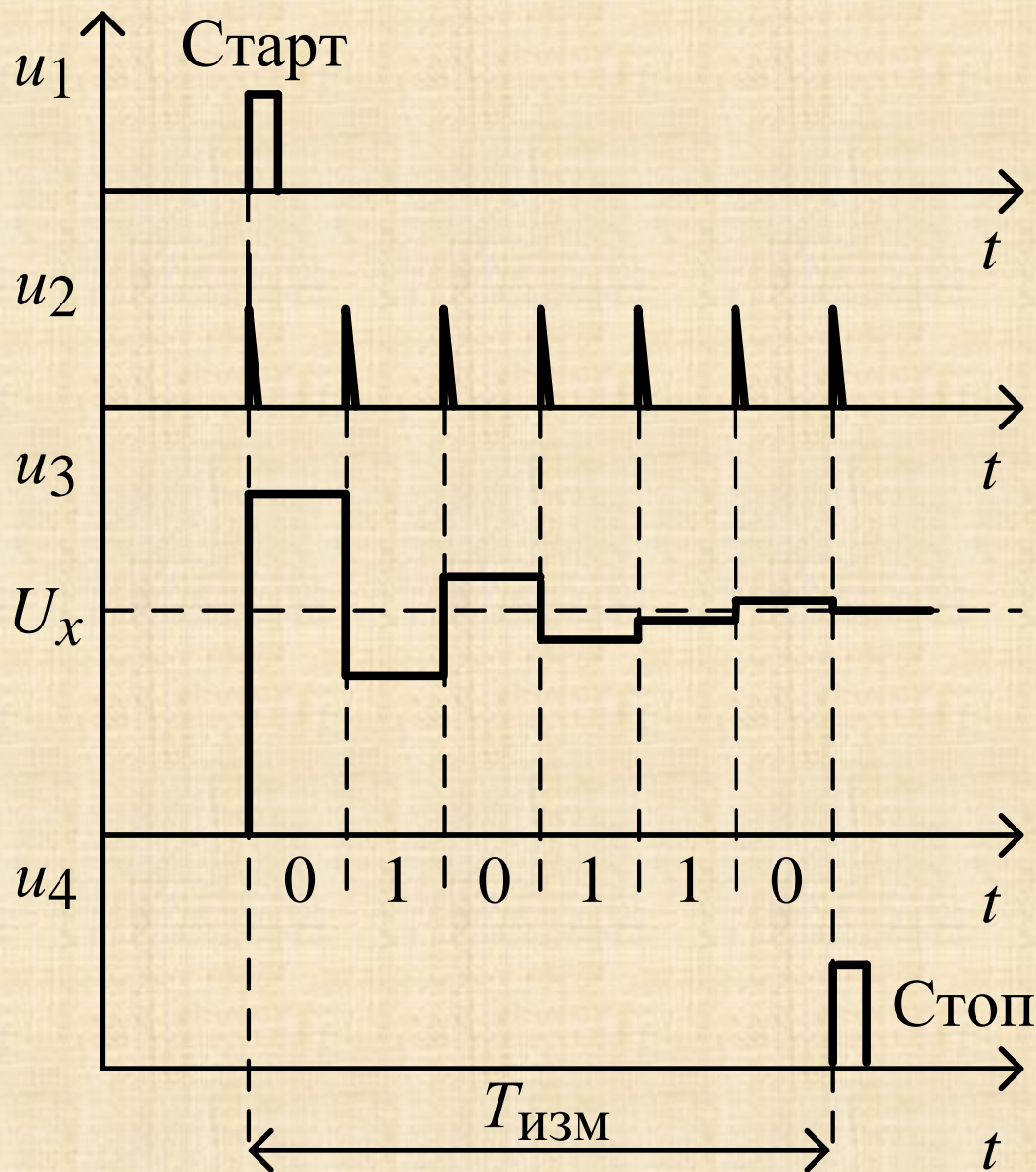
Последовательный АЦП состоит из компаратора, двоичного счетчика и цифроаналогового преобразователя (ЦАП), включенного в цепь обратной связи.



ЦВ с АЦП последовательного приближения



Принцип последовательного сравнения измеряемого напряжения с $1/2$, $1/4$, $1/8$ опорного напряжения. Это позволяет для N -разрядного АЦП последовательного приближения выполнить весь процесс преобразования за N последовательных шагов (итераций) вместо $2^N - 1$ при использовании АЦП последовательного счета



Быстродействие АЦП
данного типа
определяется
выбранной
разрядностью и суммой
времени установления
ЦАП, переключения
компаратора и
задержки
распространения
сигнала в регистре
последовательного
приближения.

Цифровые вольтметры и мультиметры



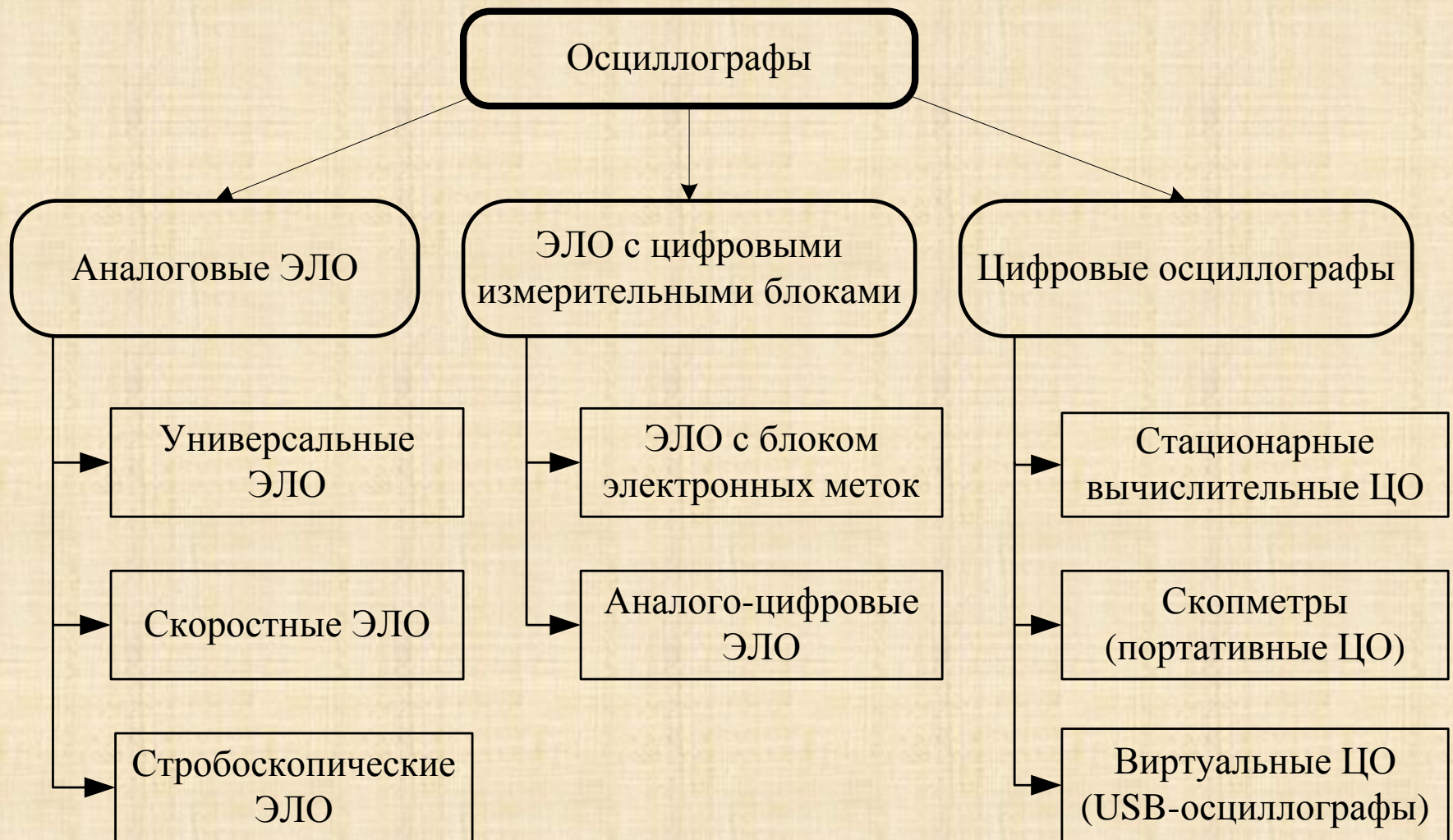
Цифровые мультиметры



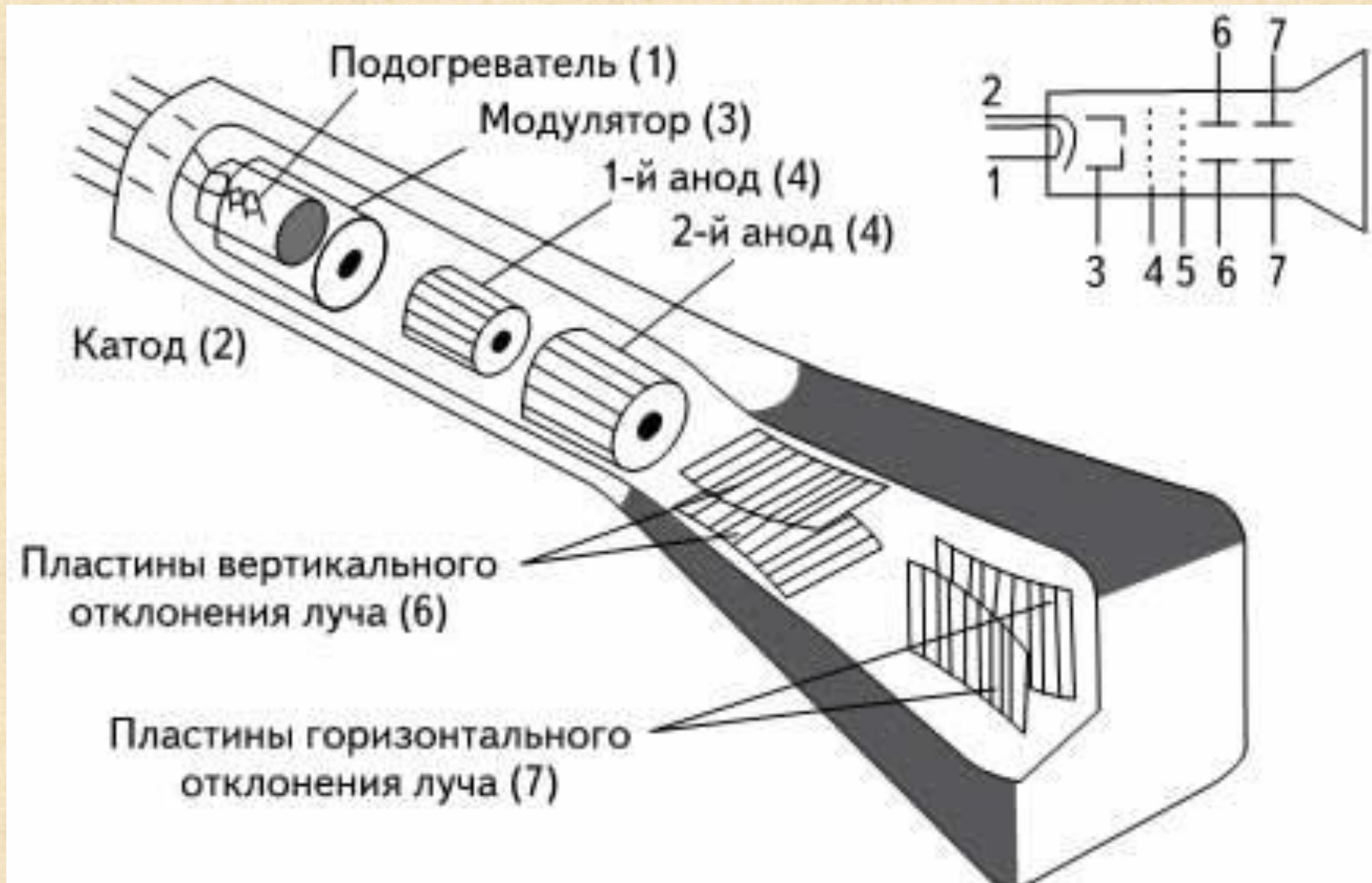
Цифровые мультиметры



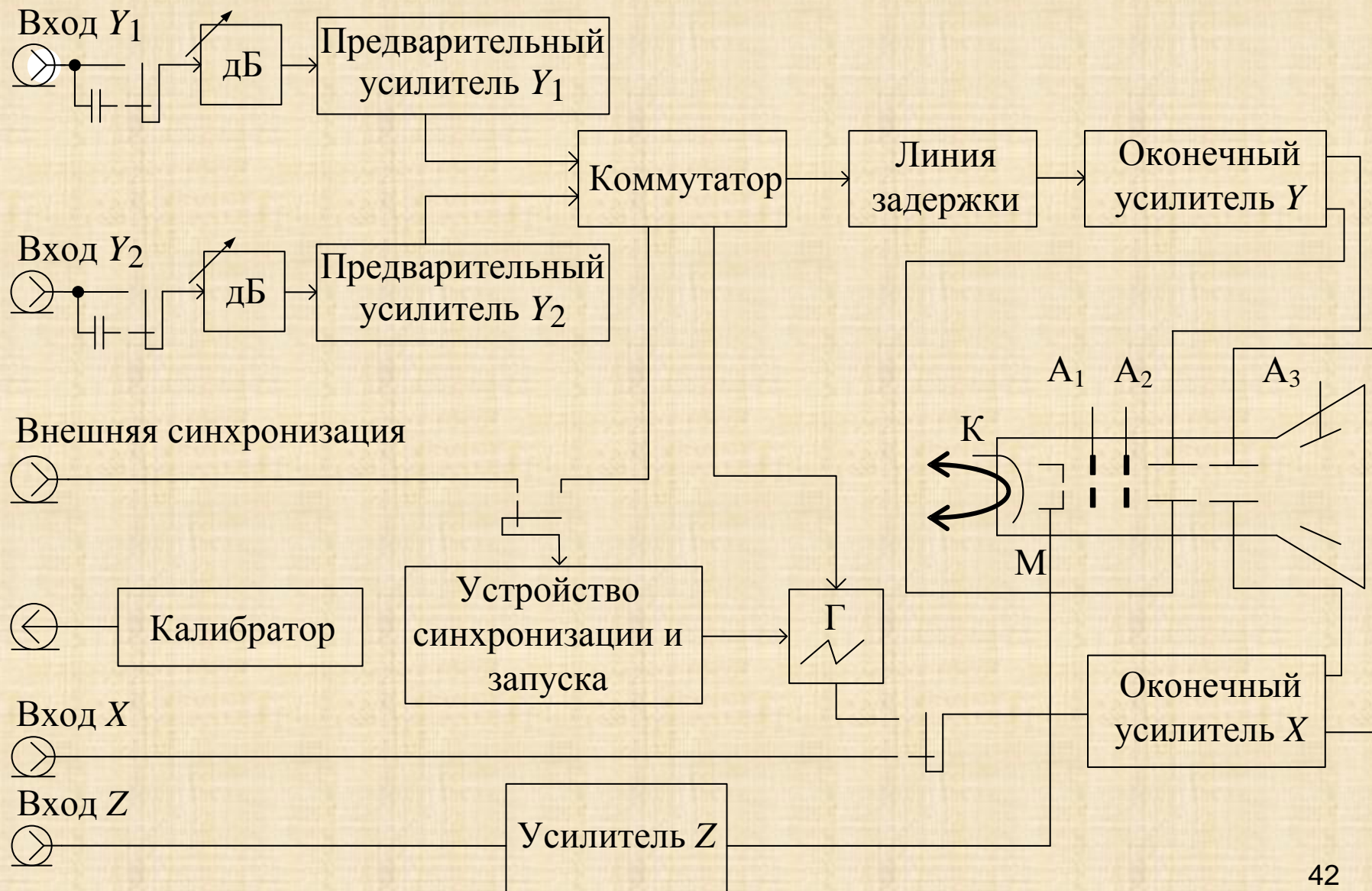
Классификация осциллографов



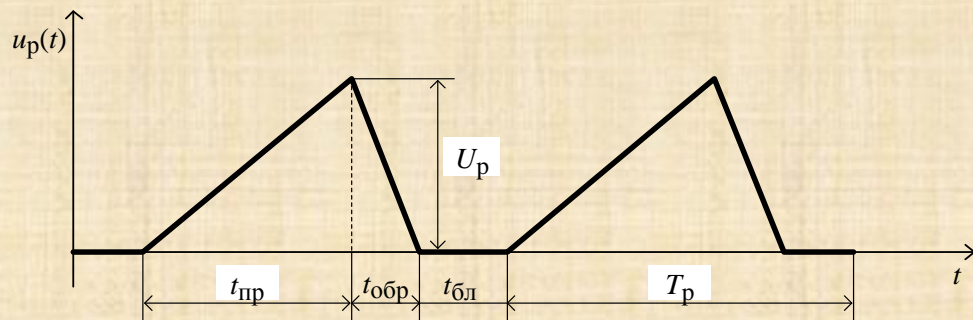
Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ)



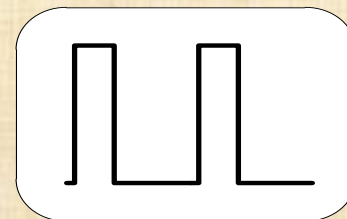
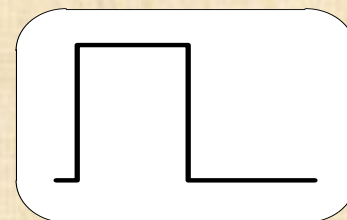
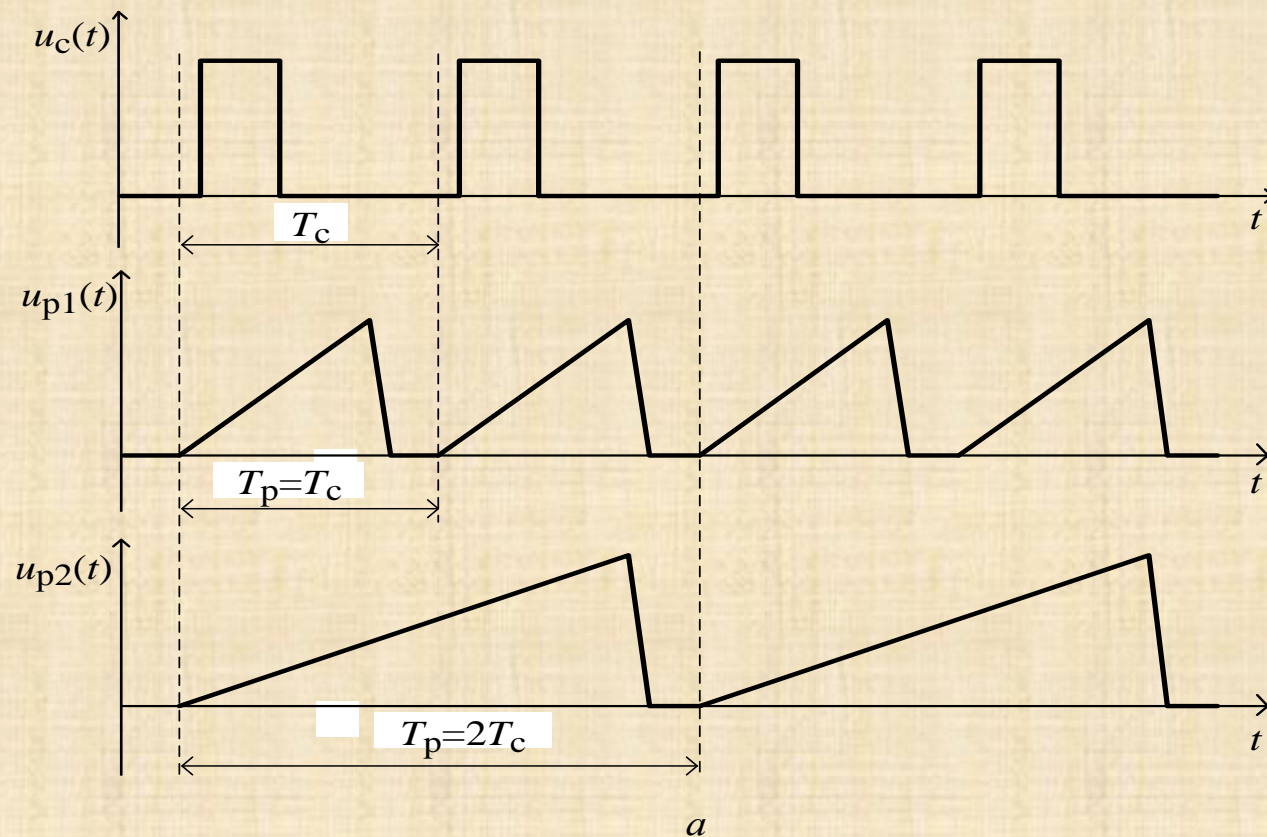
Структурная схема аналогового двухканального осциллографа



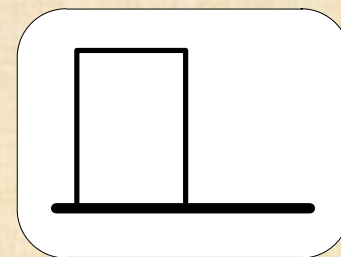
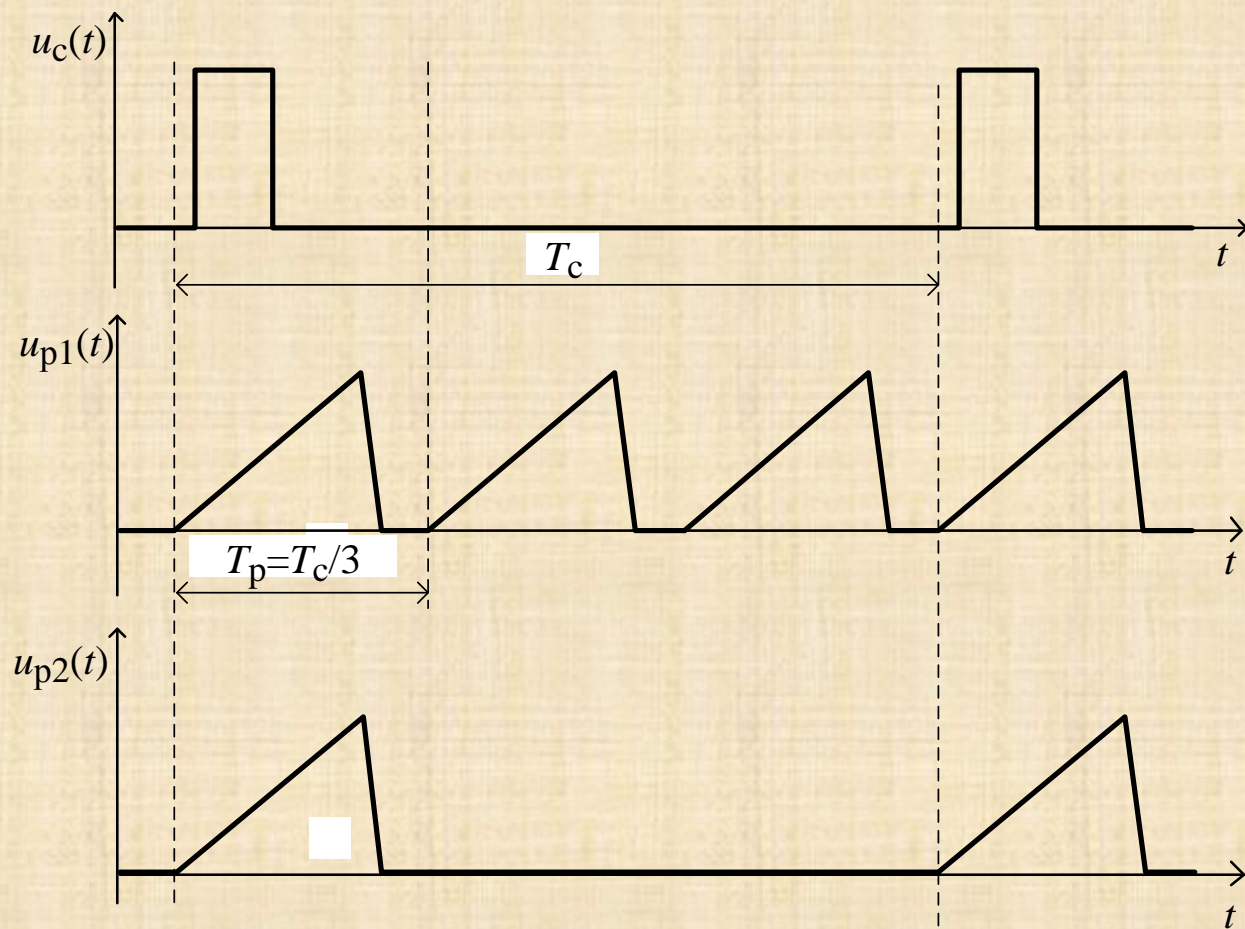
Напряжения непрерывной развертки ЭЛО



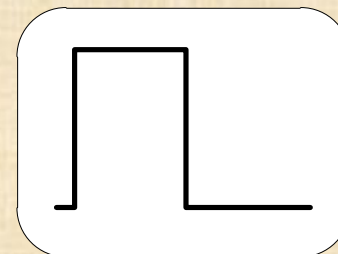
$$T_p = t_{пр} + t_{обр} + t_{бл}$$



Напряжения ждущей развертки ЭЛО

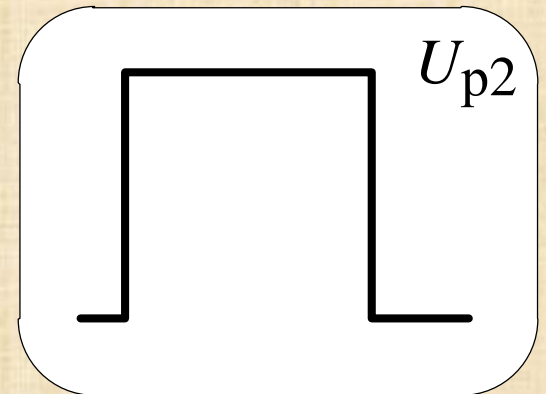
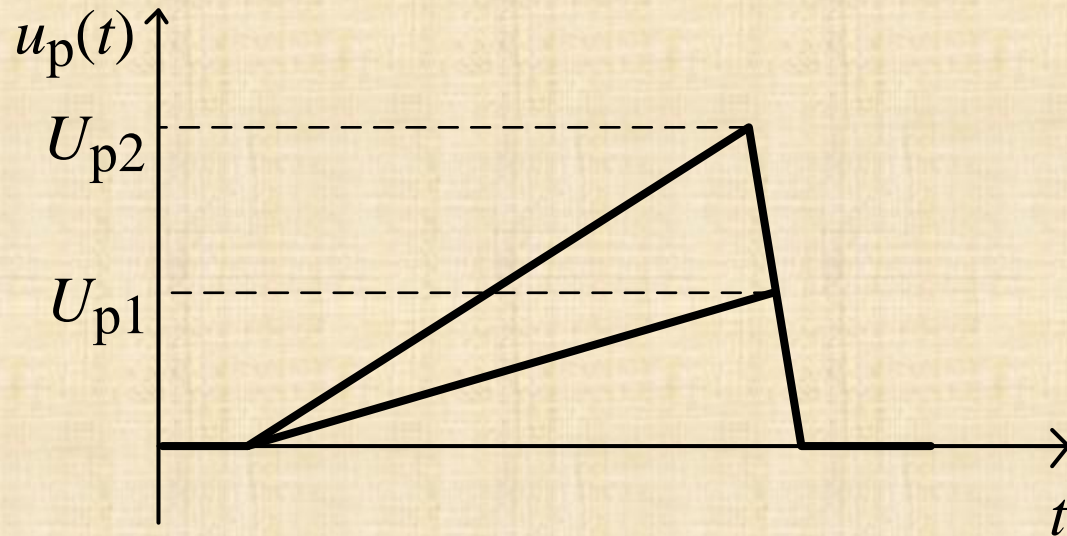
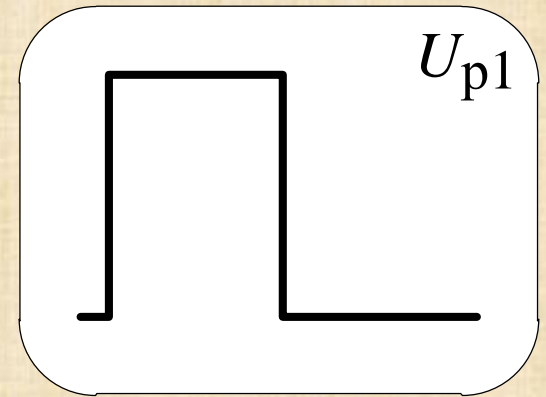
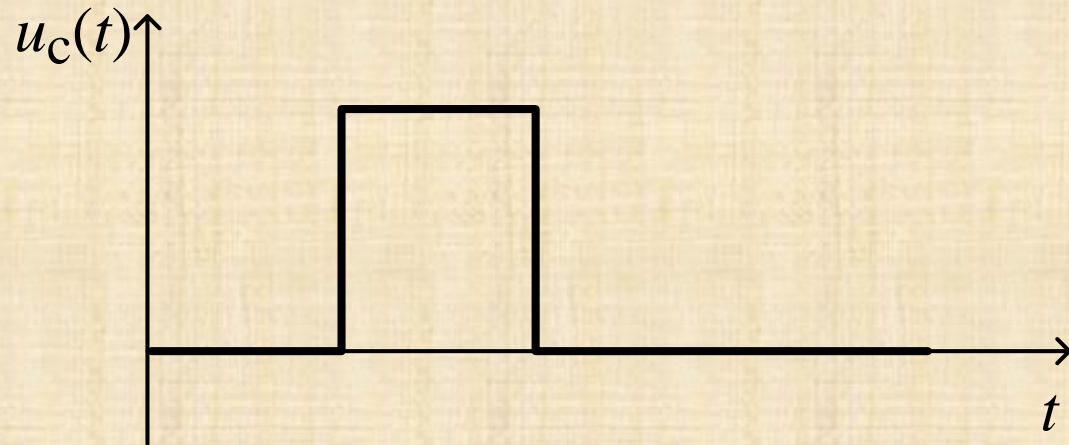


a

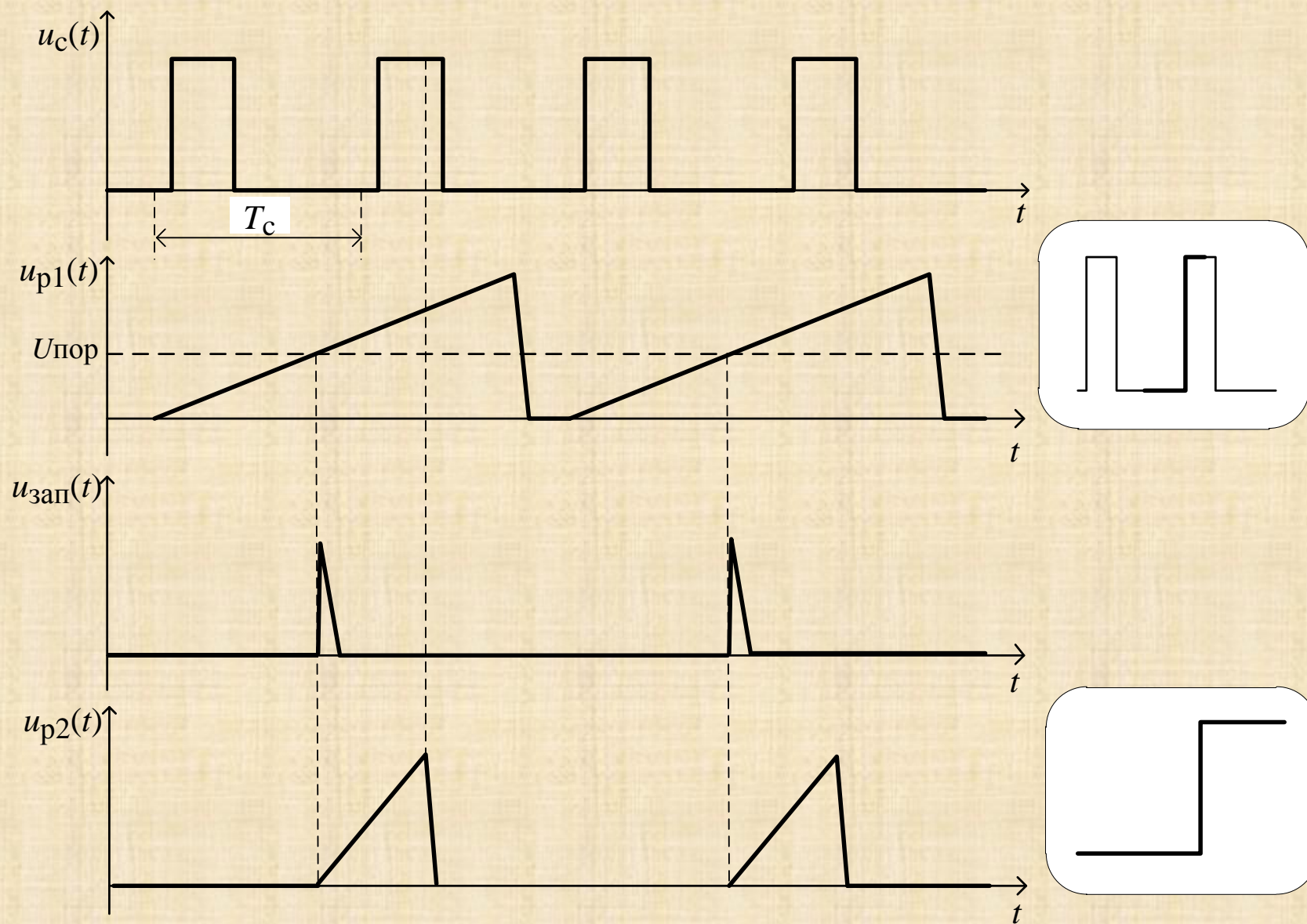


б

Режим растяжки развертки ЭЛО

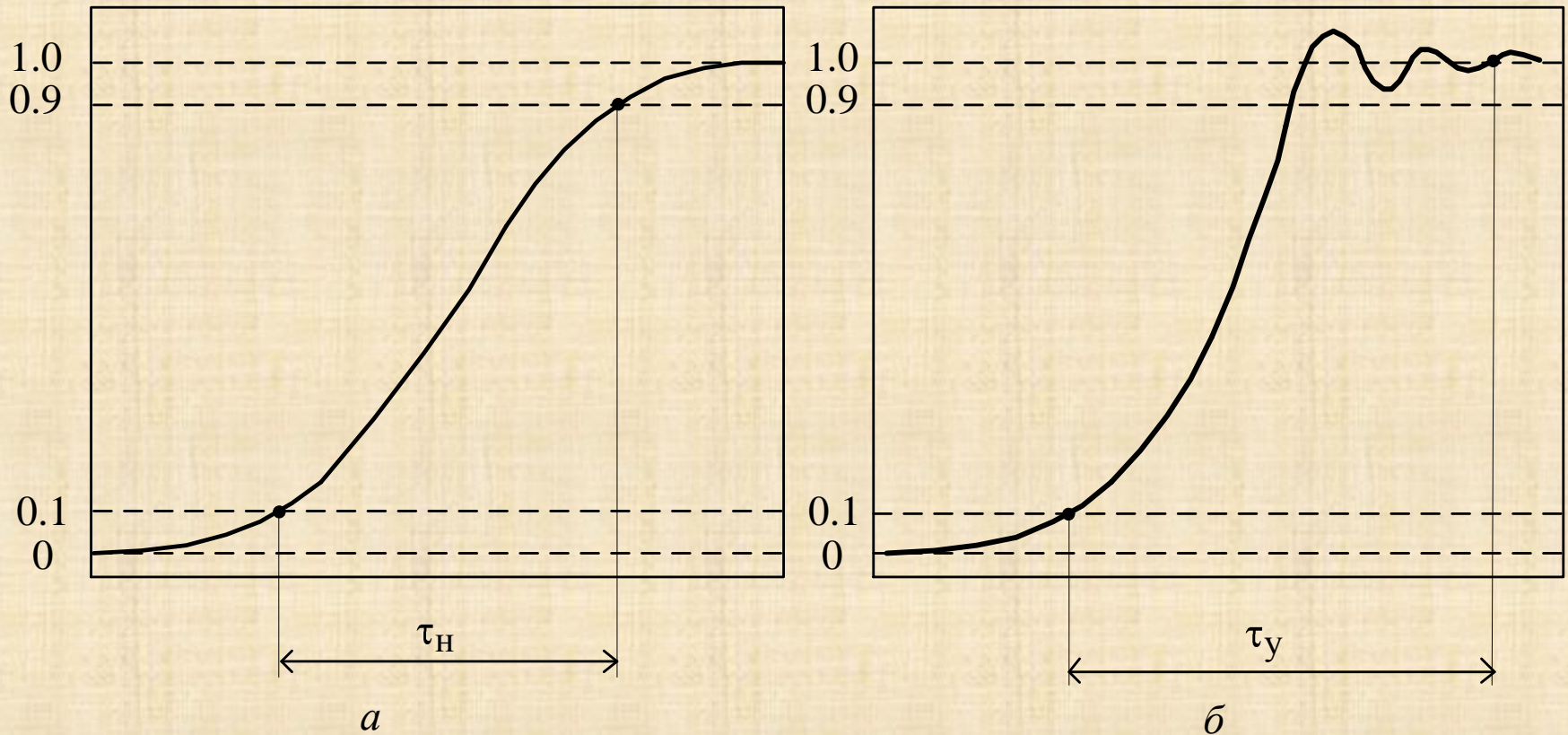


Работа системы двойной развертки ЭЛО



Переходная характеристика осциллографа

Переходная характеристика (ПХ) осциллографа - осциллограмма скачка напряжения с пренебрежимо малым фронтом.



ПХ имеет вид апериодического (рис. 3.9 а) или колебательного (рис. 3.9 б) звена.

Главный параметр апериодической ПХ – **время нарастания** τ_n . Для колебательной формы ПХ вводят дополнительные параметры – **время установления** τ_y и величину **выброса** δ_v .

Время нарастания измеряют по осциллограмме между точками 0.1 и 0.9 от установившегося значения сигнала. Если входной скачок имеет конечное время фронта τ_ϕ , то время нарастания τ_n рассчитывают по формуле:

$$\tau_n = \sqrt{\tau_{изм}^2 - \tau_\phi^2}$$

$\tau_{изм}$ – величина, измеренная по шкале осциллографа.

Время установления отсчитывают между уровнем 0.1 и моментом, когда осцилляции на вершине ПХ не станут пренебрежимо малы.

Выброс оценивают в % от амплитуды ПХ.

АЧХ осциллографа

АЧХ осциллографа – зависимость вертикального размера изображения гармонического сигнала от его частоты.

Получают АЧХ путем измерения размера изображения по вертикали гармонического сигнала на разных частотах.

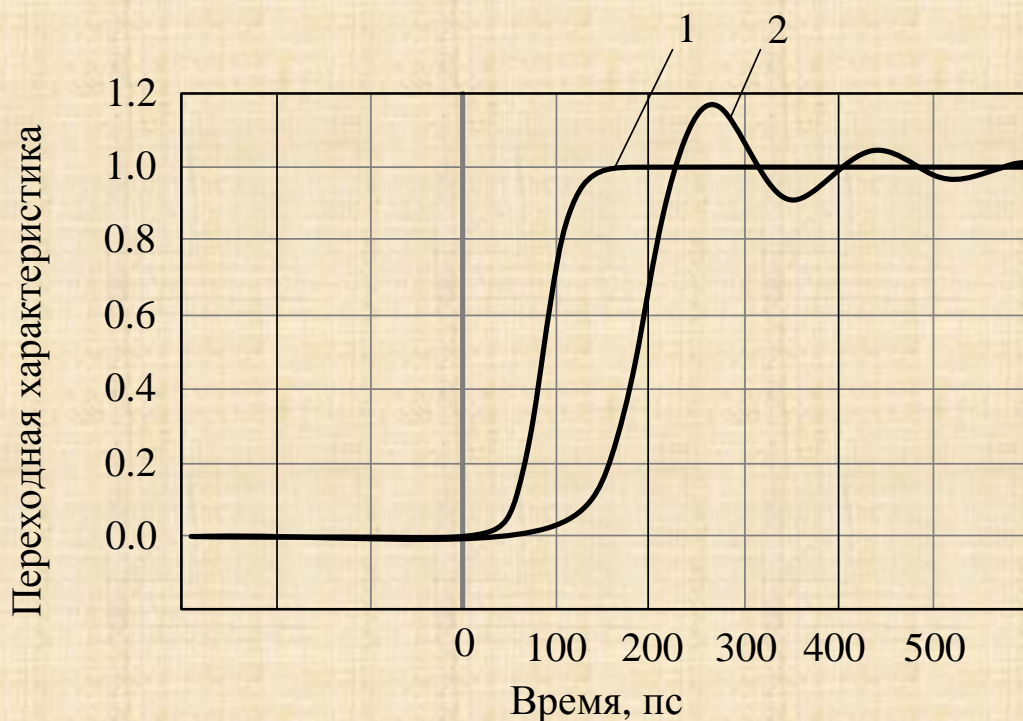
Важнейшим параметром АЧХ является **верхняя граничная частота** осциллографа f_v . Она определяется по спаду АЧХ до уровня 0.707 от значения на низкой (опорной) частоте.



АЧХ осциллографа: 1 – максимально плоская, 2 – близкая к гауссовой

Оптимальной формой, которая обеспечивает наименьшее время нарастания, обладает характеристика, близкая к АЧХ фильтра Гаусса:

$$A(f) = \exp\left(-0.35 \frac{f}{f_B}\right)$$



Верхняя граничная частота и время нарастания ПХ, согласно ГОСТ, связаны соотношением

$$\tau_H = \frac{350}{f_B}$$

частота выражена в МГц, а время – в нс.

Переходные характеристики: 1 – АЧХ близкая к гауссовой, 2 – максимально плоская

Отечественные аналоговые осциллографы СССР С1-5 и ЛО-70

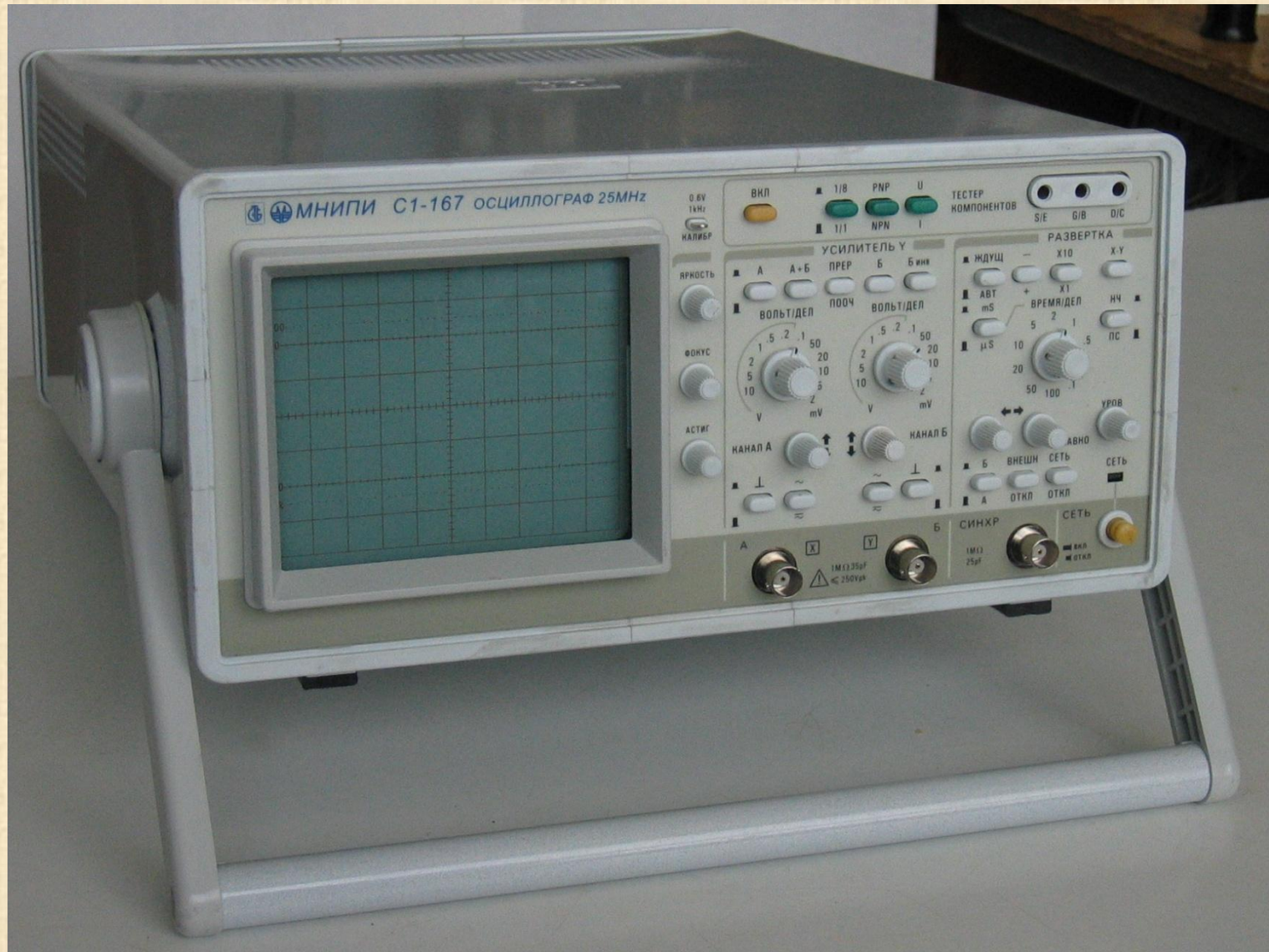


www.wasp.kz

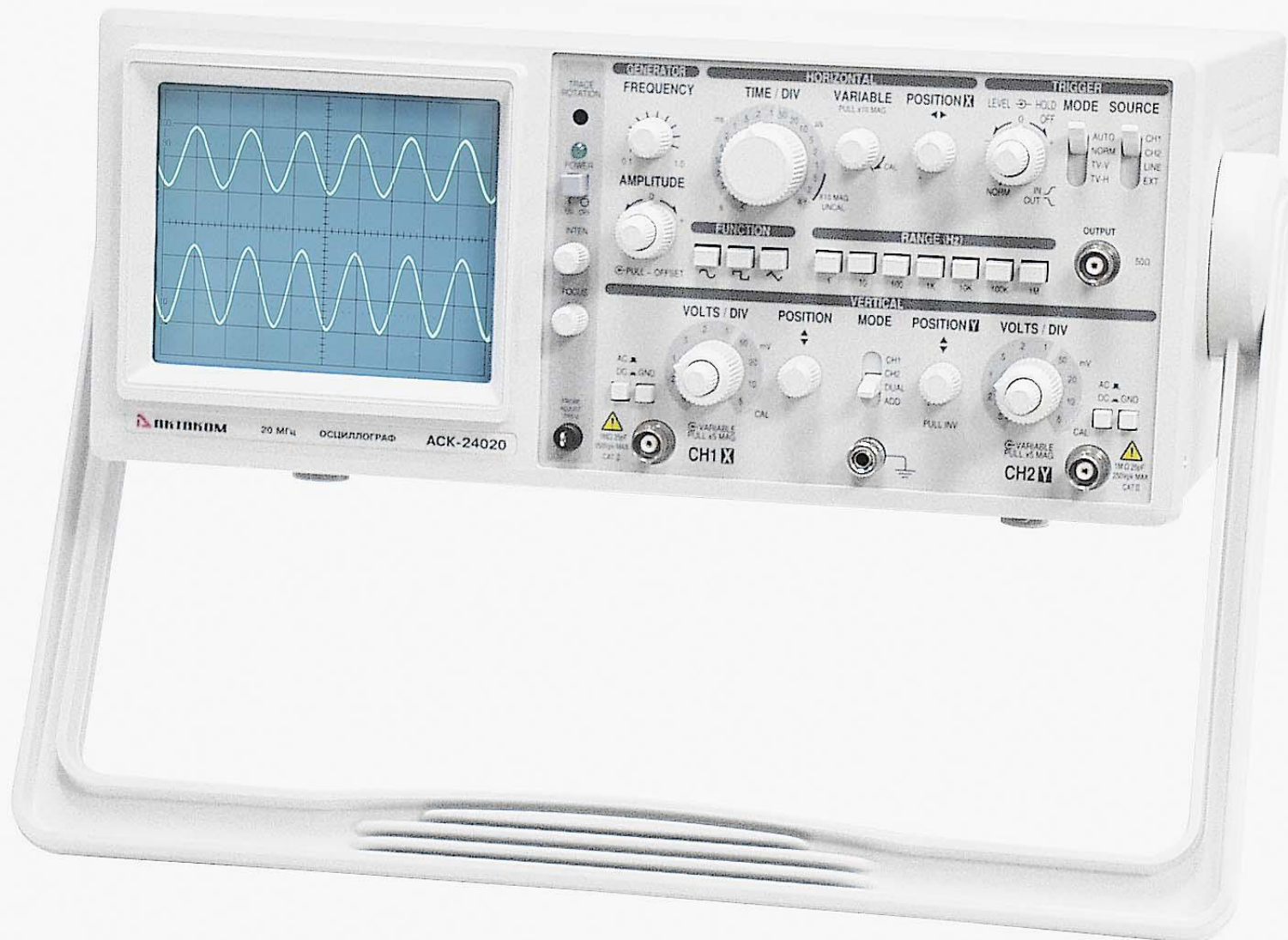
Отечественный аналоговый осциллограф С1-92



Отечественный аналоговый осциллограф С1-167



Аналоговый осциллограф АКТАКОМ АСК-24020
(2 канала, полоса пропускания 20 МГц, ЭЛТ 8х10 см,
чувствительность 1 мВ/дел...5 В/дел, функциональный
генератор 0,1 Гц...1 МГц)



Классификация методов осциллографических измерений



Осциллографические методы измерения временных интервалов

Визуальное измерение на экране

Метод калиброванных
шкал

Сравнение с эталонным
импульсом на экране

Калиброванная развертка

Электронные метки

Компенсационный метод с
постоянным напряжением

Метод замещения с
задержанной разверткой

Непосредственное преобразование сигнала

Цифровые осциллографы
(цифровая развертка)

Трансформация
временного масштаба
(стробоскопические
осциллографы с
калиброванной частотой
стробирования)

Измерение фазового сдвига

Под *фазовым сдвигом* понимают разность начальных фаз двух гармонических сигналов одинаковой частоты. Для негармонических сигналов одинакового периода понятие фазового сдвига заменяют понятием сдвига во времени (временной задержкой).

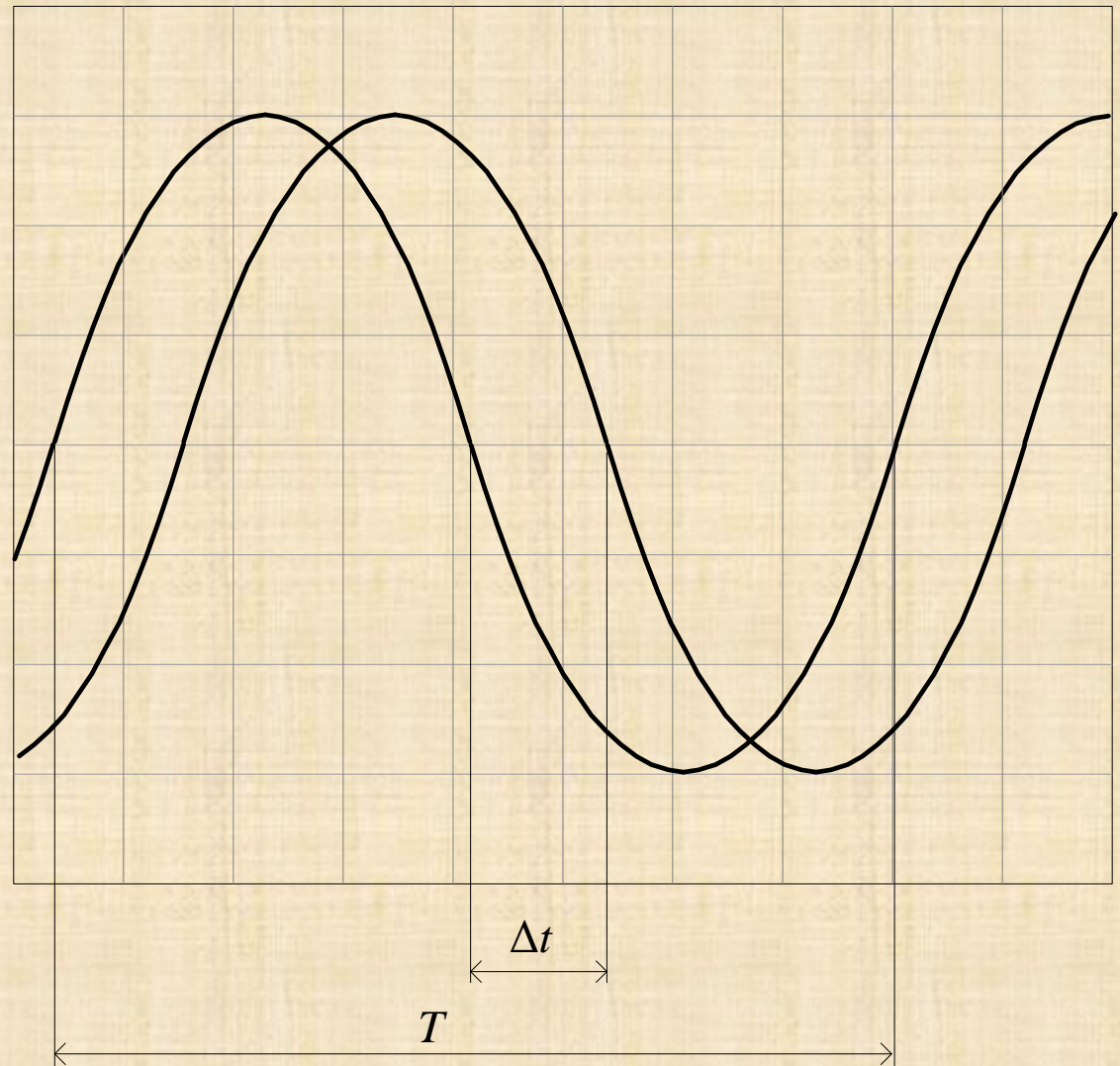
Для гармонических сигналов одинаковой частоты ω фазовый сдвиг

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

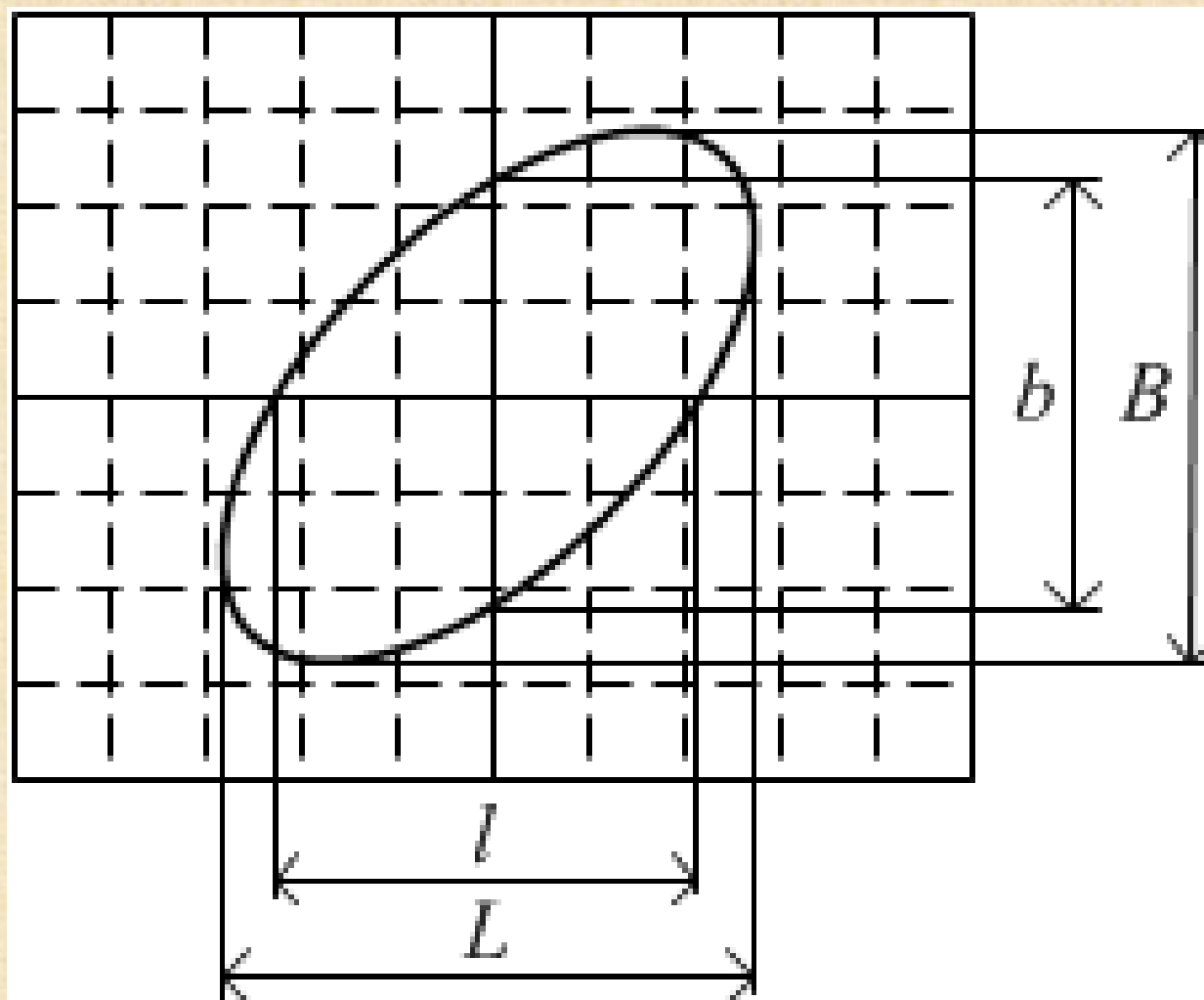
Осциллографические методы

Метод *линейной развертки*

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



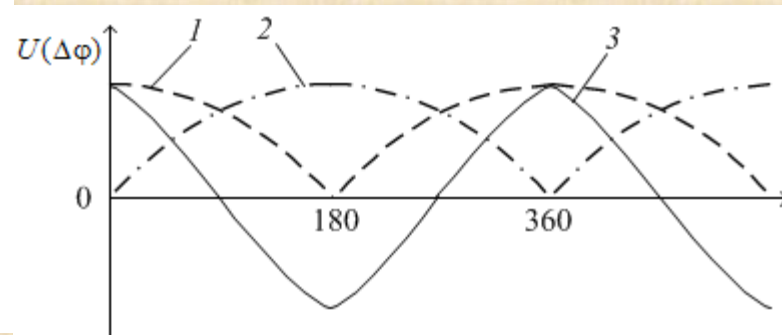
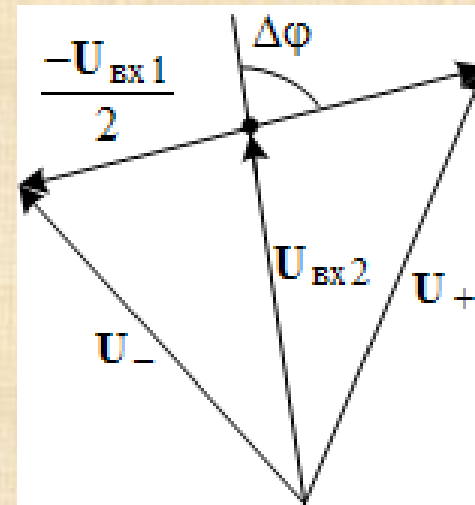
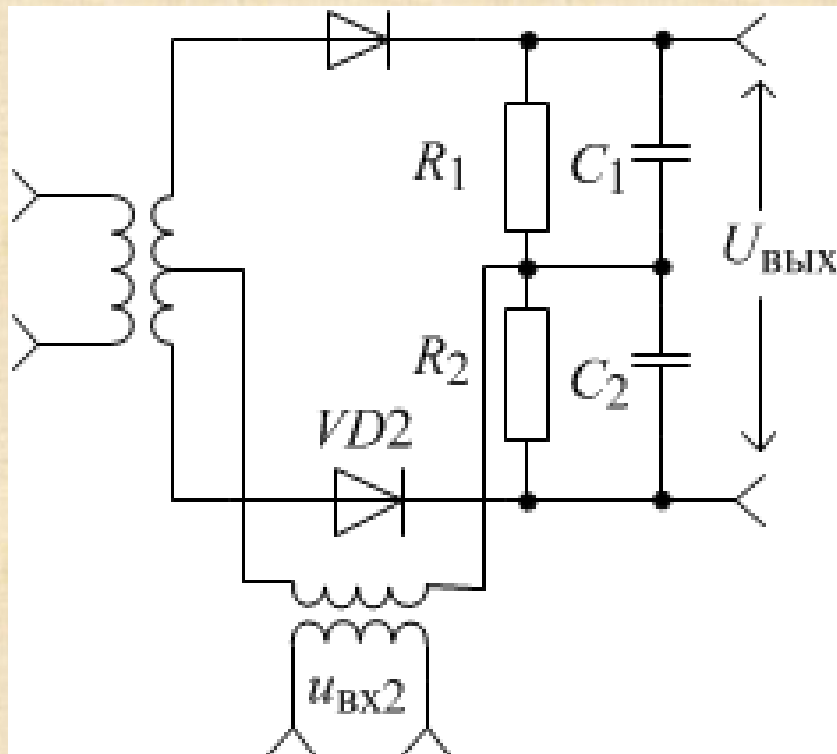
Метод эллипса



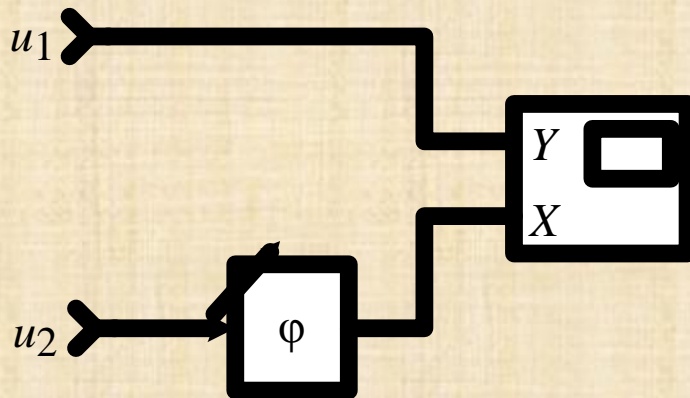
$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{Y(t_0)}{D}\right) = \arcsin\left(\frac{b}{B}\right) = \arcsin\left(\frac{l}{L}\right)$$

Измерение разности фаз фазовыми детекторами

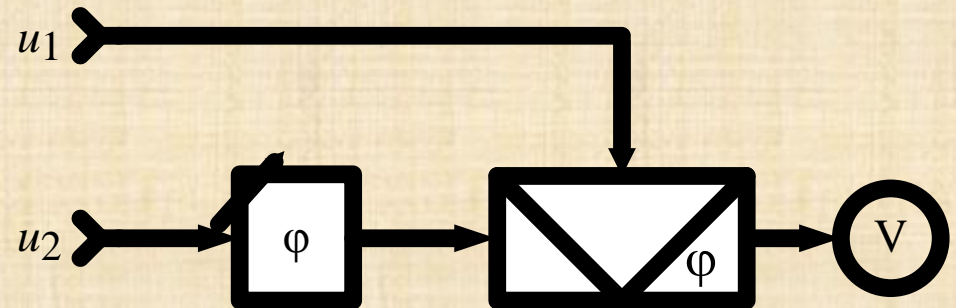
Фазовый детектор (ФД) преобразует измеряемый фазовый сдвиг в напряжение, функционально связанное с измеряемой величиной



Компенсационный метод измерения фазового сдвига



a



Фазовый детектор

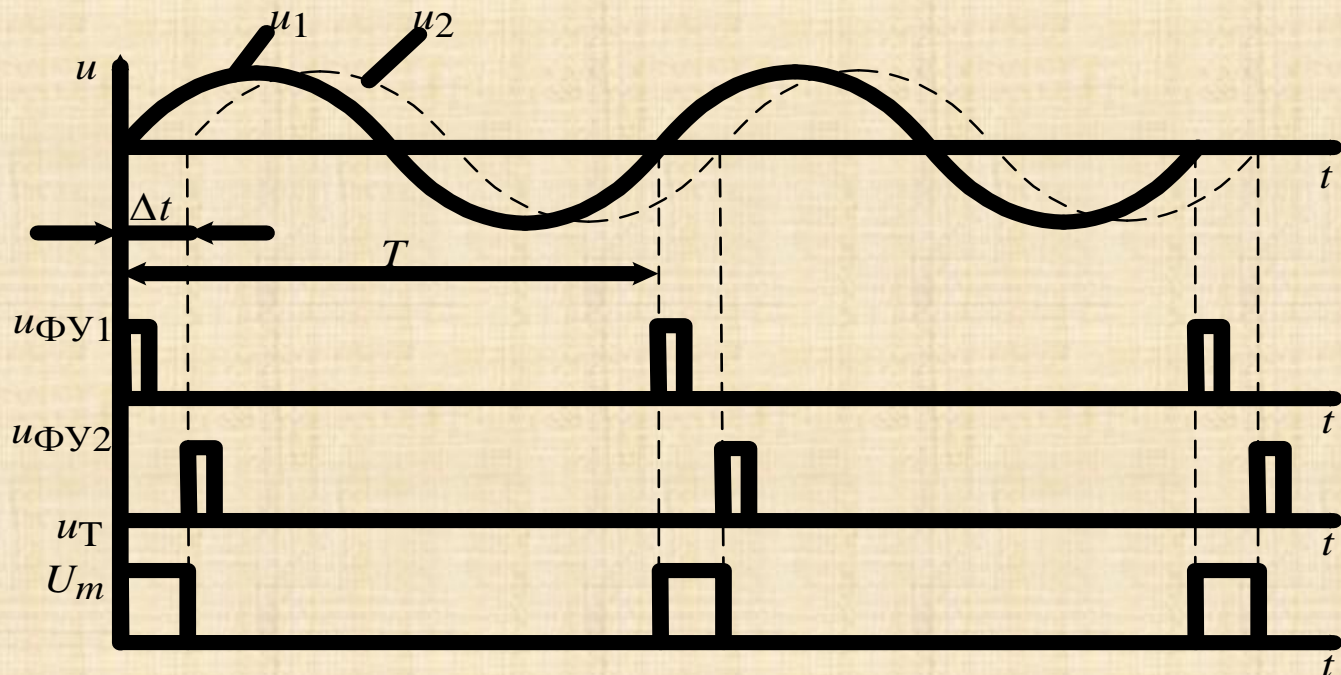
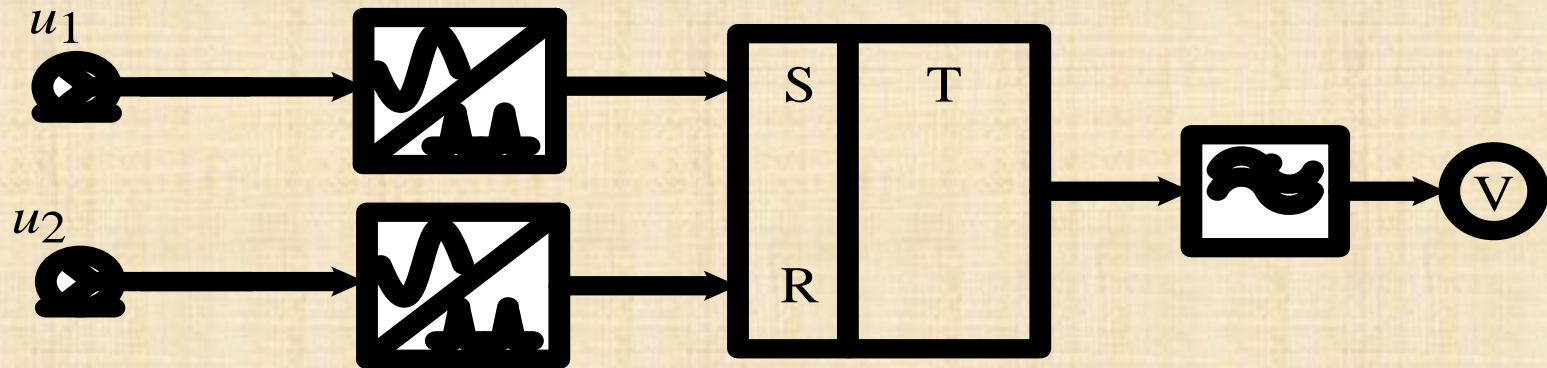
б

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

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

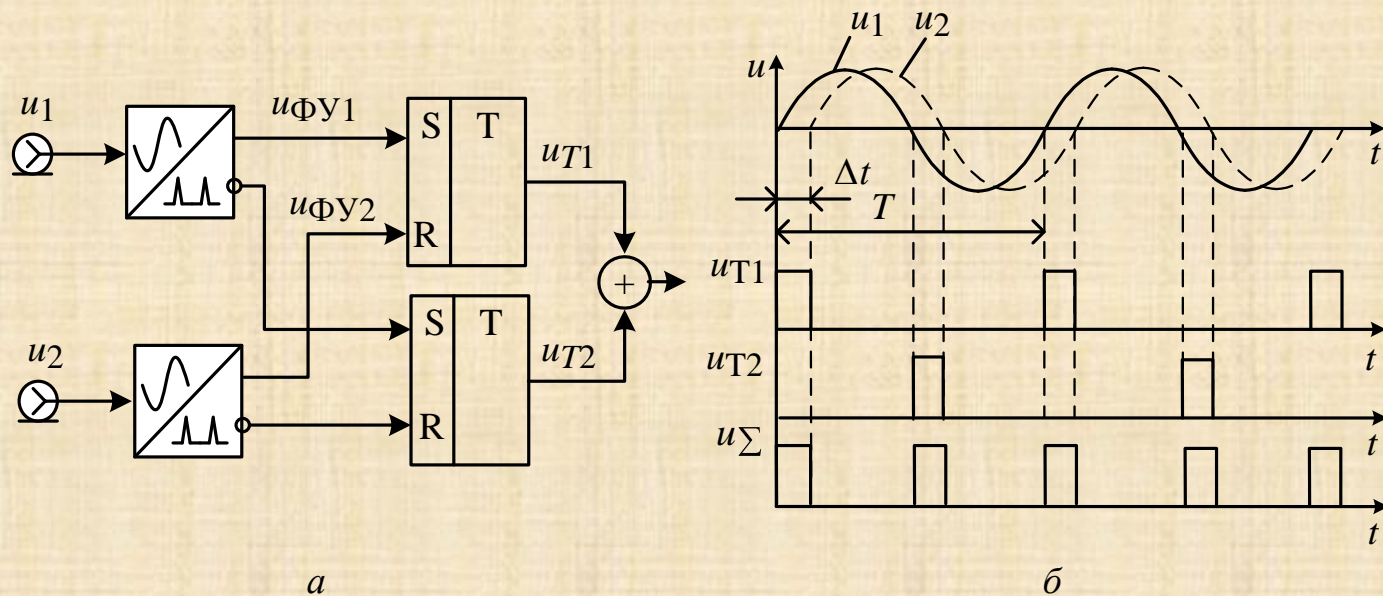
Погрешность компенсационного метода определяется погрешностью градуировки фазовращателя и от точности фиксации момента равенства фаз (чувствительности фазового индикатора). Недостатком метода является необходимость градуировки фазовращателя на каждой частоте измерения.

Метод преобразования фазового сдвига в напряжение

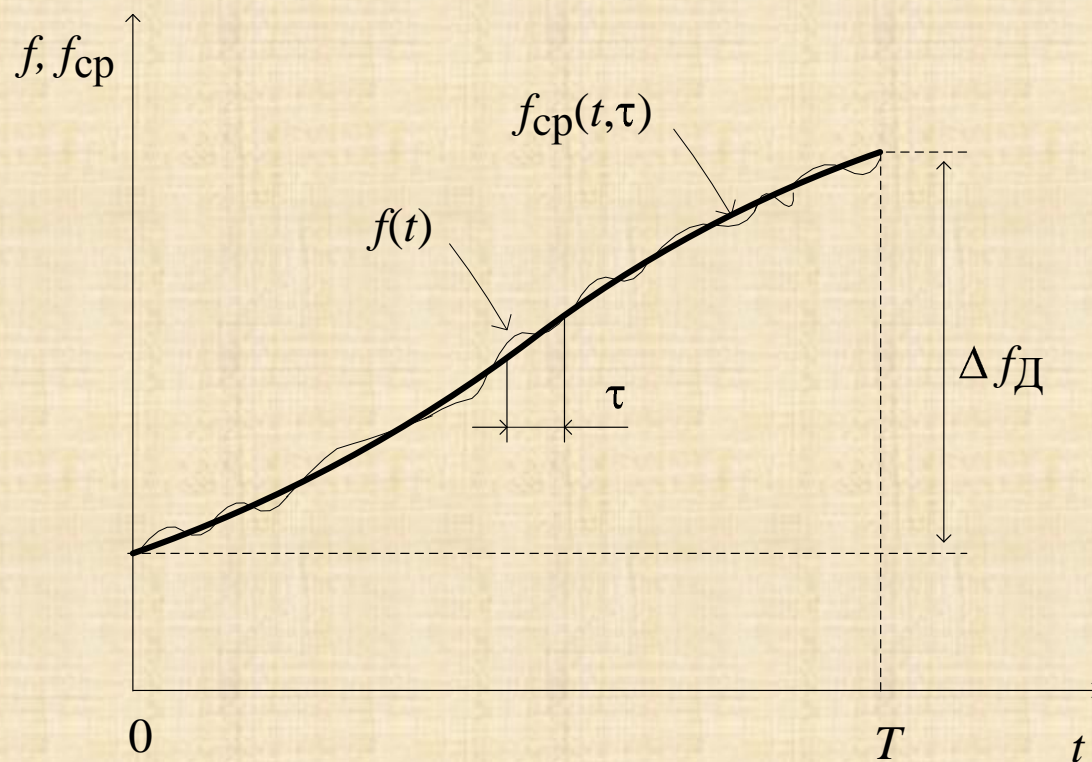


Для построения аналоговых фазометров используют преобразование фазового сдвига в импульсы с длительностью, пропорциональной измеряемой величине и постоянной амплитудой U_m . Измеряя постоянную составляющую импульсов, получаем показания, пропорциональные фазовому сдвигу

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



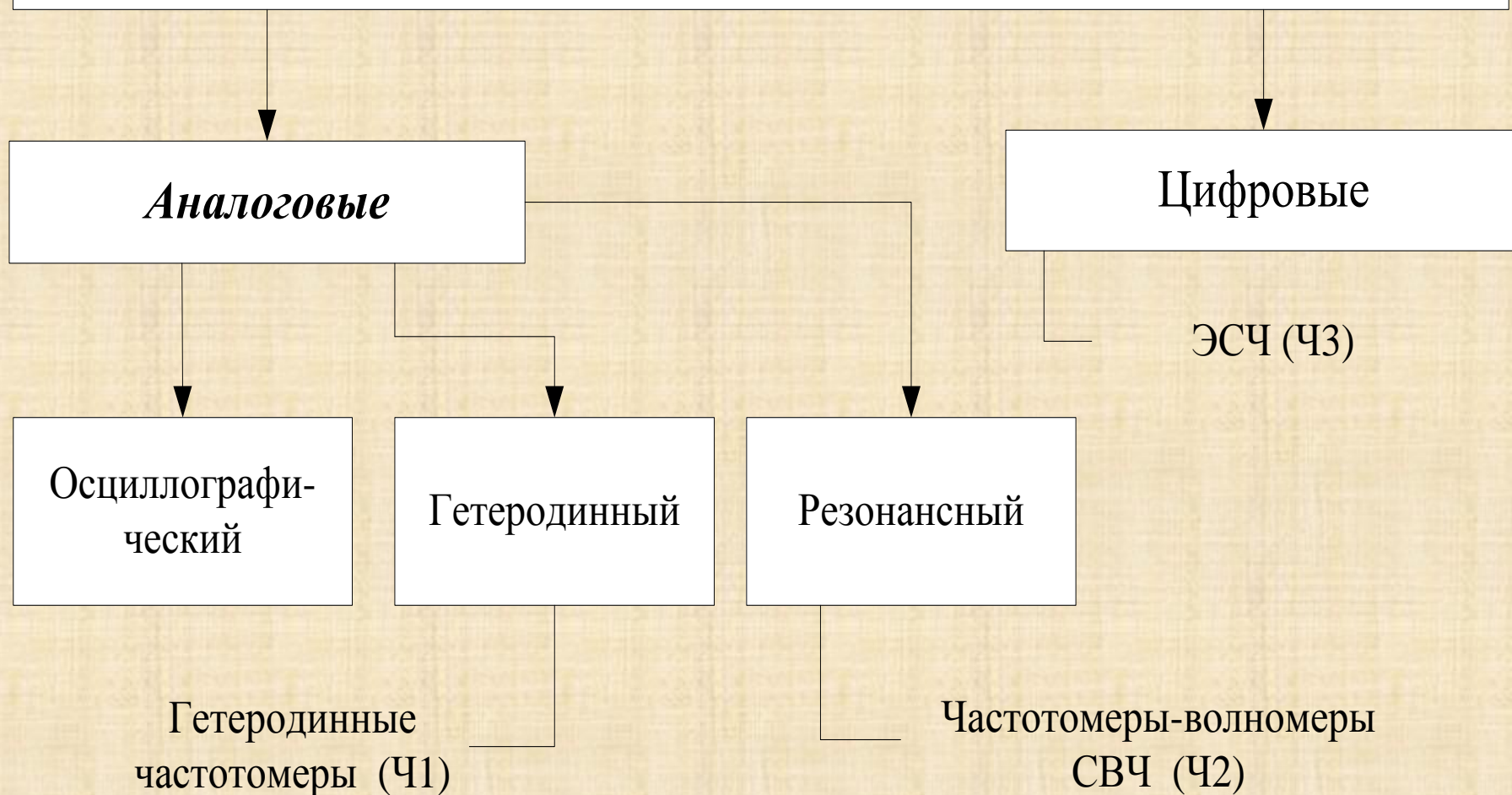
Классификация методов и средств измерения частоты





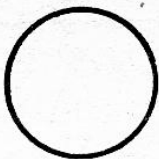


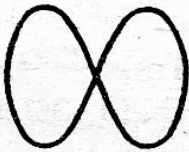
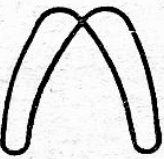

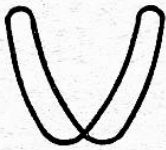
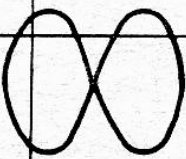

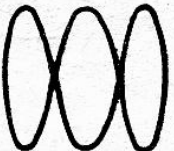

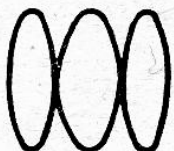

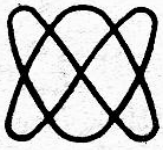

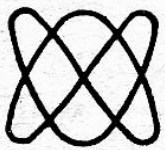

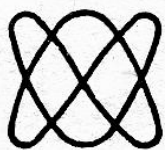
Мгновенная частота
радиосигнала

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = f + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

Методы измерения частоты радиосигналов

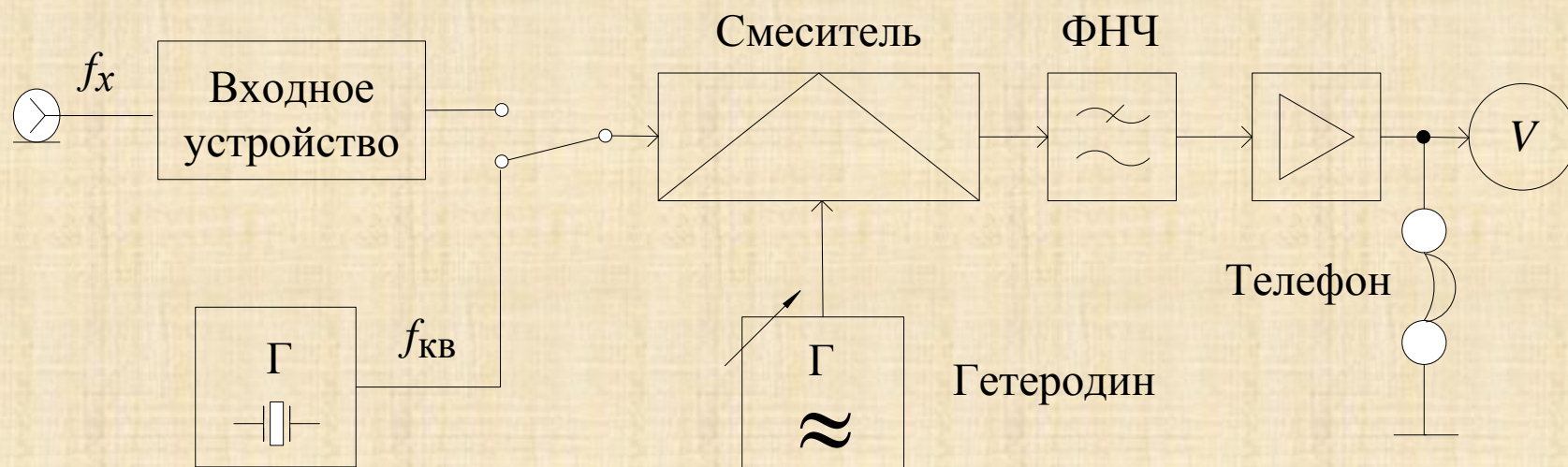


Осциллографический метод сравнения частот (метод фигур Лиссажу).

f_X / f_Y	0°	45°	90°	135°	180°
$\frac{1}{1}$					
$\frac{1}{2}$					
$\frac{1}{3}$					
$\frac{2}{3}$					

Фигуры Лиссажу при подаче на вход Y и X гармонических сигналов неизвестной и образцовой частот

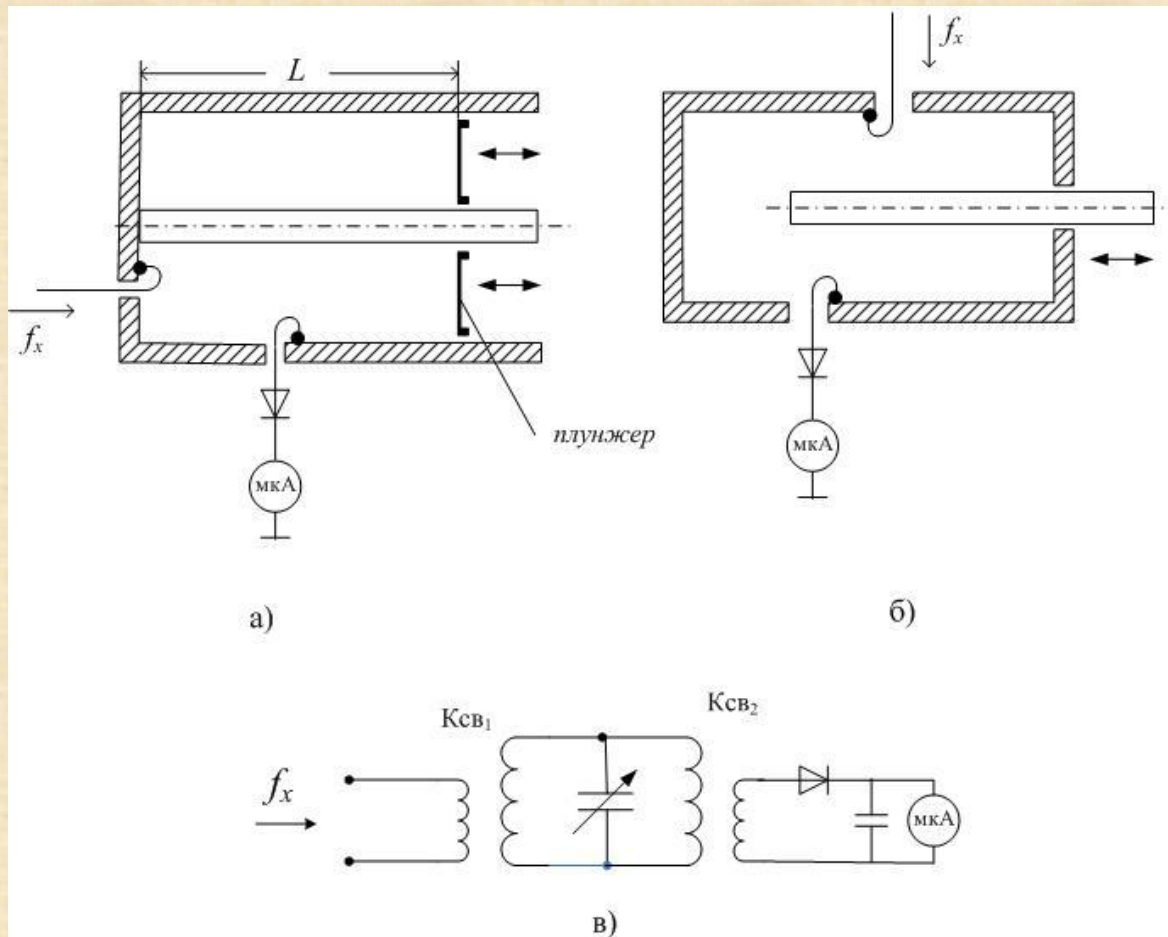
Гетеродинный метод сравнения частот



Гетеродинный частотомер.

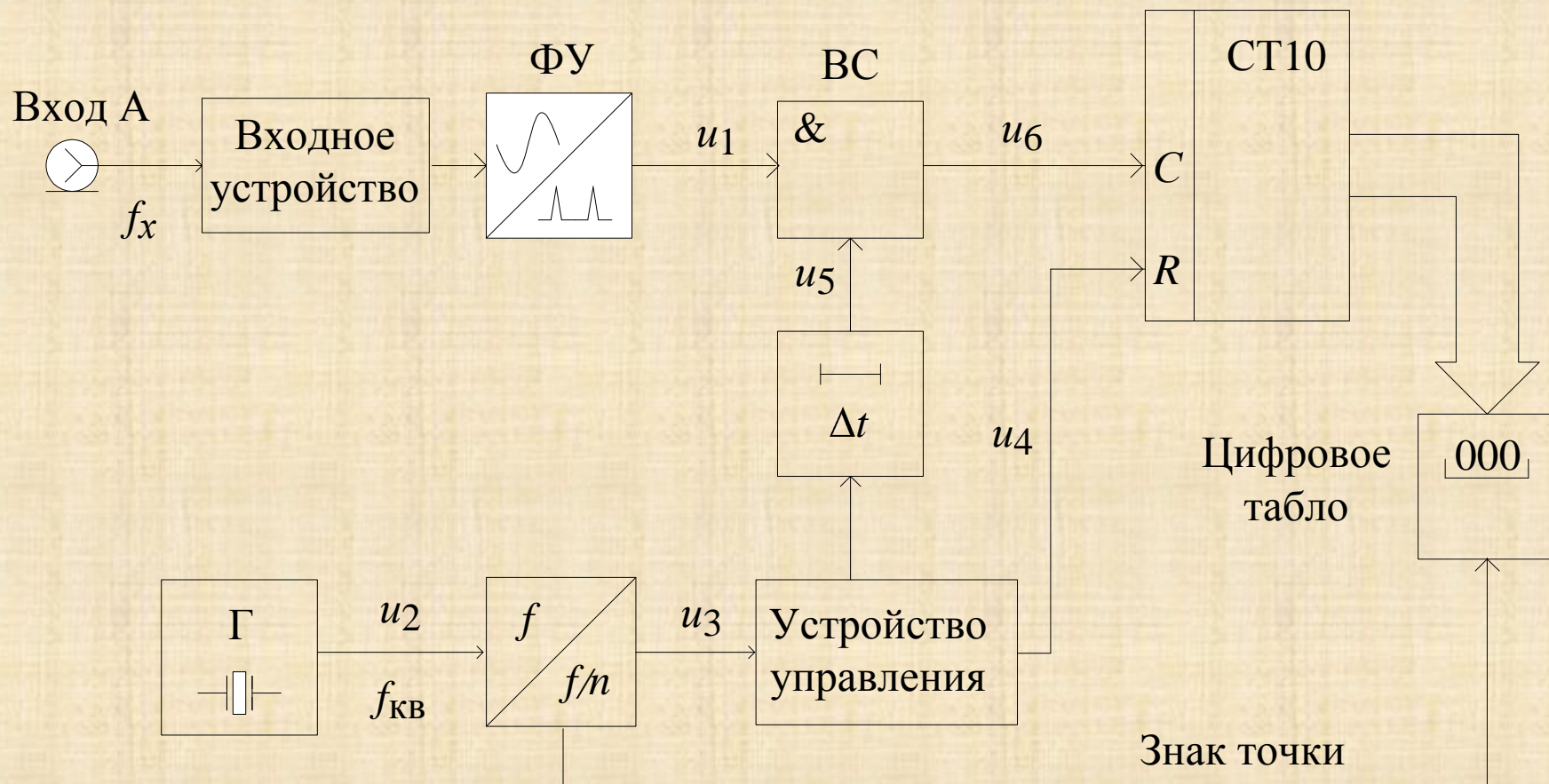
Перестройкой образцовой частоты добиваются равенства ее с измеряемой. Фиксация этого момента ведется по сигналу нулевых биений, который выводят на магнито-электрический прибор и электромагнитный телефон. Погрешность определяется точностью калибровки гетеродина порядка $10^{-3} \dots 10^{-5}$).

Резонансный метод измерения частоты



Коаксиальные резонансные частотомеры:
а- полуволновый; б – четвертьволновый;
в - проходная схема частотомера

ЭСЧ в режиме измерения частоты методом прямого счета (direct counting).



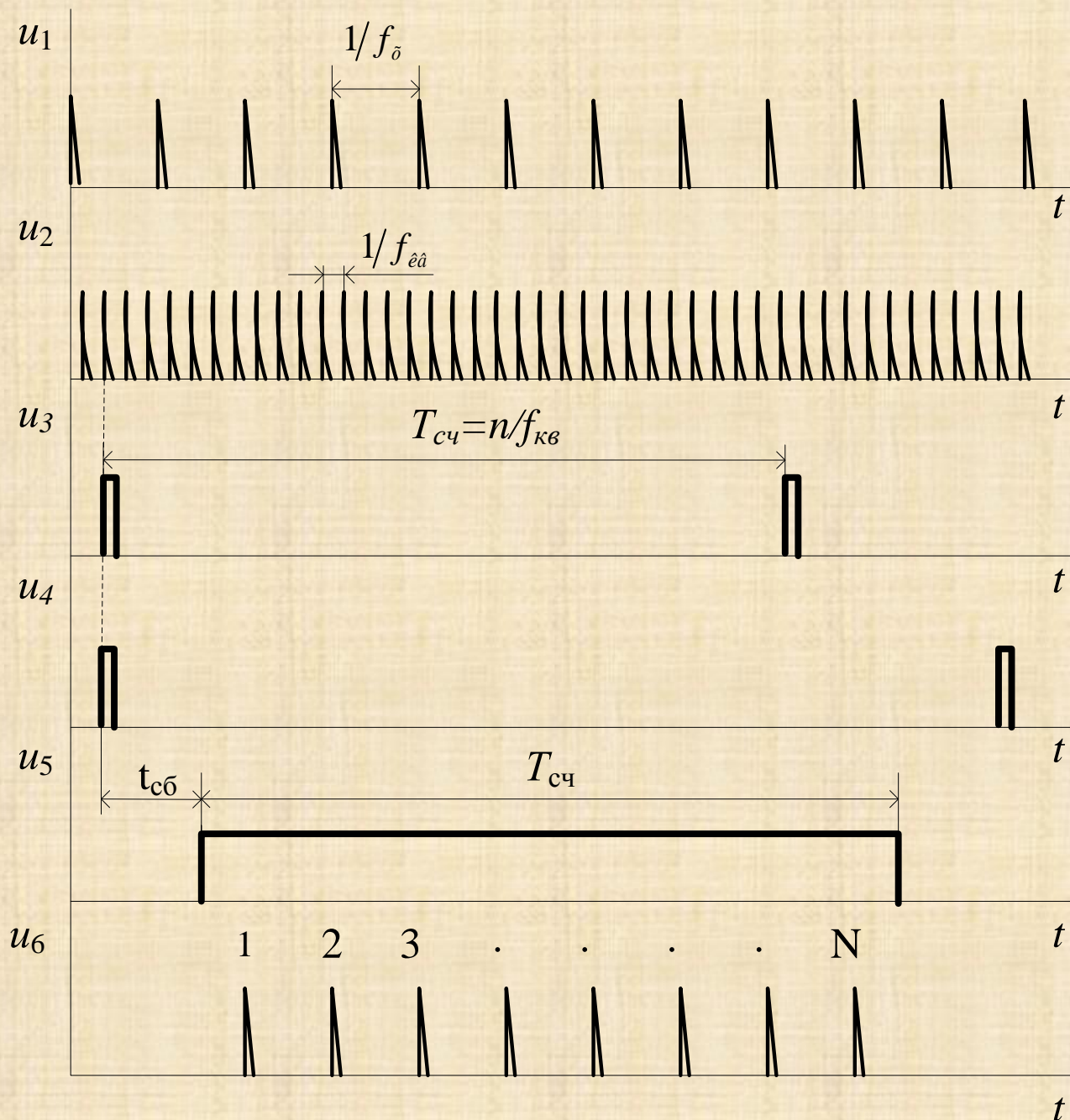
Временные
диаграммы
ЭСЧ при
измерении
частоты

$$T_{\text{сч}} = nT_{\text{кв}} = T_{\text{кв}} \cdot 10^k$$

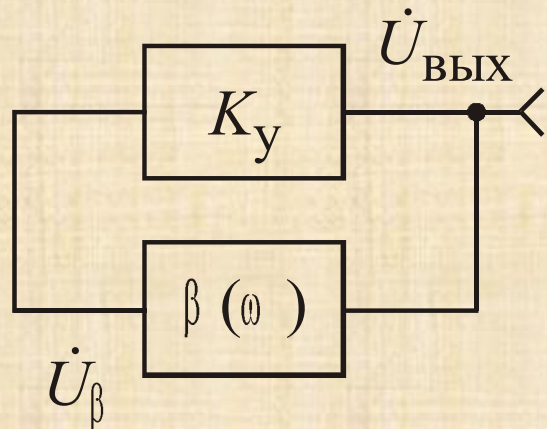
$$f_{\text{кв}} = 10^p, \text{ Гц}$$

$$N = \text{int}[f_x \cdot T_{\text{сч}}] \pm 1$$

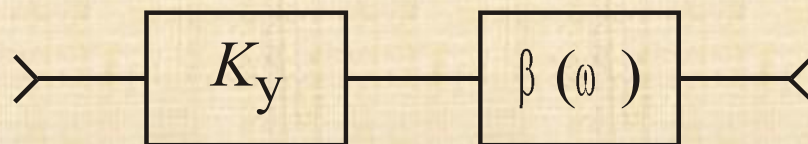
$$f_x \approx 10^{(p-k)} N, \text{ Гц}$$



Измерительные генераторы



а



б

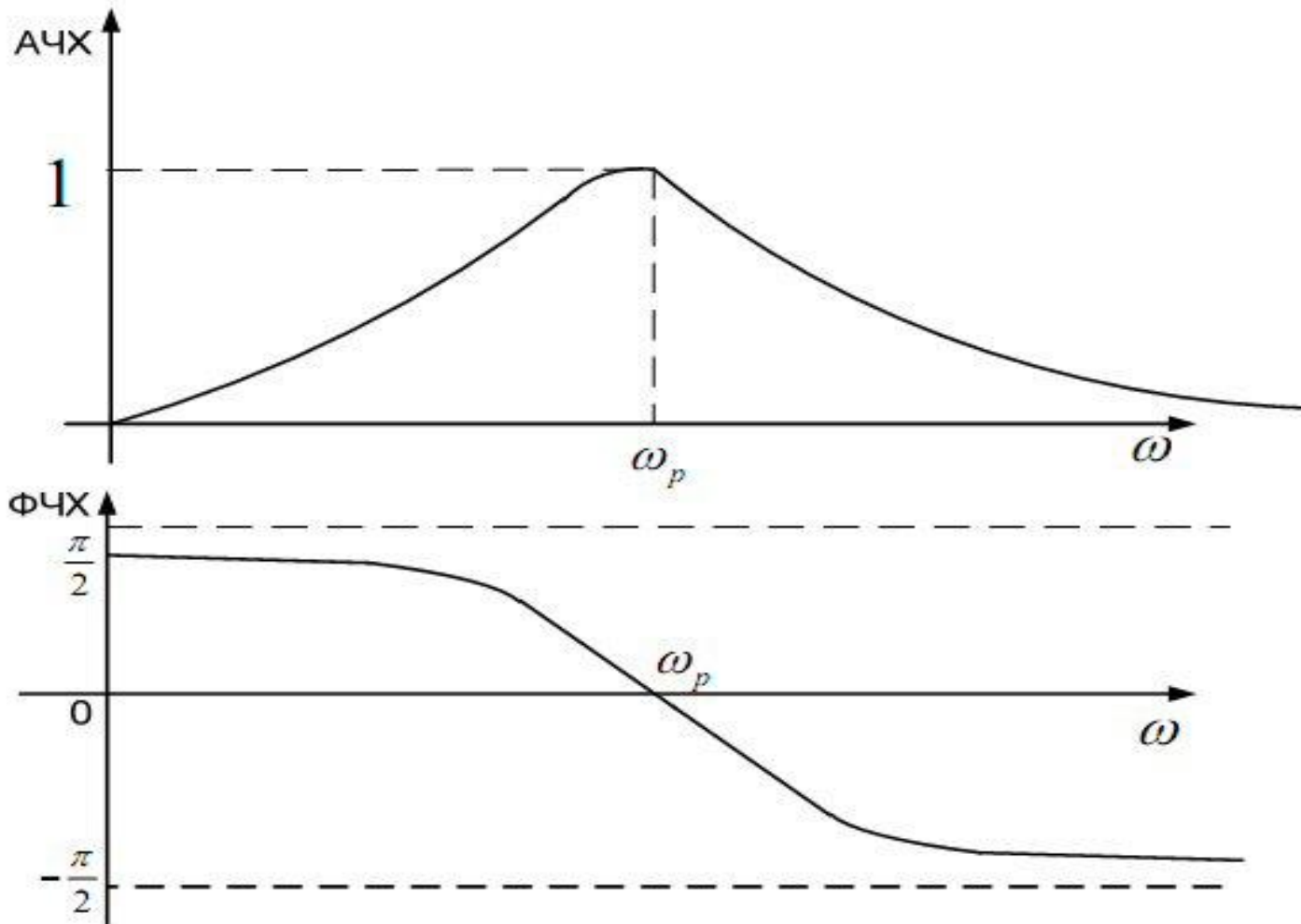
Возможность генерации в системе с ПОС определяется двумя условиями - балансом фаз и балансом амплитуд в разомкнутой системе рис.б.

$$K_y \cdot K_\beta = 1$$

Баланс амплитуд: на частоте генерации произведение модулей коэффициентов передачи усилителя K_y и цепи обратной связи β должно быть равно единице .

Баланс фаз означает, что суммарный фазовый набег в усилителе и цепи ОС кратен 360 градусов

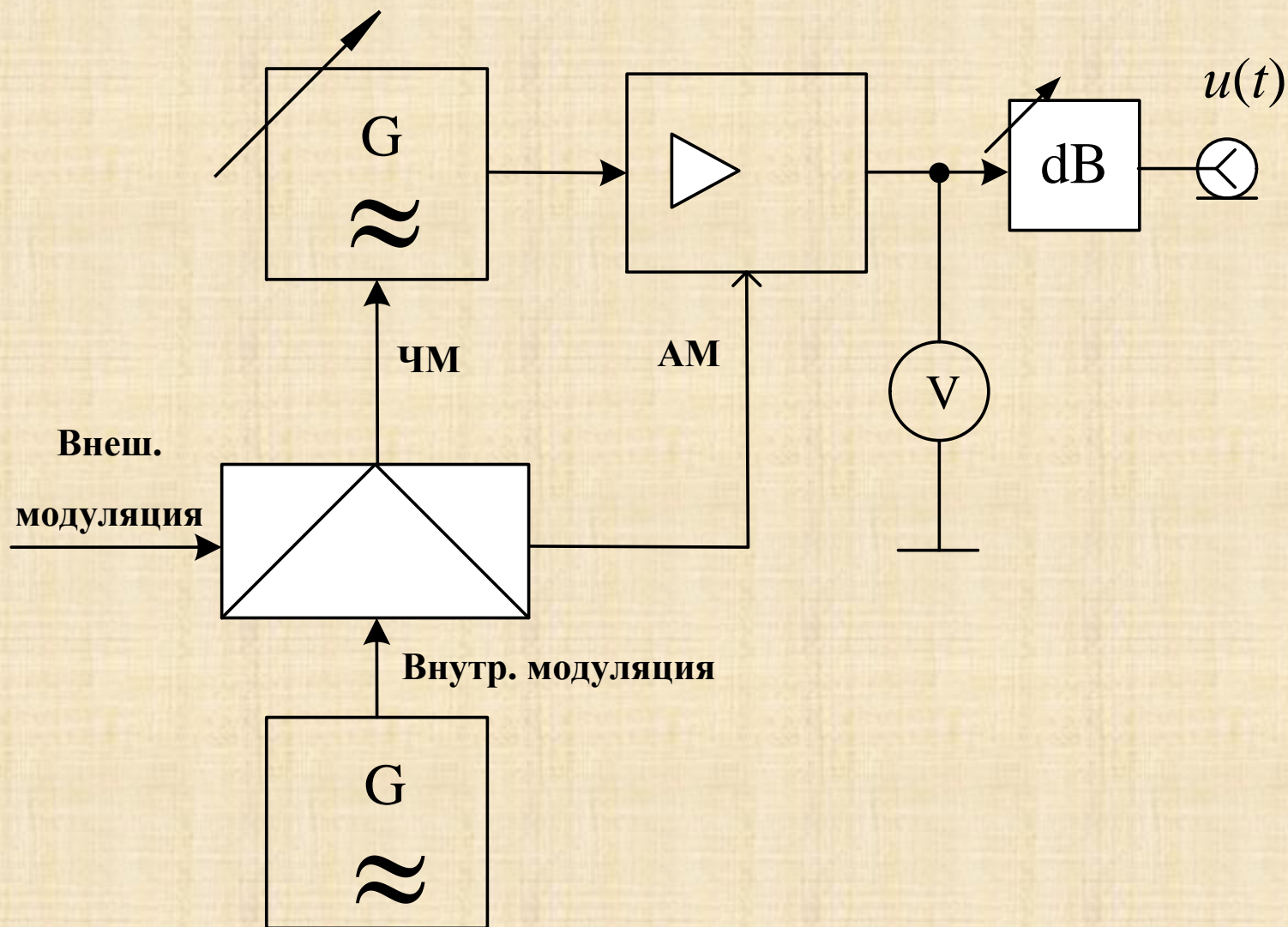
$$\phi_y + \phi_\beta = 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

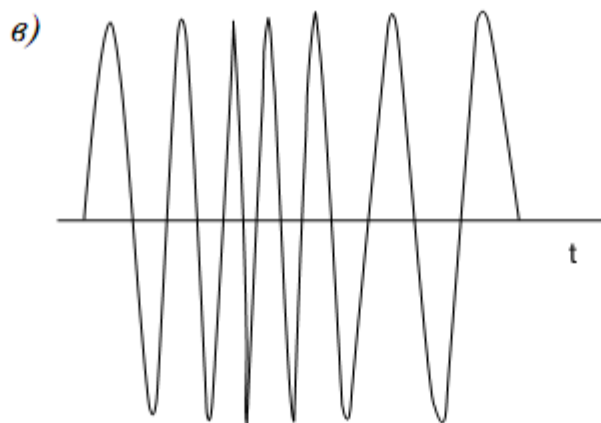
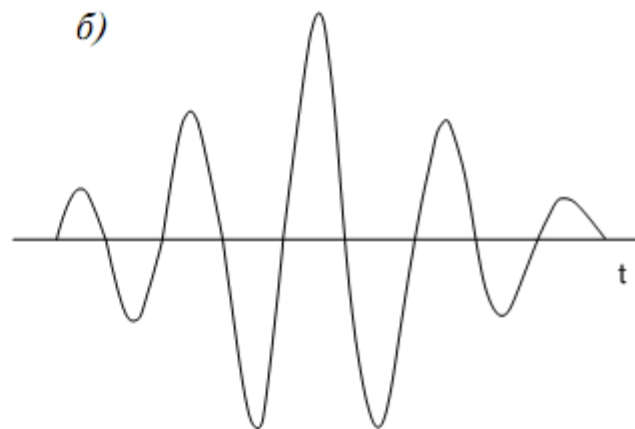
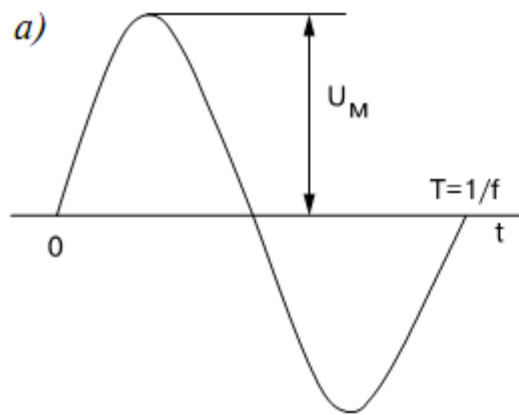


Характеристики цепи обратной связи LC генератора с резонансным контуром.

Для повышения стабильности частоты требуются контура с крутой ФЧХ, а, следовательно, с высокой добротностью

Структурная схема аналогового ВЧ генератора гармонических сигналов





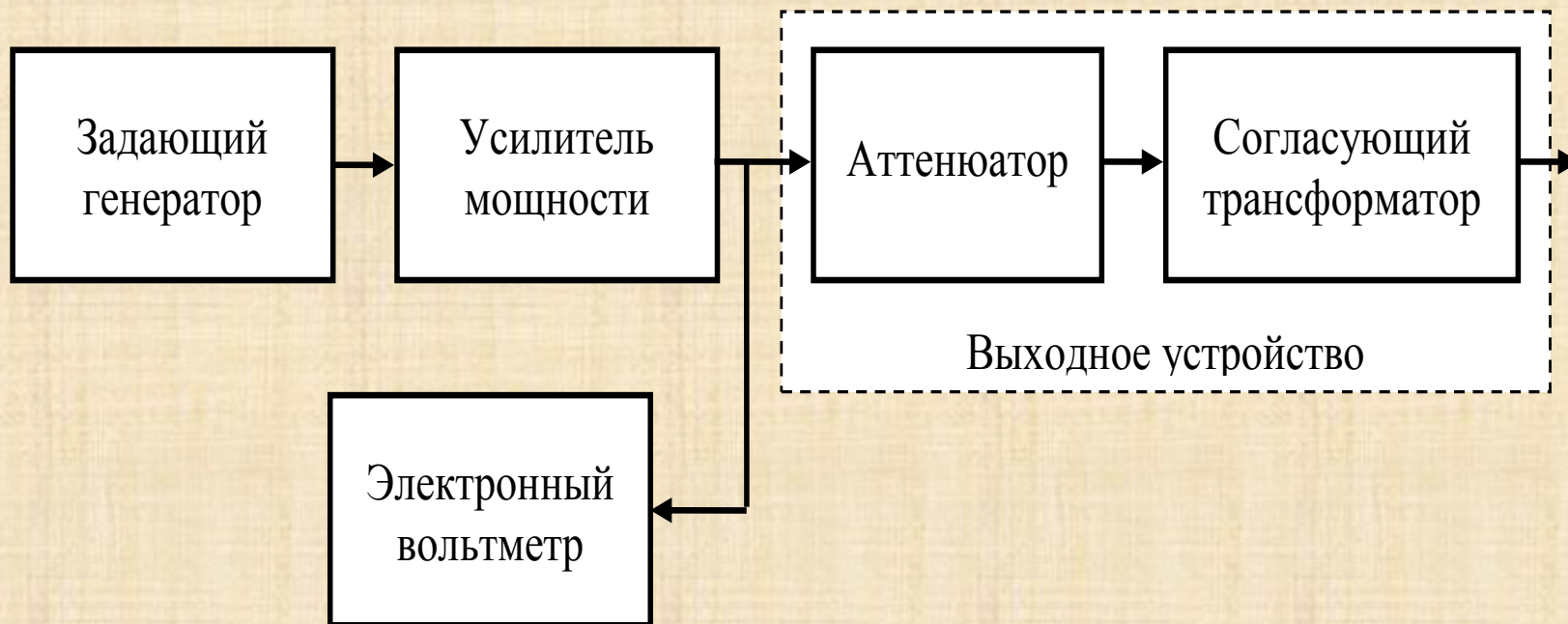
Формы сигналов, вырабатываемых генераторами ВЧ:

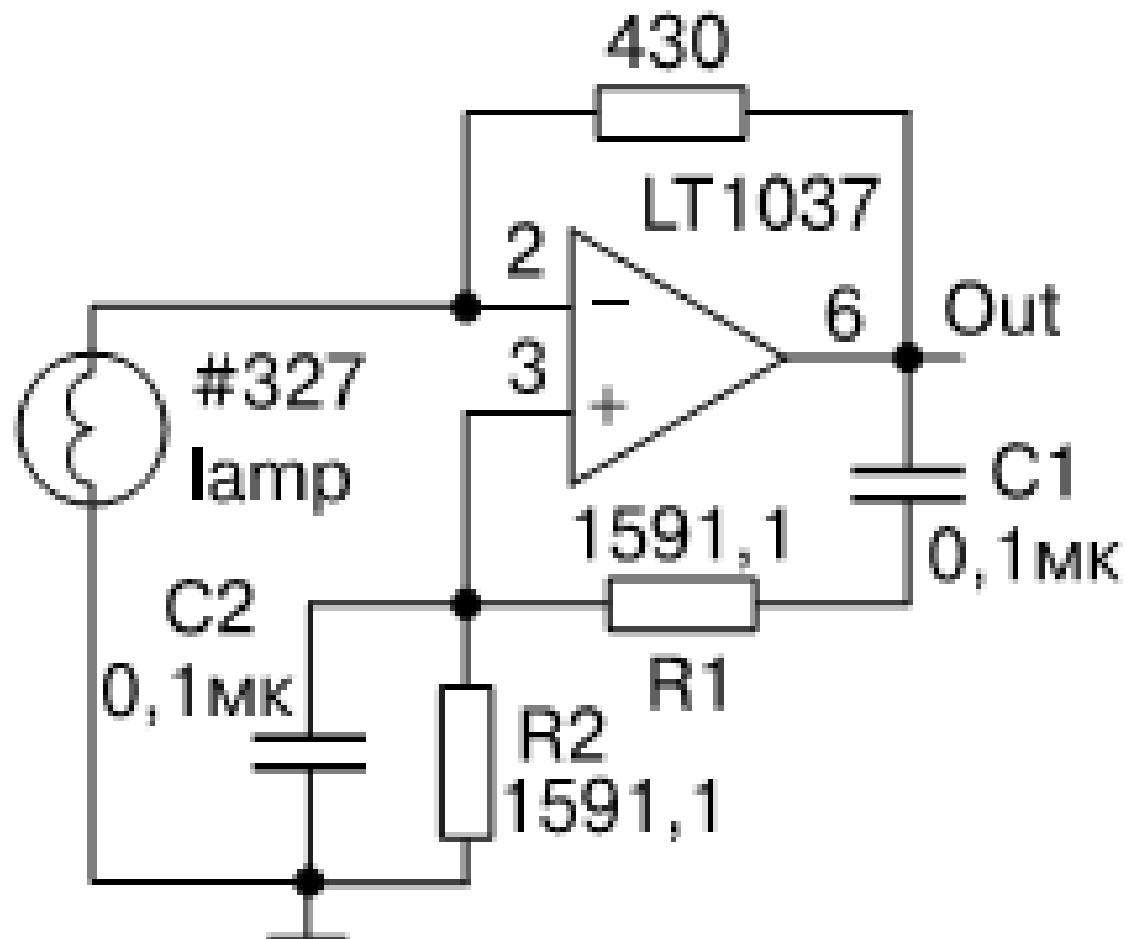
- а- непрерывная генерация (НГ);
- б – амплитудная модуляция (АМ):
- в – частотная модуляция (ЧМ).



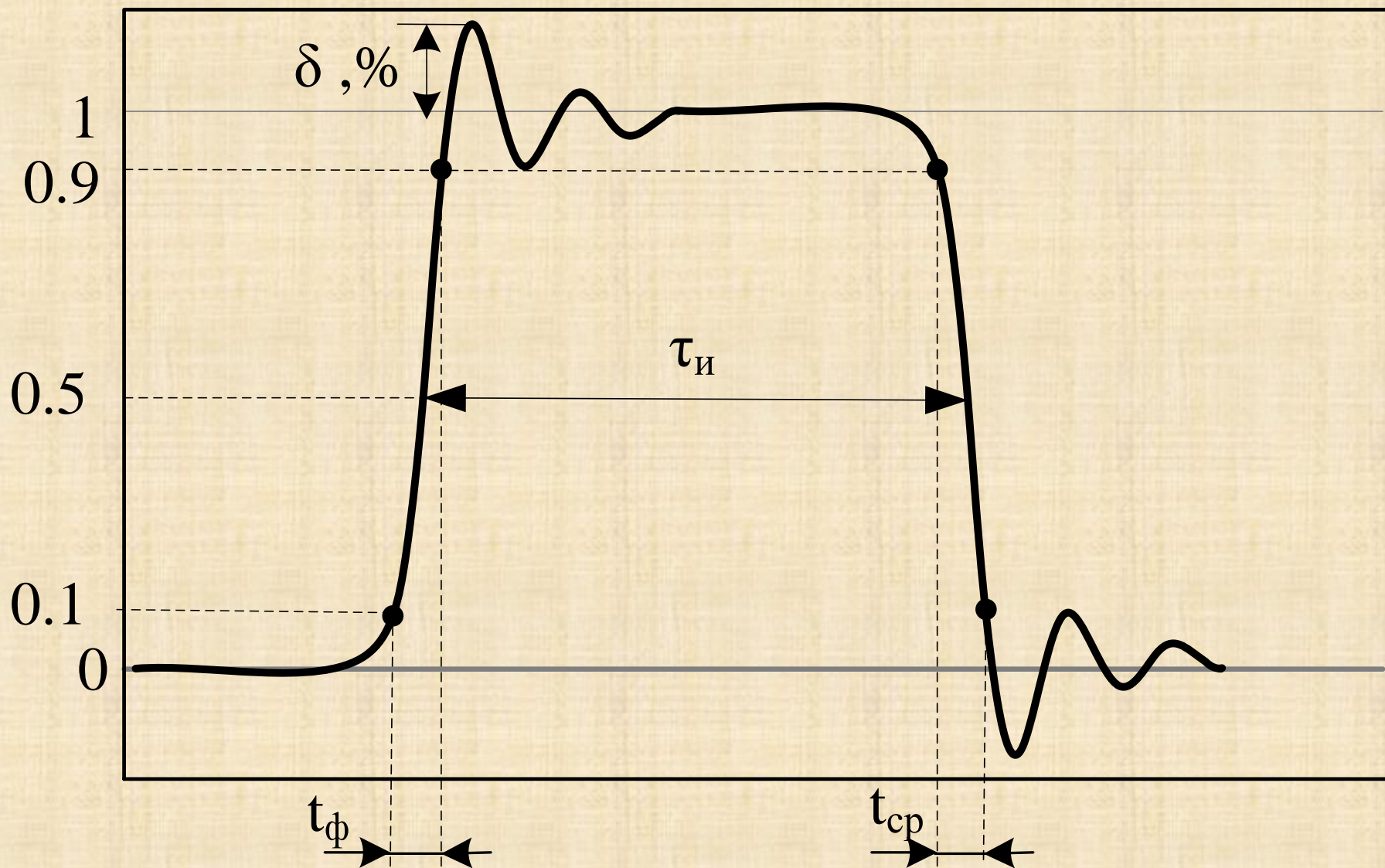


Структурная схема аналогового НЧ RC-генератора



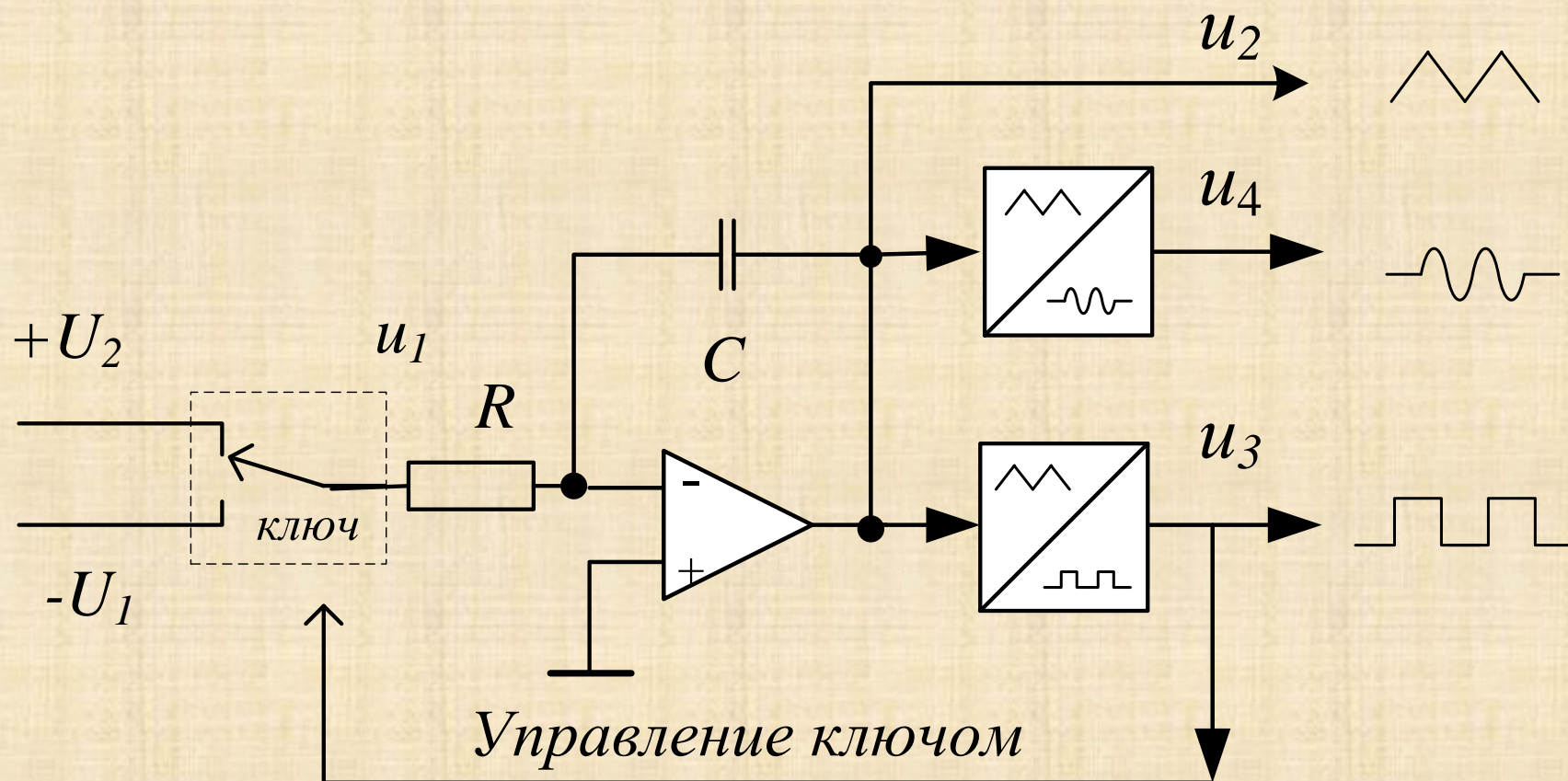


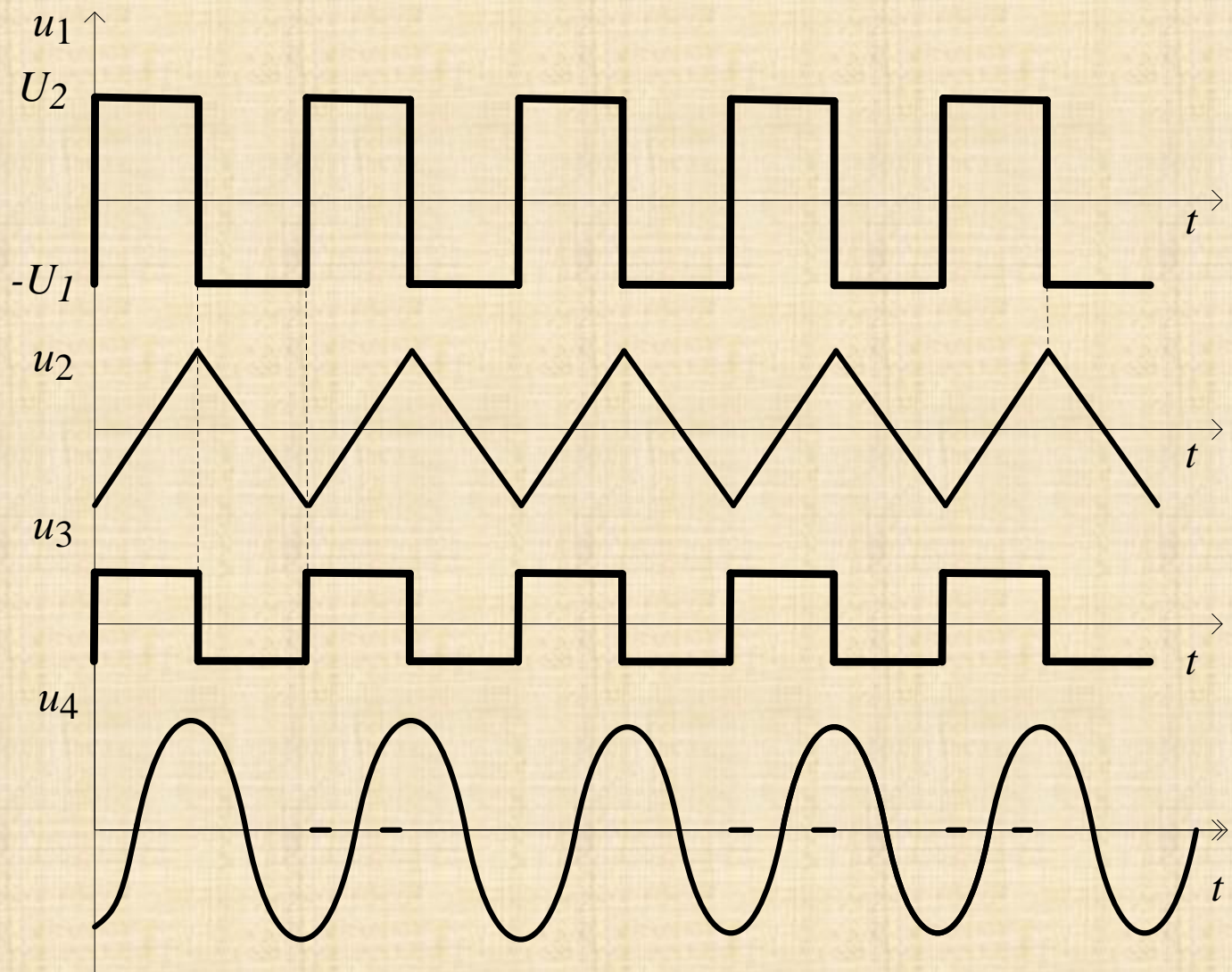
Типичная схема RC-генератора на операционном усилителе



Вид реального импульса прямоугольной формы

Структурная схема функционального генератора





Диаграммы напряжений функционального генератора



Генератор сигналов
специальной формы
Г6-37



Внешний вид функционального генератора Г6-43

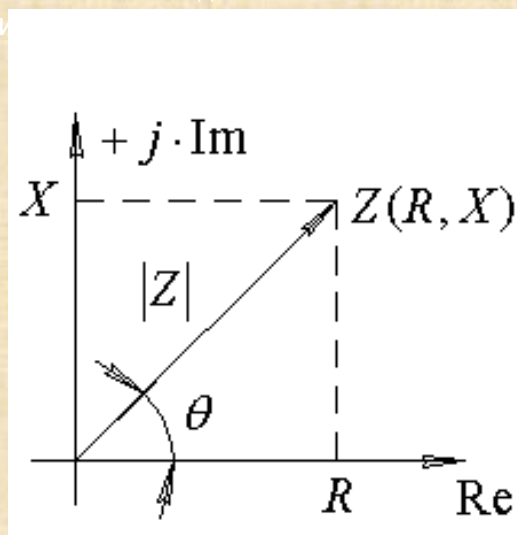


Функциональный генератор FG3CE с встроенным цифровым частотомером

Классификация методов и средств измерения параметров двухполюсников

При работе схемы с гармоническими сигналами свойства двухполюсников описывают с помощью полного комплексного сопротивления (импеданса) Z или проводимости (адмиттанса) Y

Рис. 1. Векторная диаграмма полного импеданса
Векторная диаграмма и



$$Z = R + jX = |Z| \cdot \exp(\theta);$$

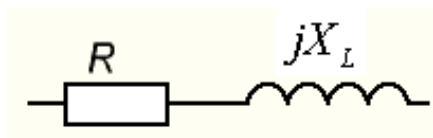
$$\begin{cases} R = |Z| \cdot \cos(\theta); \\ X = |Z| \cdot \sin(\theta); \end{cases}$$

$$\begin{cases} |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}; \\ \theta = \arctan \left[\frac{X}{R} \right]; \end{cases}$$

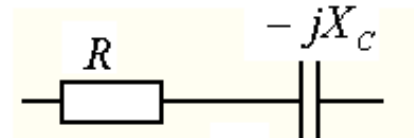
ми, а также модулем и

Векторная диаграмма полного импеданса

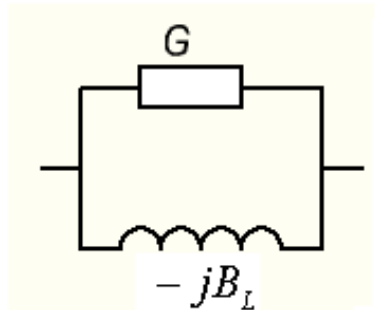
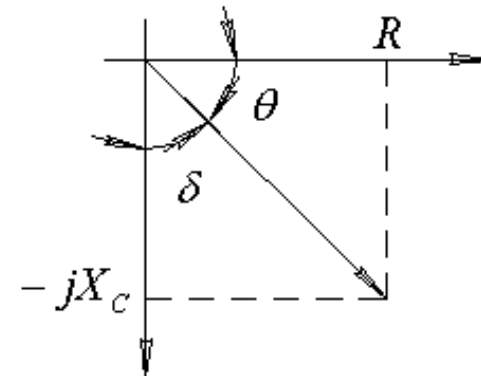
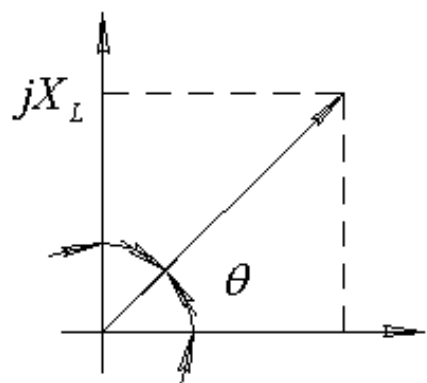
В измерительной практике используют общий термин «иммитанс» для понятий "импеданс" (сопротивление) и "адмиттанс" (проводимость), а приборы называют «измерители иммитанса» или **LCR-метры**.



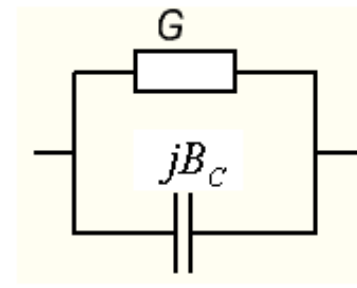
a



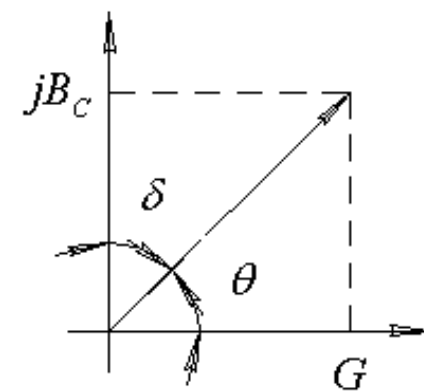
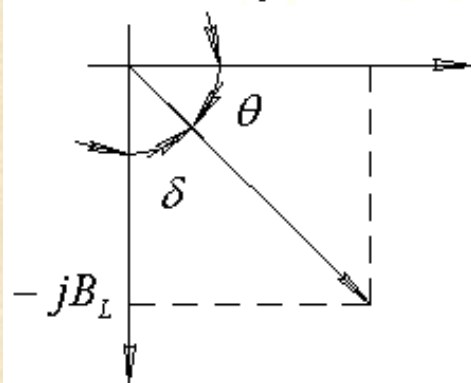
б



в



г



Соотношение
между импедансом
и адмиттансом
индуктивного (а,б) и
емкостного (в,г)

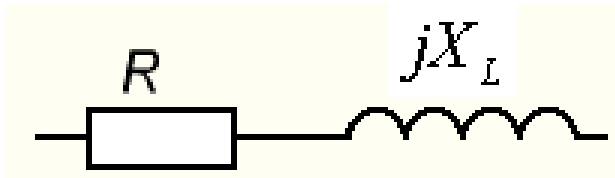
ТИПОВ

$$Z = R + jX = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

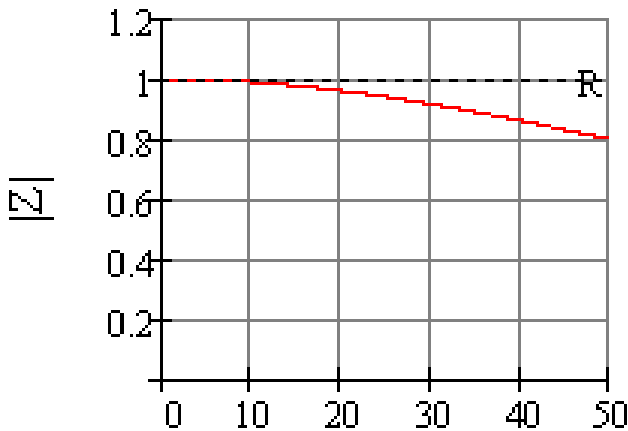
$$Y = G + jB = \frac{\dot{I}}{\dot{U}}$$

Закон Ома для
комплексных
амплитуд
напряжения и тока

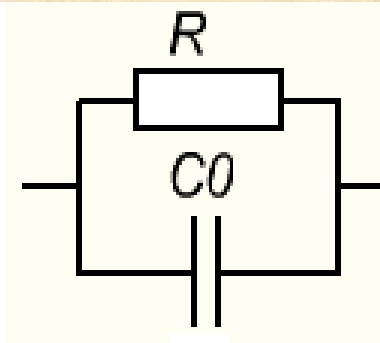
Схемы замещения активного резистора R



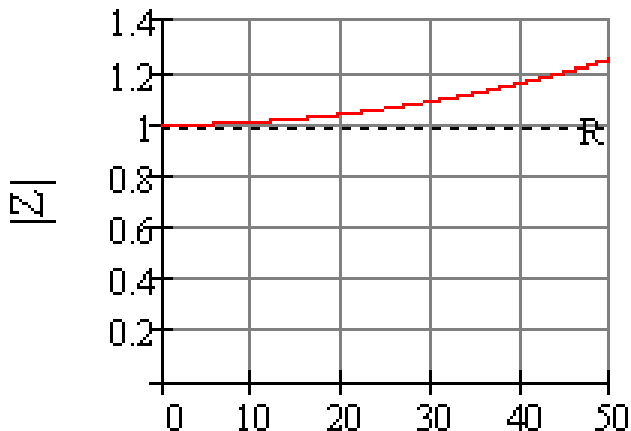
a



w



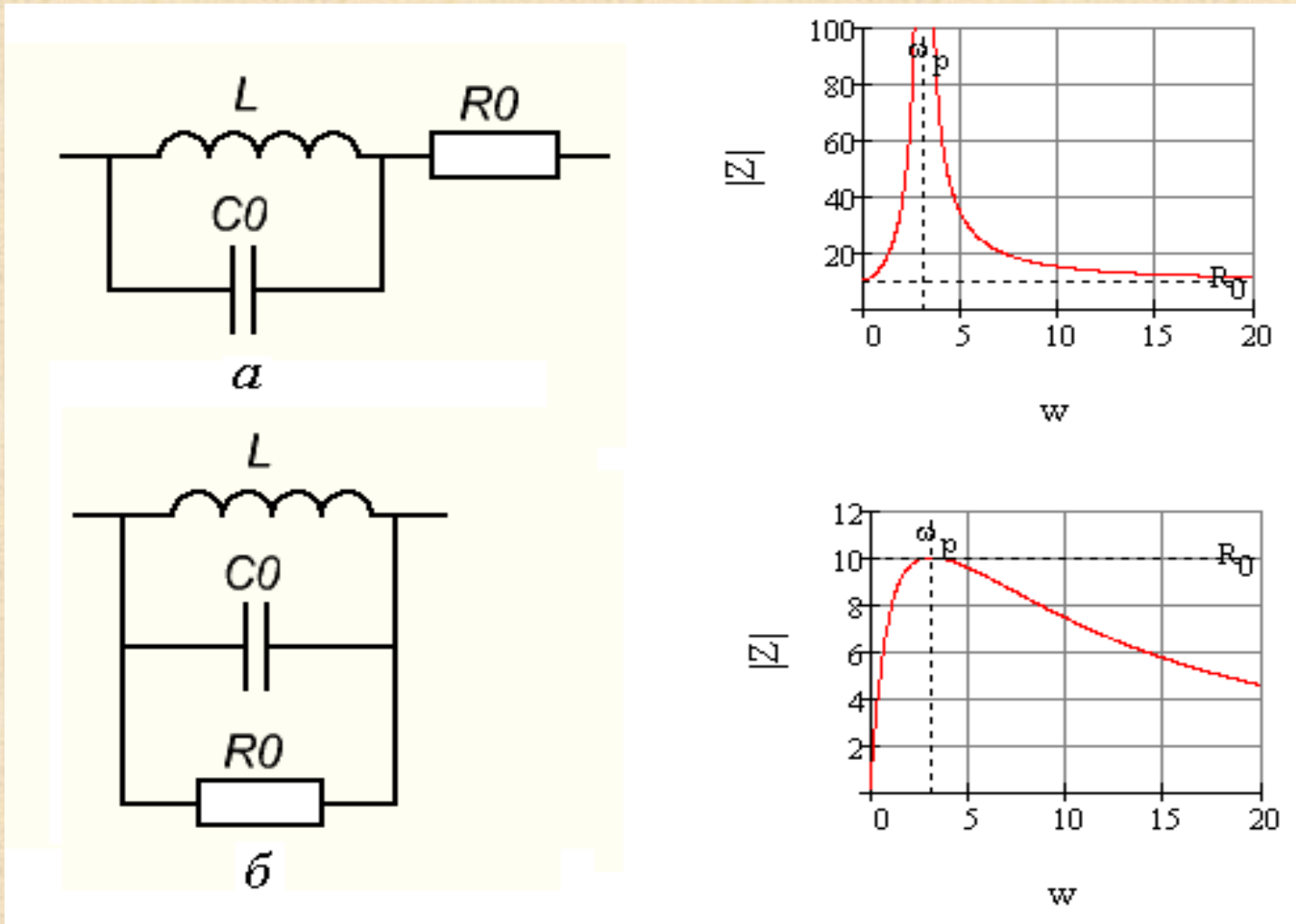
б



w

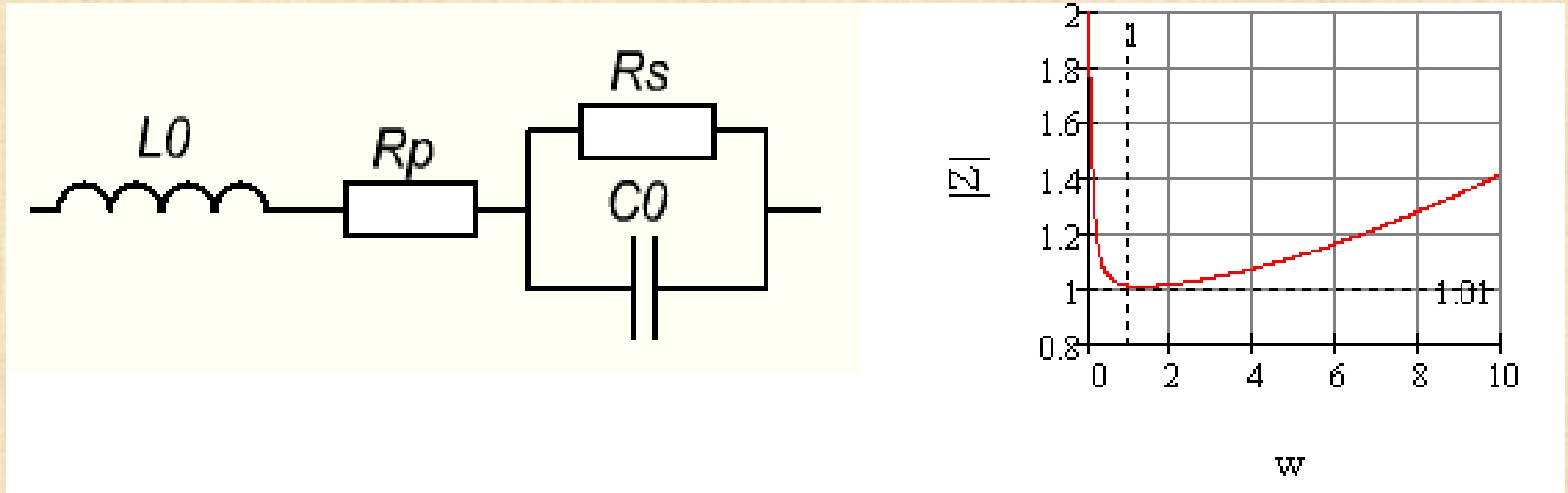
Для резистора, кроме активного сопротивления, необходимо учитывать его паразитные индуктивность и емкость

Схемы замещения катушки индуктивности (L)



Главным параметром является индуктивность L катушки, а паразитными – сопротивление R_0 для последовательной схемы замещения (а), сопротивление потерь в сердечнике R_0 для параллельной схемы (б) и межвитковая емкость катушки C_0 .

Схемы замещения конденсатора (C)

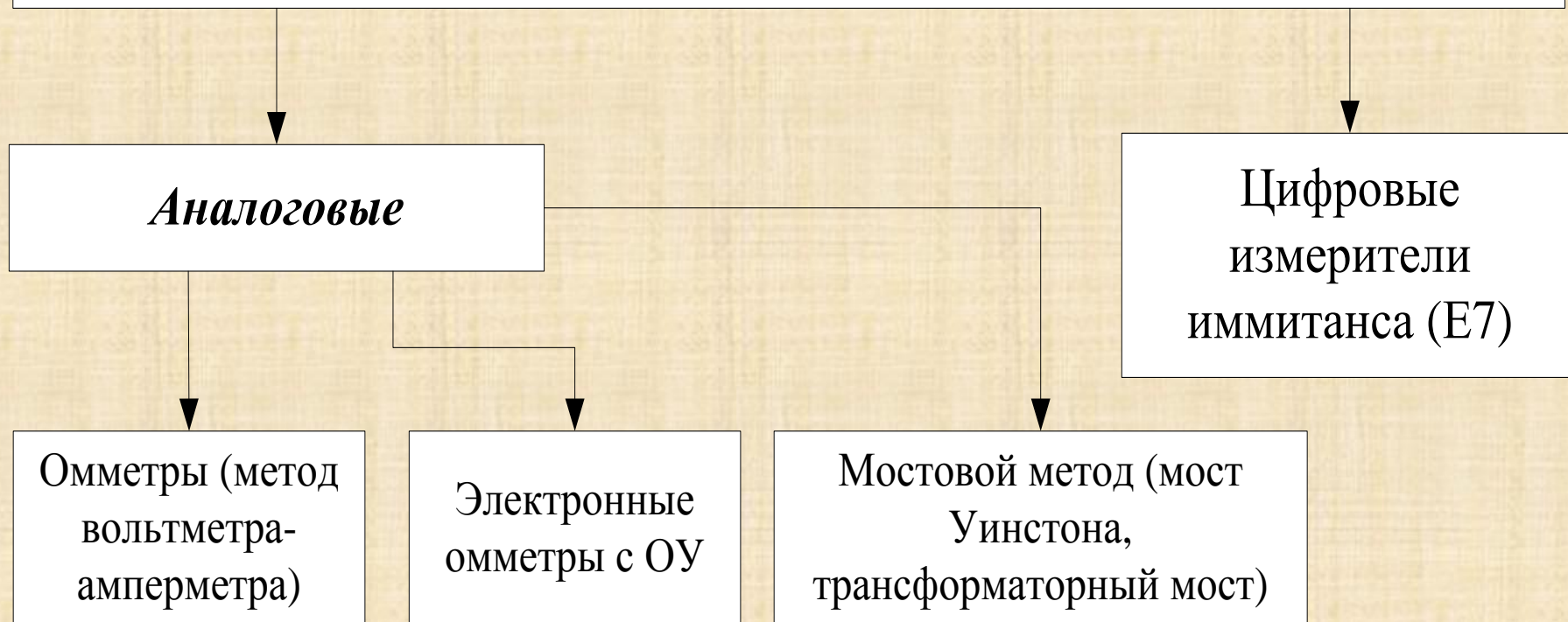


Основным параметром этих схем является емкость конденсатора $C0$, а паразитными – сопротивление утечки Rs для параллельной схемы и сопротивление потерь Rp для последовательной схемы. На высоких частотах необходимо учитывать также индуктивность выводов конденсатора $L0$.

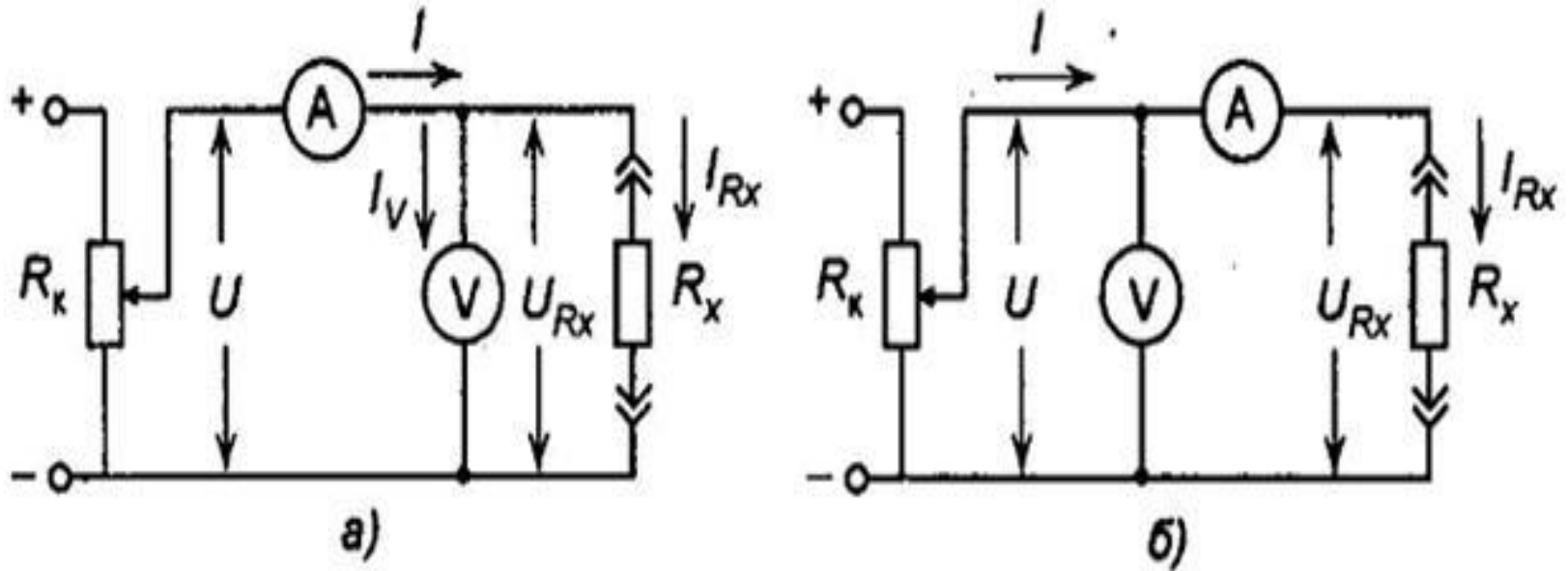
Качество конденсаторов оценивают тангенсом угла потерь (фактором потерь) D :

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{G}{B} = \frac{1}{2\pi f C R_p}$$

Методы измерения параметров RLC



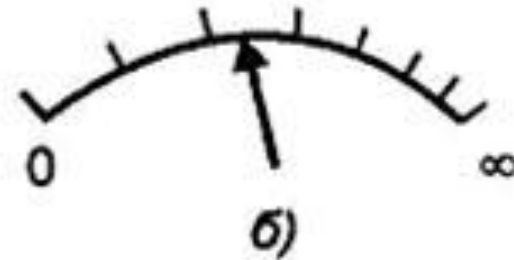
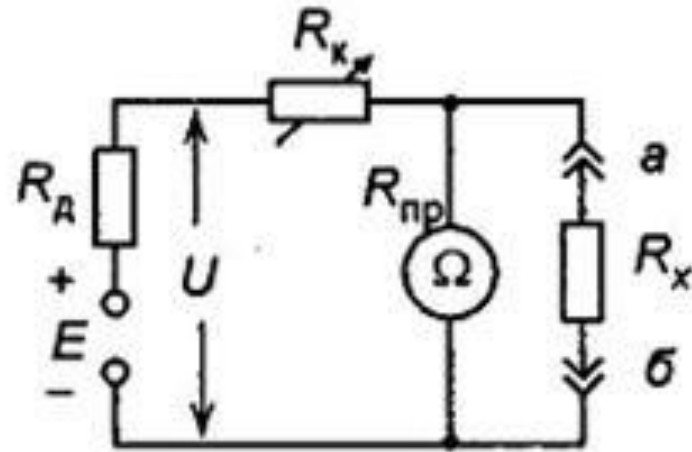
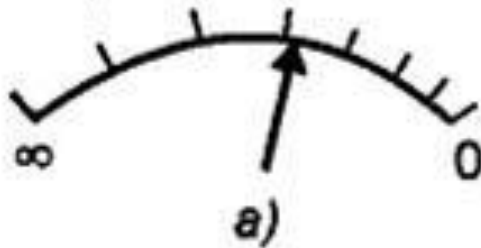
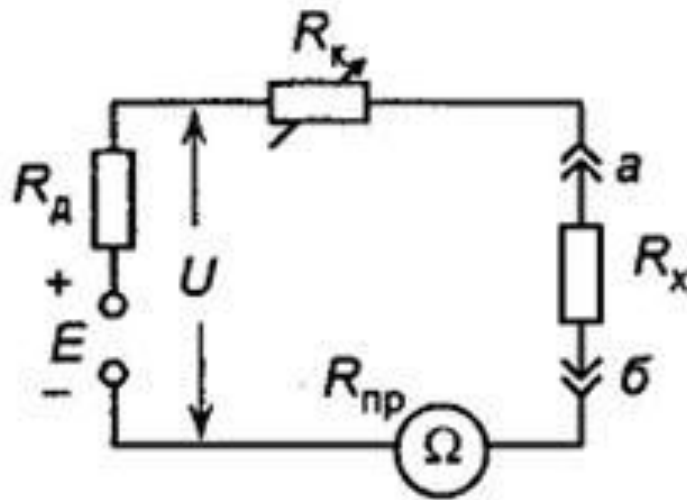
Метод вольтметра-амперметра для R



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

Использован закон Ома. Сопротивление резистора равно отношению напряжения на нем к току через него.

Омметр для измерения активных сопротивлений



$$I_X = \frac{E}{R_x + R_k + R_0}$$

Использован один амперметр.
Шкала обратная, калибровка
по нулевому резистору (к.з.)

$$U_X = \frac{E \cdot R_x}{R_x + R_k + R_0}$$

Использован один вольтметр.
Шкала прямая, калибровка по
бесконечному сопротивлению (х.х)

Омметр для измерения активных сопротивлений

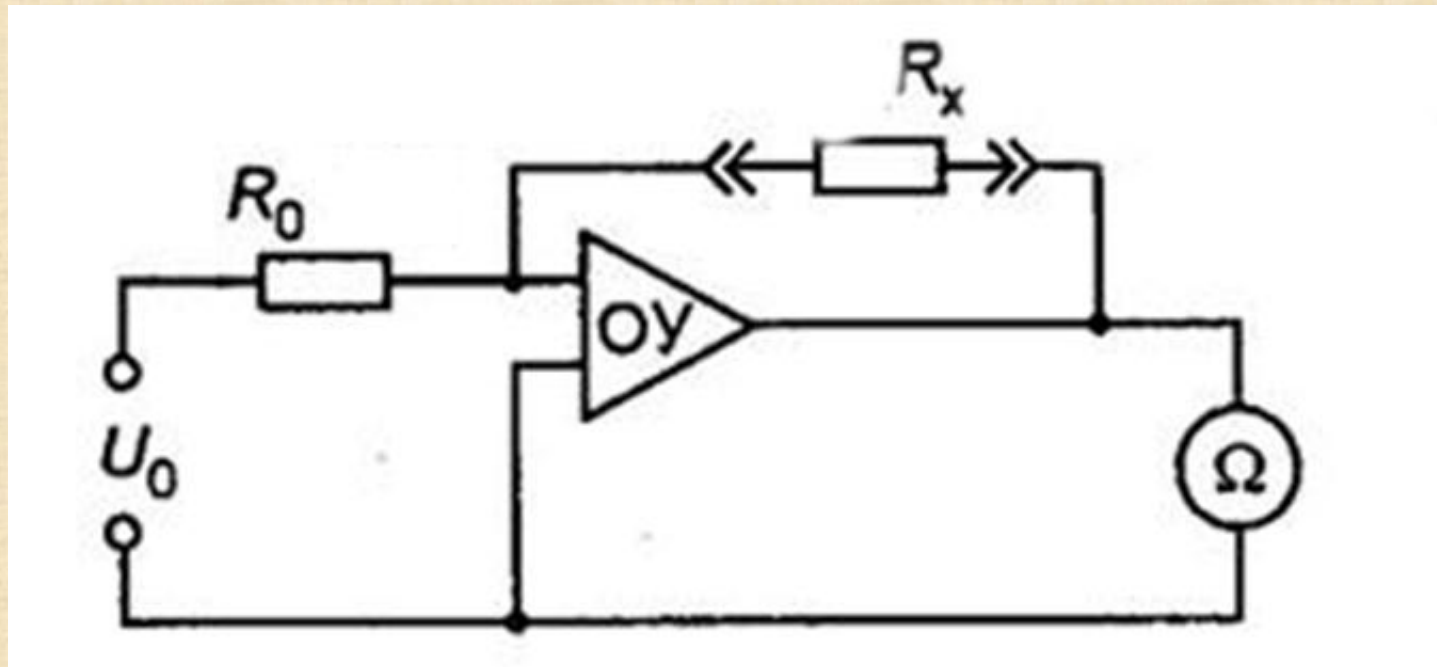


Аналоговый многопредельный
омметр



Мегаомметр для измерения
сопротивления изоляции
электрических цепей

Электронный омметр с операционным усилителем



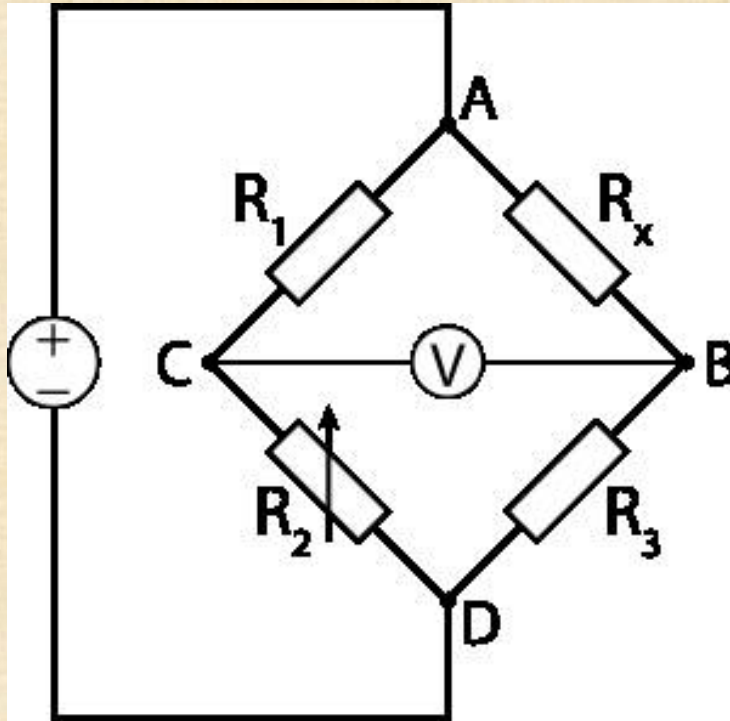
метод преобразования
сопротивления в
напряжение

$$U_{\text{вых}} = K_{OU} \cdot U_0 = \frac{-R_X}{R_0} U_0$$

метод преобразования
проводимости в напряжение –
 G_0 и G_X меняются местами

$$U_{\text{вых}} = \frac{-G_X}{G_0} U_0$$

Четырехплечий мост (мост Уинстона) для комплексных сопротивлений



$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Условие равновесия моста

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}$$

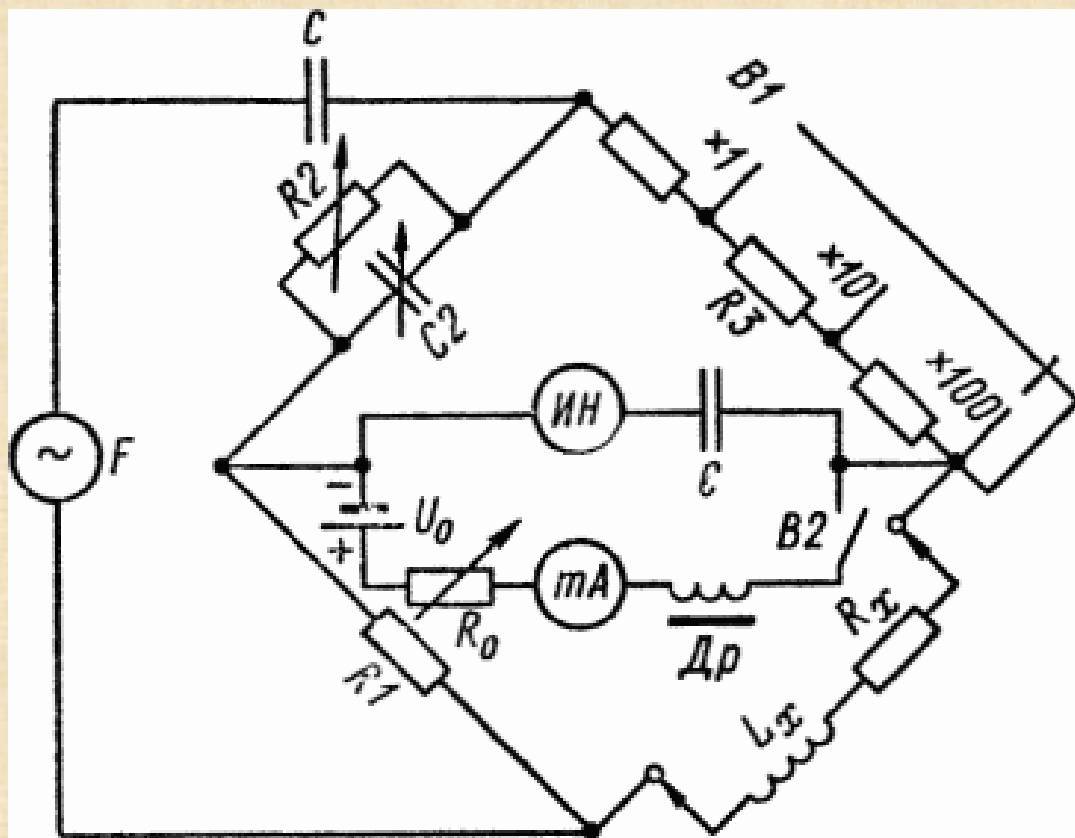
$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

Условие равновесия моста
переменного тока для
комплексных сопротивлений

$$|Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_4|$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$$

Мостовой метод измерения индуктивностей



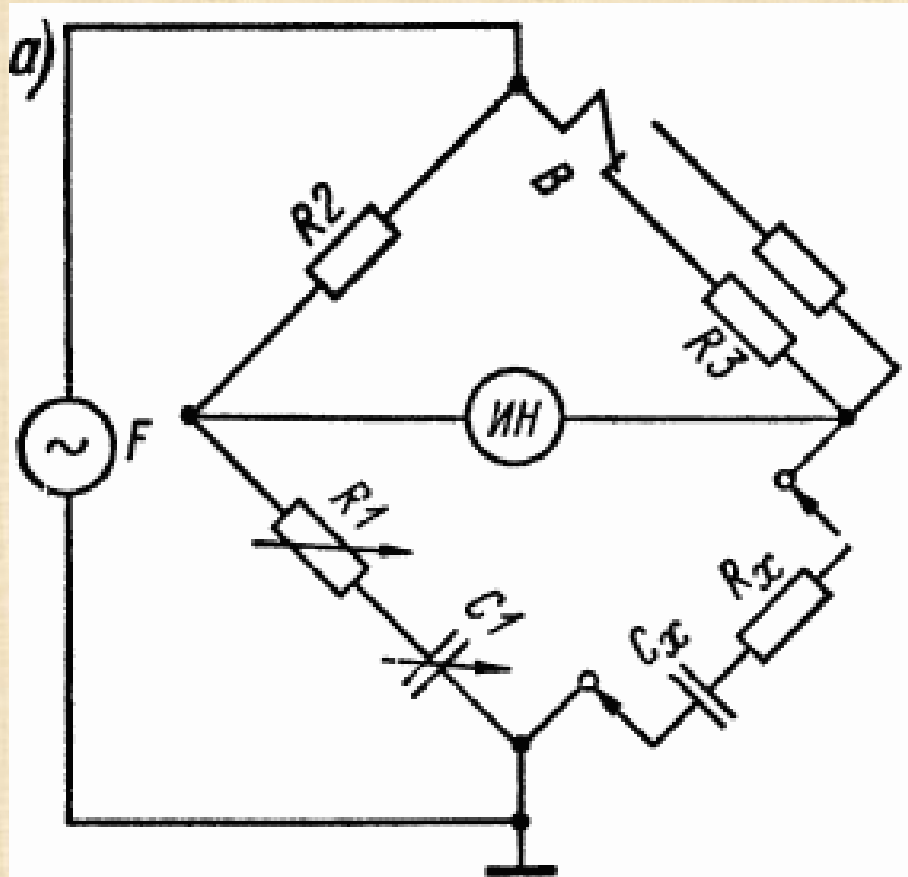
$$\frac{R_x + i\omega L_x}{\left(\frac{1}{R_2} + i\omega C_2 \right)} = R_3 \cdot R_1$$

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

$$L_x = C_2 R_1 R_3$$

$$Q_x = \omega C_2 R_2$$

Мостовой метод измерения емкости



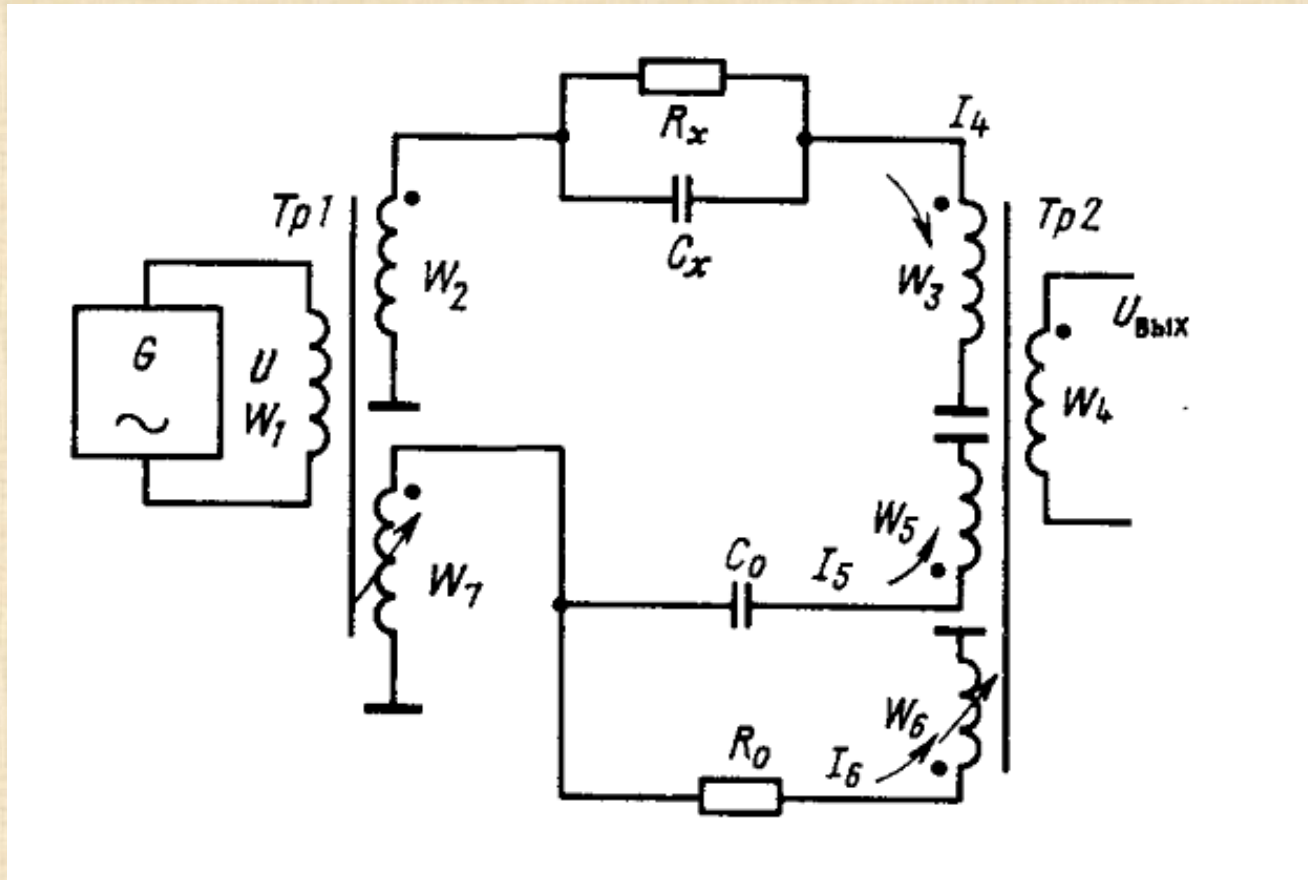
$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

$$C_x = C_1 \frac{R_2}{R_3}$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{\omega C_1 R_1}$$

$$\left(\frac{1}{R_x} + i\omega C_x \right) R_3 = \left(\frac{1}{R_1} + i\omega C_1 \right) R_2$$

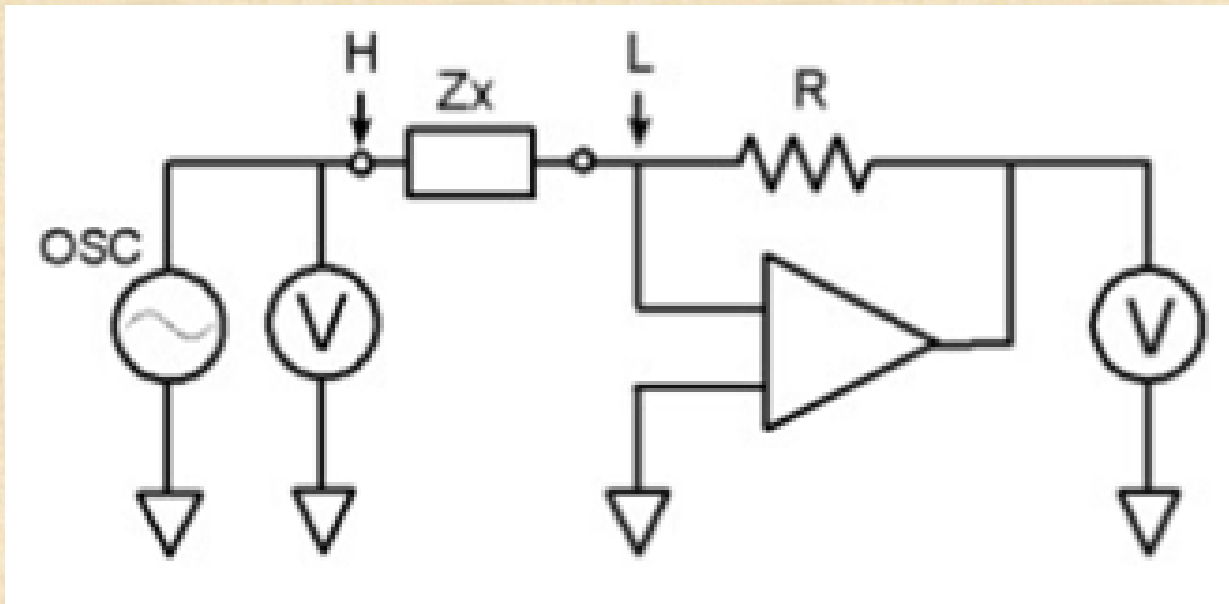
Трансформаторный мост для измерения RLC



$$I_3 W_3 = I_5 W_5 + I_6 W_6 \quad R_x = R_0 \frac{W_2 W_3}{W_7 W_6} \quad C_x = C_0 \frac{W_7 W_5}{W_2 W_3}$$

Условие равновесия моста –
нулевой магнитный поток в TP2

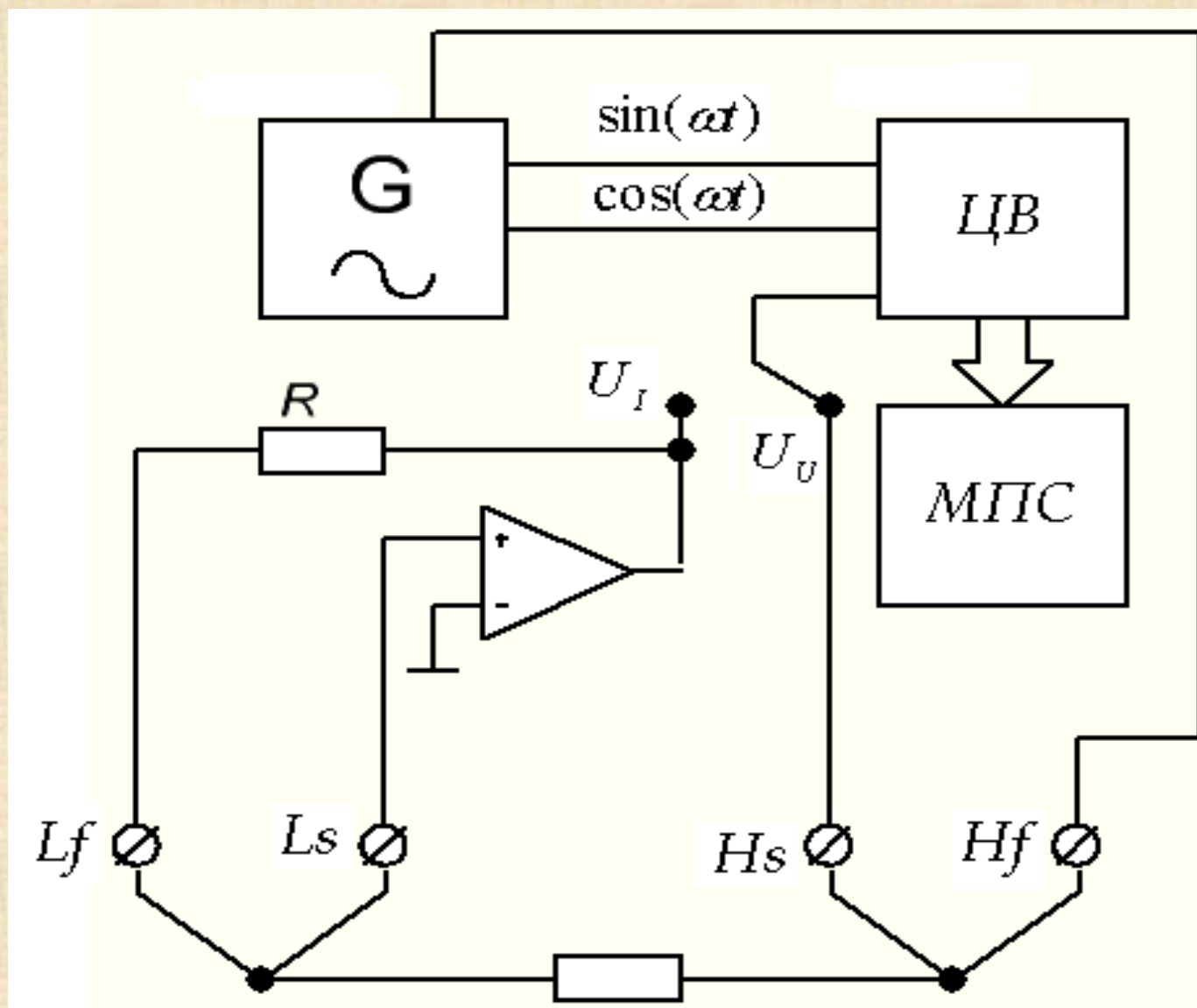
Метод преобразования импеданса в напряжение



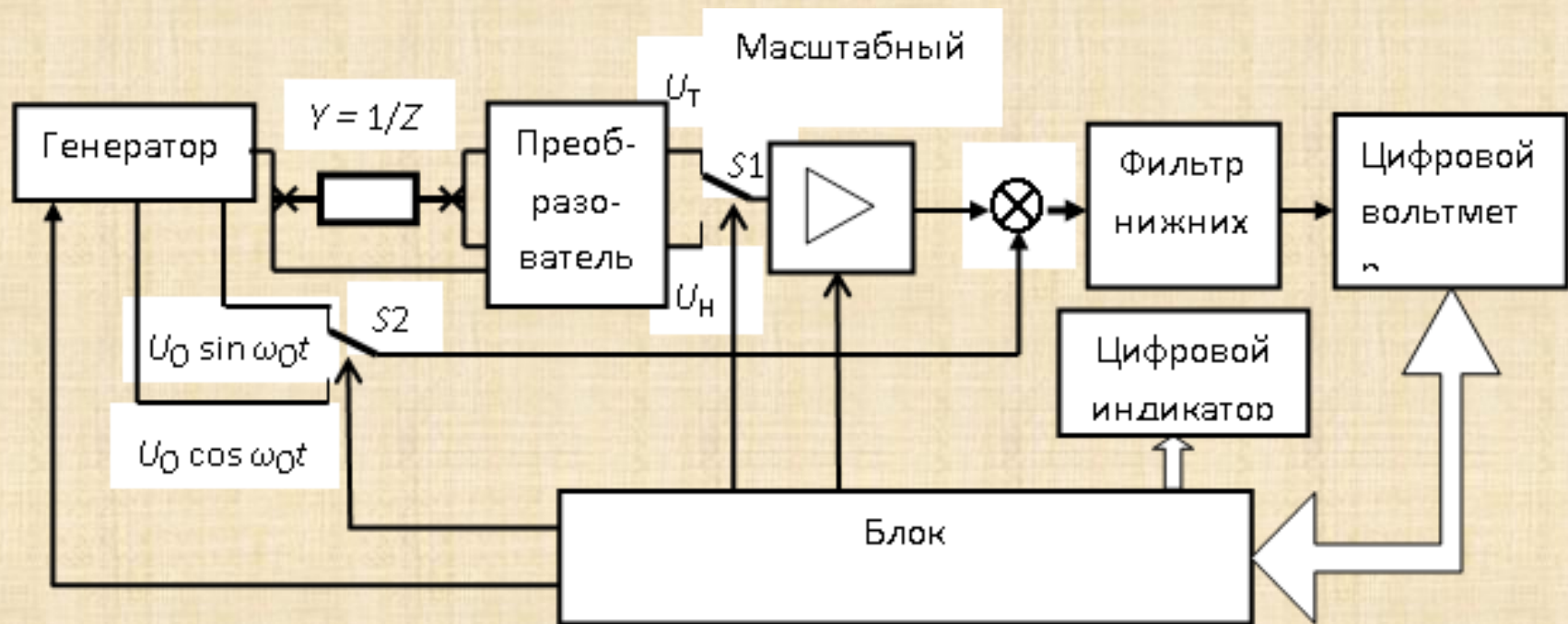
Комплексная амплитуда напряжения на входном зажиме, обозначенном H, измеряется вольтметром. Ток через элемент поступает на вход операционного усилителя в точку низкого потенциала, обозначенную L. Выходное напряжение равно отношению сопротивлений R/Z_x и пропорционально току через исследуемый элемент. Комплексная амплитуда выходного напряжения измеряется вторым вольтметром. Отношение двух напряжений дает величину искомого импеданса:

$$Z_x = R \frac{\dot{U}_U}{\dot{U}_I}$$

Микропроцессорный измеритель импеданса



Структурная схема измерителя иммитанса Е7-15



$$Y = G + jB = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = k_Y \frac{\dot{U}_T}{\dot{U}_H} = k_Y \frac{E + jF}{S + jT}$$

$$U_m \sin \omega_0 t + \varphi \cdot U_0 \cos \omega_0 t = \frac{U_0}{2} U_m \sin \varphi + \frac{U_0}{2} U_m \sin 2\omega_0 t + \varphi$$

$$U_m \sin \omega_0 t + \varphi \cdot U_0 \sin \omega_0 t = \frac{U_0}{2} U_m \cos \varphi - \frac{U_0}{2} U_m \cos 2\omega_0 t + \varphi$$

E7-15



LCR-821



Определение частотной характеристики цепей и устройств

Комплексный коэффициент передачи связывает комплексные амплитуды гармонического воздействия на входе и реакцию цепи на выходе. Для четырехполюсного устройства это коэффициент передачи по напряжению, равный отношению комплексных амплитуд напряжений на выходе и входе

$$K_{j\omega} = \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} \exp(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Амплитудно-частотной характеристикой линейной цепи называют зависимость модуля его комплексного коэффициента передачи от частоты. Фазочастотная характеристика – это частотная зависимость аргумента комплексного коэффициента передачи.

$$\text{ослабление, дБ,} \quad A = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}} \right) = -20 \lg |K_{j\omega}|$$

$$\text{коэффициент усиления, дБ} \quad K_p = 10 \lg (P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}) = -A$$

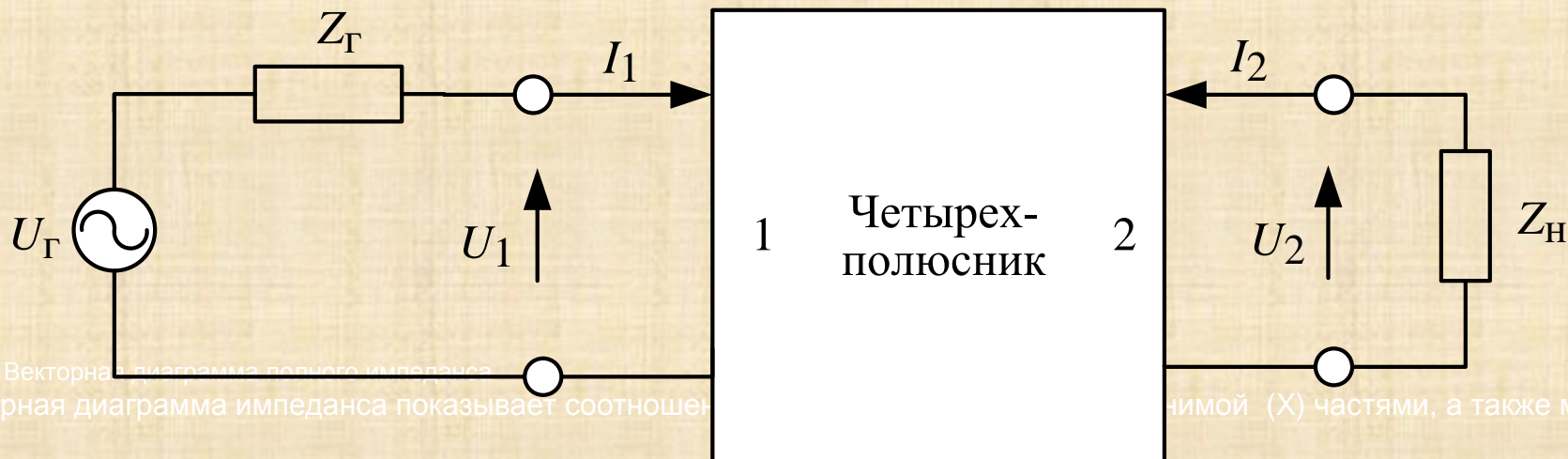
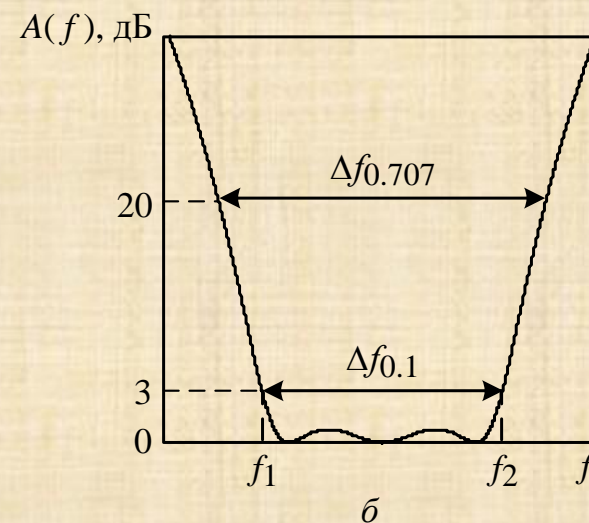
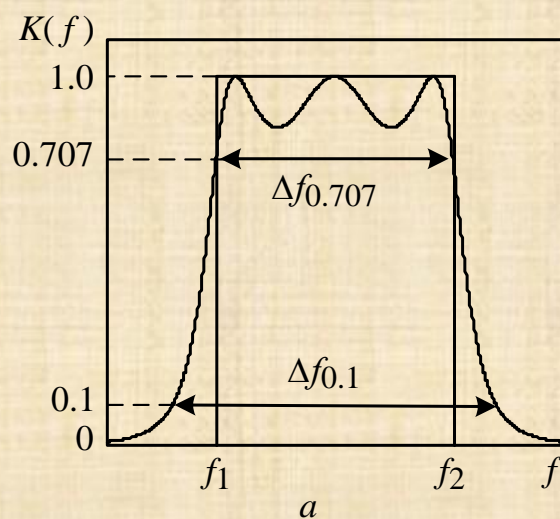


Рис. 1. Векторная диаграмма полного импеданса. Векторная диаграмма импеданса показывает соотношение действительной (R) и реактивной (X) частями, а также модулем и фазой.

Схема включения четырехполюсника в схему измерения АЧХ



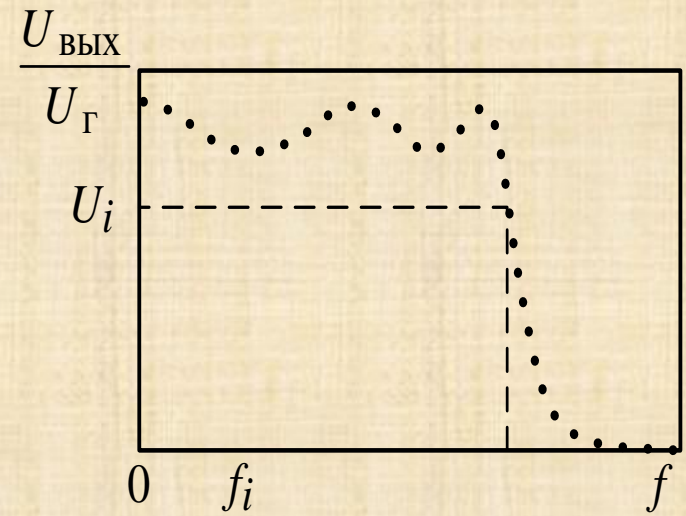
Типичные АЧХ полосно-пропускающего фильтра

Измерение АЧХ в дискретных точках

Генератор последовательно настраивают на ряд выбранных частот, амплитуду $U_2 = U_{\text{вых}}$ измеряют на сопротивлении нагрузки $Z_{\text{н}}$. Амплитуду генератора $U_{\text{г}}$ поддерживают постоянной. Зависимость отношения амплитуд от частоты $U_{\text{вых}}(f) / U_{\text{г}}$, построенная по результатам измерений с интерполяцией промежуточных точек, представляет собой АЧХ исследуемой цепи



a



б

Погрешности измерения АЧХ «по точкам»

Основными источниками погрешностей являются:

- погрешность установки частоты генератора;
- погрешность установки амплитуды напряжения на выходе генератора и ее нестабильность в процессе измерения АЧХ;
- погрешность вольтметра, измеряющего напряжение на выходе цепи;
- влияние входного импеданса вольтметра на выходное напряжение цепи;
- погрешность интерполяции кривой АЧХ между измеренными точками.