

Измерение напряжений и уровней сигналов

Одно из главных направлений развития современной измерительной техники – внедрение измерительных приборов с цифровым отсчетом.

Основным узлом цифровых приборов является **аналого-цифровой преобразователь**, в котором непрерывные (аналоговые) измеряемые величины, например напряжение, частота, интервалы времени, фазовые сдвиги и другие, **преобразуются в числовой код (цифру)**.

В большинстве случаев измеряемые физические величины преобразуются в пропорциональное им напряжение, измеряемое цифровыми приборами.

Цифровые измерительные приборы значительно **повышают точность измерений** по сравнению со стрелочными приборами, обеспечивают возможность непосредственного **ввода результата измерений в счетно-решающие устройства** для дальнейшей обработки, позволяют **автоматизировать процесс измерений** и телеизмерений, создают возможность выдачи результата с помощью цифропечатающих устройств, уменьшают или полностью **устраняют субъективные ошибки оператора**, позволяют одним прибором измерять различные величины, например напряжение, сопротивление, частоту и т.д.

Цифровые вольтметры предназначены для измерения постоянных или медленно изменяющихся напряжений. Цикл измерения в основном определяется временем, необходимым для фиксации оператором результата измерения.

При непосредственном вводе результатов измерений в ЭВМ цикл измерения определяется скоростью изменения входного напряжения и быстродействием ЭВМ и может достигать микросекунд при погрешности отсчета $\pm(0,1 - 0,5)\%$.

Погрешность цифровых измерительных приборов задается в виде относительной погрешности δ , %, и погрешности дискретности α . Абсолютная погрешность измерения определяется из формулы

$$\Delta U = \pm \left[\left(\frac{\delta U}{100} \right) + \alpha \right], \text{ В,}$$

а относительная погрешность вычисляется как обычно:

$$\delta = \pm \frac{\Delta U}{U} \cdot 100, \%$$

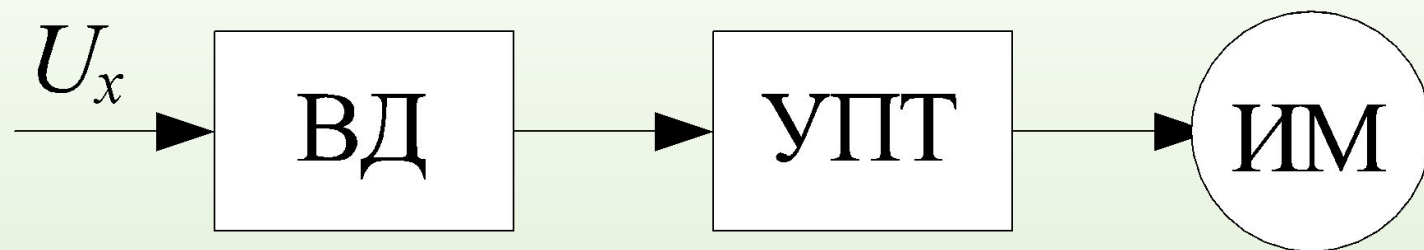
Для цифровых вольтметров, при измерениях на постоянном токе $\delta = (0,01 - 0,05) \%$, а при измерениях напряжений переменного тока $\delta = (0,1 - 0,5) \%$.

По способу преобразования напряжения в цифровой код имеются цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием, со ступенчатоизменяющимся напряжением, с поразрядным кодированием, с частотным преобразованием и комбинированные.

Классификация электронных измерителей напряжений и уровня

По своему назначению и принципу действия наиболее распространенные вольтметры могут быть подразделены на **вольтметры постоянного тока, переменного тока, универсальные, импульсные и селективные.**

Вольтметры постоянного тока. Последовательное соединение делителя напряжения и усилителя является характерной особенностью построения всех электронных вольтметров. Такая структура позволяет делать вольтметры высокочувствительными и многопредельными за счет изменения в широких пределах их общего коэффициента преобразования.



Вольтметры постоянного тока. Упрощенная структурная схема таких вольтметров показана на рисунке 4.1,

где ВД – входной делитель напряжения;

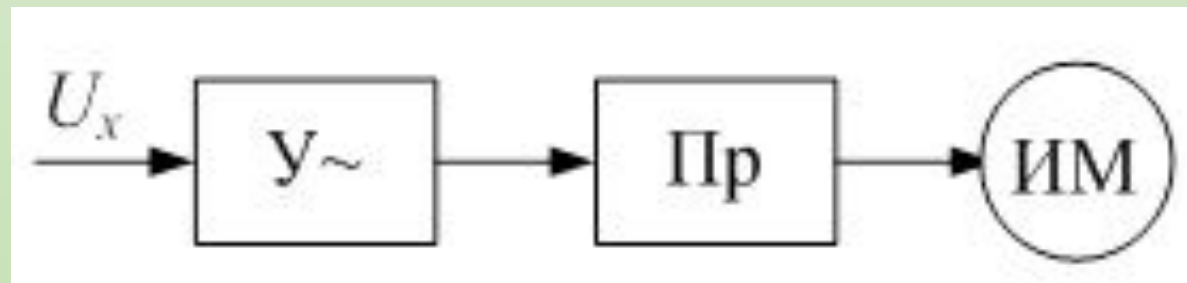
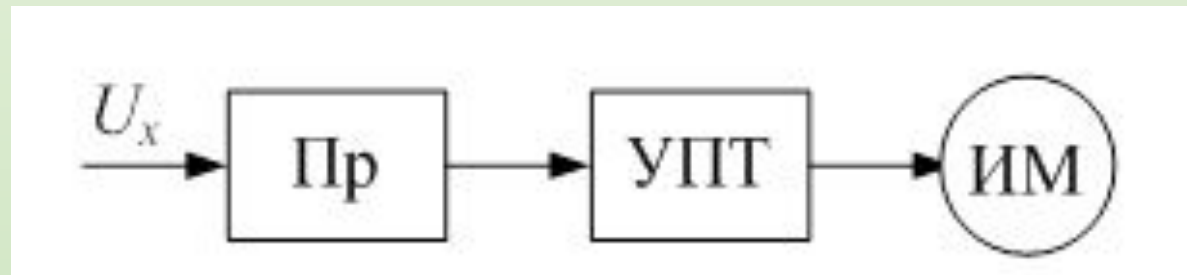
УПТ – усилитель постоянного тока;

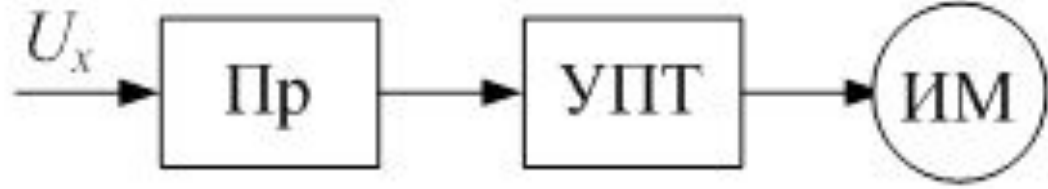
ИМ – магнитоэлектрический измерительный механизм.

При добавлении преобразователя переменного напряжения в постоянное, появляется возможность измерения и переменного напряжения.

Вольтметры переменного тока. Такие вольтметры состоят из преобразователя переменного напряжения в постоянное, усилителя и магнитоэлектрического измерительного механизма.

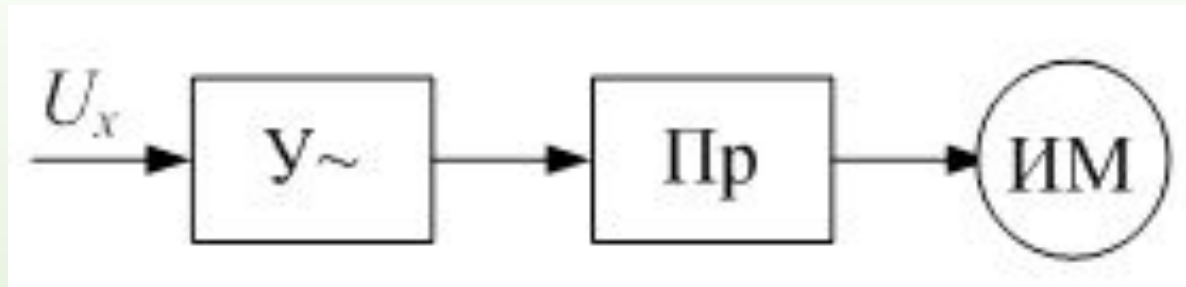
Возможны две обобщенные структурные схемы вольтметров переменного тока, различающиеся своими характеристиками.





В вольтметрах по схеме, измеряемое напряжение сначала преобразуется в постоянное напряжение, которое затем подается на УПТ и ИМ, являющиеся, по существу, вольтметром постоянного тока.

Преобразователь Пр представляет собой малоинерционное нелинейное звено, поэтому вольтметры с такой структурой могут работать в широком частотном диапазоне (от десятков герц до 10^3 МГц).



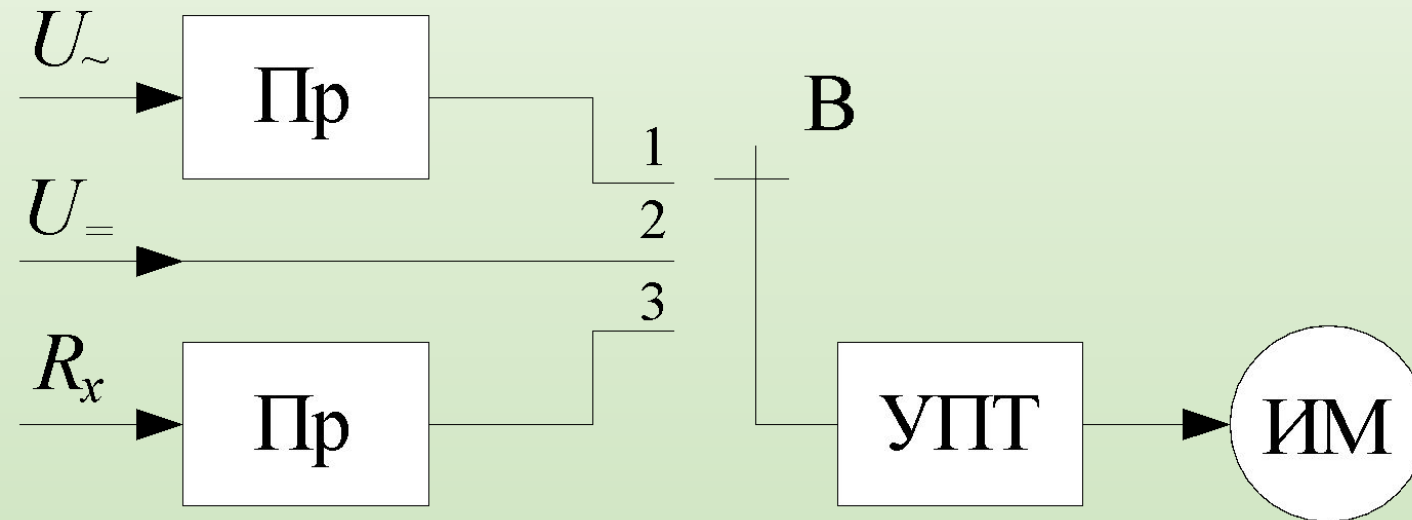
Благодаря предварительному усилению удастся повысить чувствительность. Однако создание усилителей переменного тока с большим коэффициентом усиления, работающих в широком диапазоне частот – достаточно трудная техническая задача.

Поэтому такие вольтметры имеют относительно низкий частотный диапазон (1 – 10 МГц); нижний предел измерений при максимальной чувствительности составляет десятки или сотни микровольт.

В зависимости от вида преобразователя переменного напряжения в постоянное отклонения указателя измерительного механизма вольтметров могут быть пропорциональны амплитудному (пиковому), среднему (средневыпрямленному) или действующему значениям измеряемого напряжения. В связи с этим вольтметры называют соответственно **вольтметрами амплитудного, среднего или действующего значения.**

Универсальные вольтметры. Такие вольтметры предназначены для измерения напряжений постоянного и переменного токов.

В – переключатель.



В зависимости от положения переключателя В вольтметр работает по схеме вольтметра переменного тока с преобразователем П (положение 1) или вольтметра постоянного тока (положение 2).

В универсальных вольтметрах, называемых также комбинированными, часто предусматривается возможность измерения сопротивлений.

В таких вольтметрах имеется преобразователь Π_R , выходное напряжение которого зависит от неизвестного сопротивления.

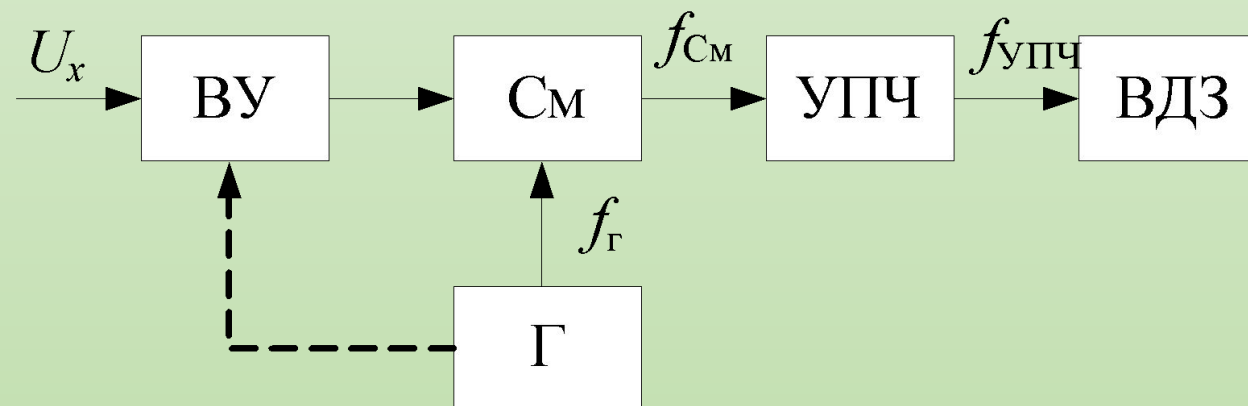
На основании этой зависимости шкала прибора градуируется в единицах сопротивления. При измерении резистор с неизвестным сопротивлением подключается к входным зажимам преобразователя, а переключатель ставится в положение 3.

Импульсные вольтметры. Для измерения амплитуды импульсных сигналов различной формы применяют импульсные вольтметры. Особенности работы импульсных вольтметров определяются малой длительностью измеряемых импульсов (от 10 – 100 нс) и значительной скважностью (до 10^9).

Импульсные вольтметры градуируют в амплитудных значениях измеряемых импульсов.

Селективные вольтметры. Такие вольтметры предназначены для измерения действующего значения напряжения в некоторой полосе частот или действующего значения отдельных гармонических составляющих измеряемого сигнала.

Принцип действия селективного вольтметра заключается в выделении отдельных гармонических составляющих сигнала или сигнала узкой полосы частот с помощью перестраиваемого полосового фильтра и измерении действующего значения выделенных сигналов.



Измеряемый сигнал u_x через избирательный входной усилитель ВУ подается на смеситель C_m , предназначенный для преобразования частотного спектра измеряемого сигнала. На выходе смесителя появляется сигнал, пропорциональный измеряемому сигналу, но с частотами спектра

$$f_{C_{mi}} = f_{\Gamma} - f_{xi}$$

где f_{xi} – частота гармонических составляющих входного сигнала;

f_{Γ} – частота сигнала синусоидального генератора Γ , называемого также гетеродином.

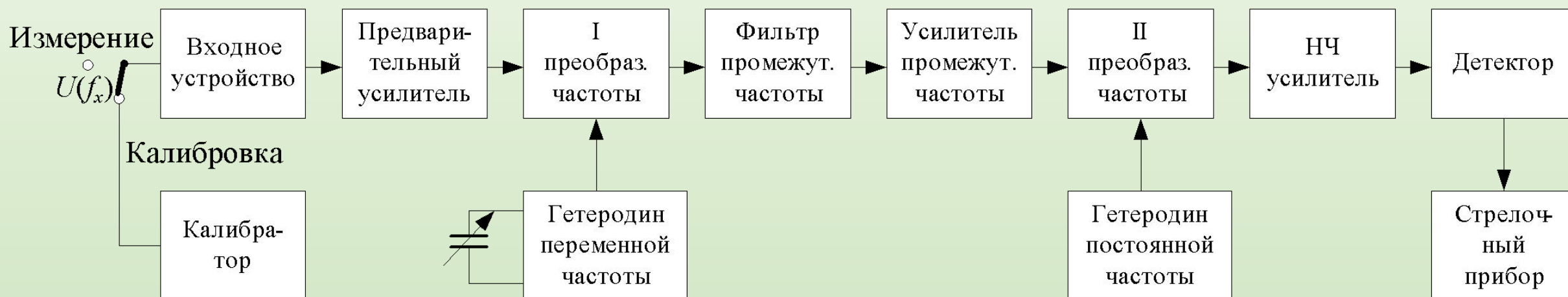
Измерение напряжений и уровней сигналов избирательными измерителями напряжений и уровней

Приборы избирательного действия предназначаются для измерения синусоидальных напряжений в условиях воздействия помех.

Помехи в этих приборах подавляются путем селекции входного сигнала по частоте, т.е. они измеряют не все входное напряжение, а лишь значение входного напряжения определенной частоты или, точнее, определенной узкой полосы частот.

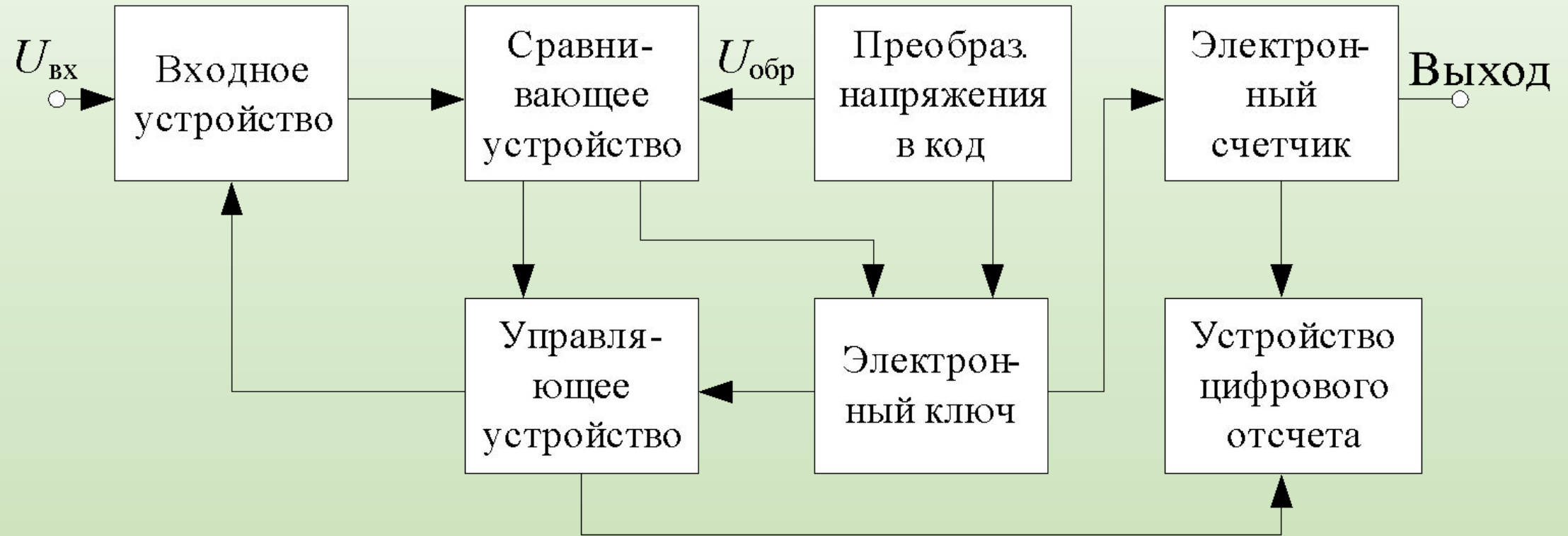
Избирательные приборы находят широкое применение при измерении сигналов малых уровней, когда уровень полезного сигнала соизмерим с уровнем помехи или ниже его.

В зависимости от условий работы и технических требований к этим приборам в них применяется однократное, двукратное, а иногда и трехкратное преобразование частоты.



В трактах многоканальной связи при наличии контрольных частот измерения возможны только избирательными приборами.

Цифровые вольтметры



Входное устройство при измерении постоянных или медленно меняющихся напряжений представляет собой высокоомное сопротивление (10 МОм) или катодный (эмиттерный) повторитель с калиброванным делителем, а при измерении высокочастотных напряжений – частотнокомпенсированный делитель, катодный повторитель и детекторный преобразователь.

Сравнивающее устройство служит для фиксации равенства измеряемого и образцового напряжений. Сравнение напряжений производится компенсационным методом, что обеспечивает высокую точность измерения.

Управляющее устройство обычно состоит из тактового генератора, задающего циклы измерения и управляющего работой узлов цифрового вольтметра, и логических схем, обеспечивающих согласованную работу, коммутацию и выполнение логических операций в вольтметре. Управляющее устройство может работать как в автоматическом режиме, так и в режиме ручного управления.

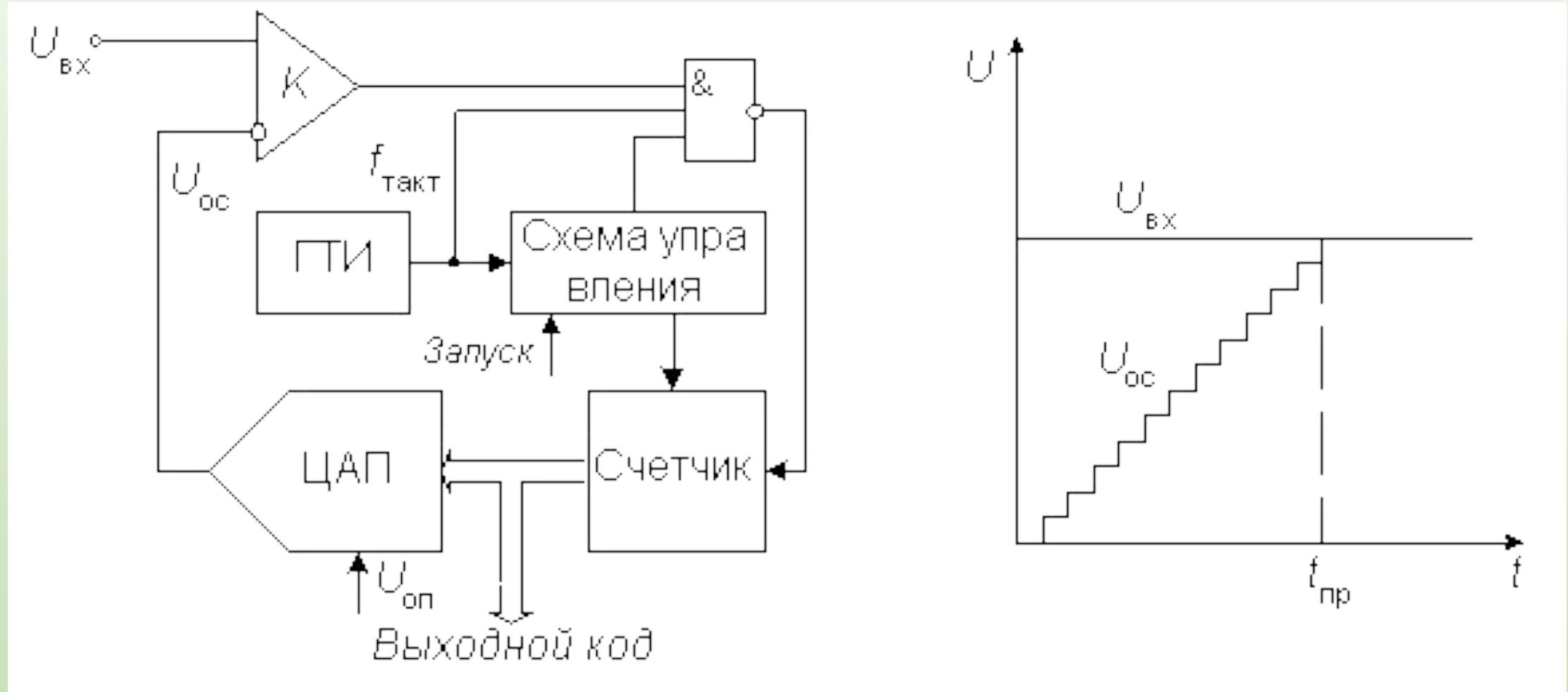
Преобразователь напряжения в код вырабатывает образцовое напряжение, подаваемое на сравнивающее устройство, и соответствующее этому напряжению число (цифру), которое фиксируется в электронном счетчике.

Электронный ключ управляет цепью поступления счетных импульсов в счетчик, если в схеме работает время-импульсный или ступенчатый преобразователь. Основное требование к электронному ключу состоит в обеспечении необходимой стабильности скорости срабатывания.

Электронные счетчики осуществляют отсчет измеряемого напряжения в двоичном коде при выходе на ЭВМ. При выходе на устройство цифрового отсчета результат представляется в десятичном коде.

Цифровые индикаторы могут выполняться в виде различных устройств. Наиболее часто в качестве индикаторов использовались цифровые газоразрядные лампы, преобразующие электрические напряжения в цифры.

АЦП последовательного счета



Работа преобразователя начинается с прихода импульса запуска, который включает счетчик, суммирующий число импульсов, поступающих от генератора тактовых импульсов ГТИ.

Выходной код счетчика подается на ЦАП, осуществляющий его преобразование в напряжение обратной связи $U_{ос}$. Процесс преобразования продолжается до тех пор, пока напряжение обратной связи сравнивается со входным напряжением и переключится компаратор, который своим выходным сигналом прекратит поступление тактовых импульсов на счетчик.

Переход выхода компаратора из 1 в 0 означает завершение процесса преобразования. Выходной код, пропорциональный входному напряжению *в момент окончания преобразования*, считывается с выхода счетчика.

Время преобразования АЦП этого типа является переменным и определяется входным напряжением. Его максимальное значение соответствует максимальному входному напряжению и при разрядности двоичного счетчика N и частоте тактовых импульсов $f_{\text{такт}}$ равно

$$t_{\text{пр.макс}} = (2^N - 1) / f_{\text{такт.}}$$

Например, при $N=10$ и $f_{\text{такт}} = 1$ МГц $t_{\text{пр.макс}} = 1024$ мкс, что обеспечивает максимальную частоту выборок порядка 1 кГц. Статическая погрешность преобразования определяется суммарной статической погрешностью используемых ЦАП и компаратора.

Частоту счетных импульсов необходимо выбирать с учетом завершения переходных процессов в них.

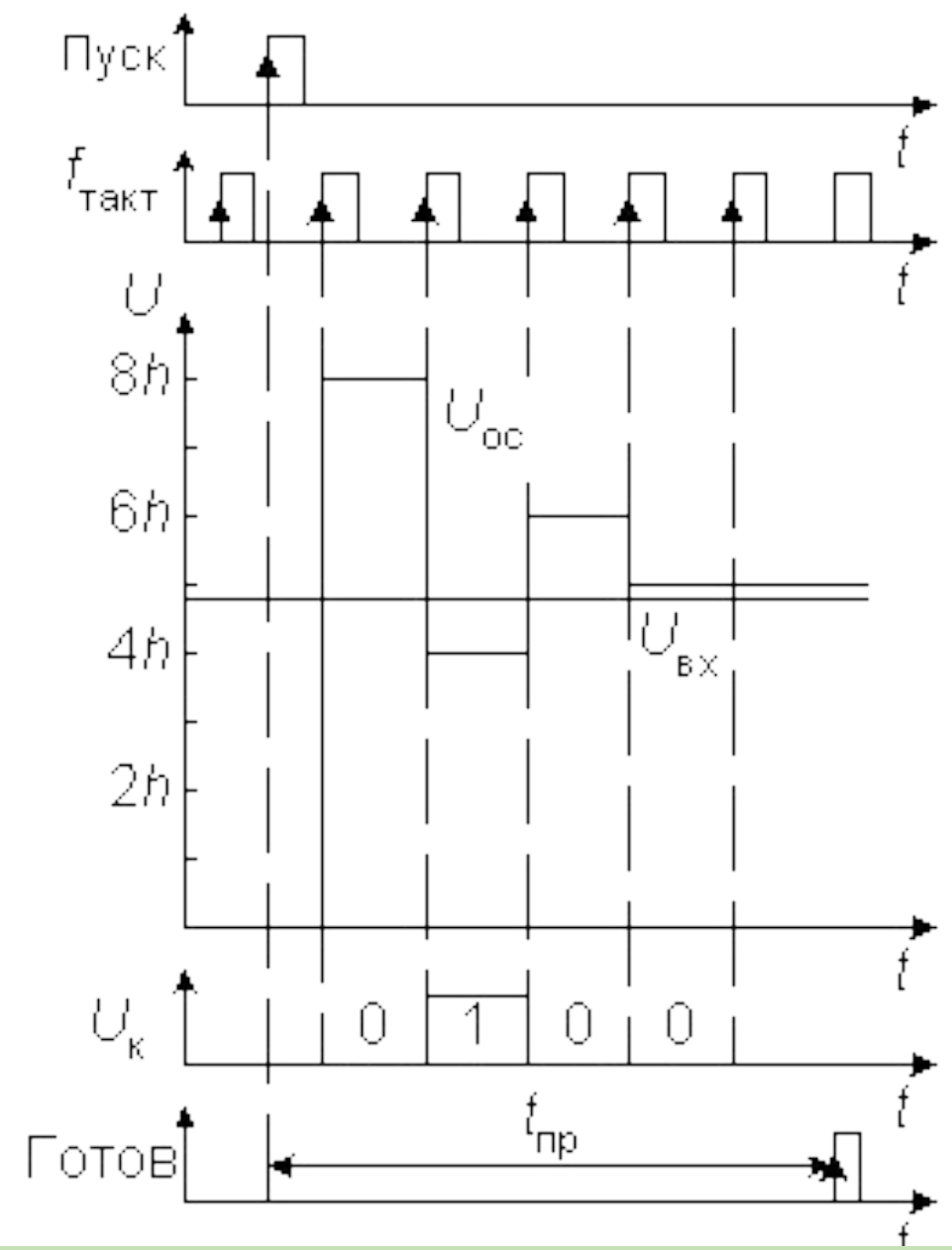
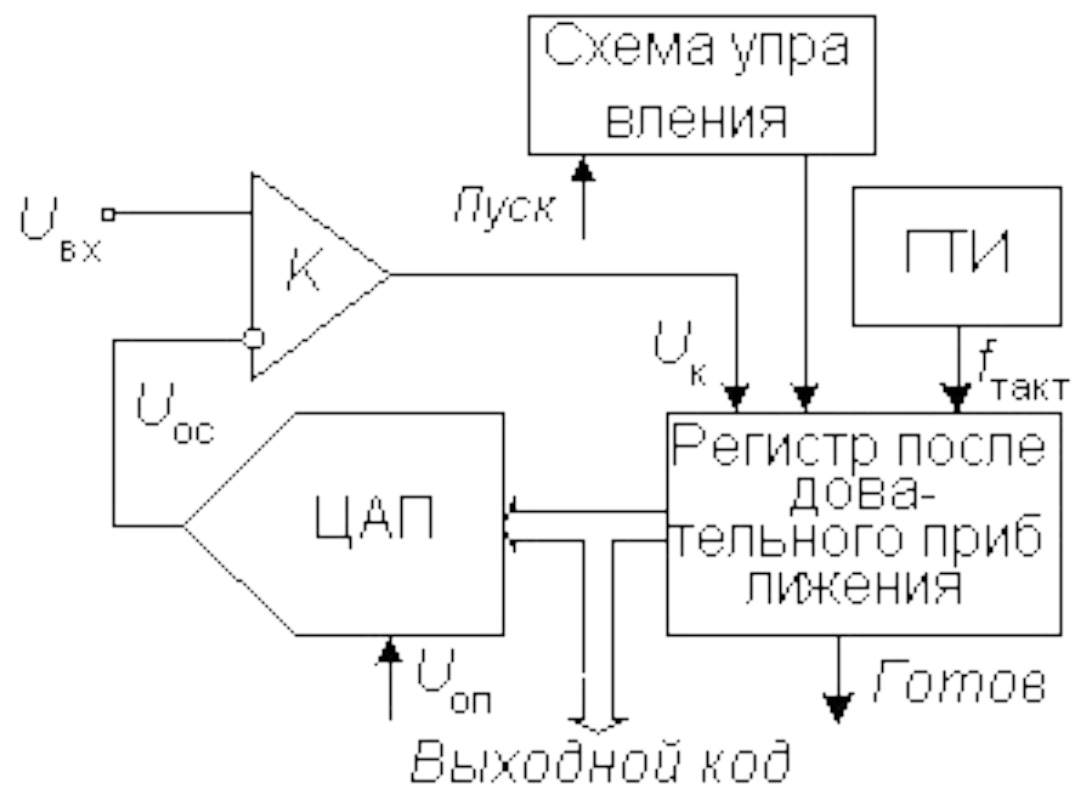
Особенностью АЦП последовательного счета является небольшая частота дискретизации, достигающая нескольких кГц. Достоинством АЦП данного класса является сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования.

АЦП последовательного приближения

АЦП с поразрядным уравниванием, является наиболее распространенным вариантом последовательных АЦП.

В основе работы этого класса преобразователей лежит принцип *дихотомии*, т.е. последовательного сравнения измеряемой величины с $1/2$, $1/4$, $1/8$ и т.д. от возможного максимального значения ее.

Это позволяет для N-разрядного АЦП последовательного приближения выполнить весь процесс преобразования за N последовательных шагов (итераций) вместо $2^N - 1$ при использовании последовательного счета и получить существенный выигрыш в быстродействии. Так, уже при N=10 этот выигрыш достигает 100 раз и позволяет получить с помощью таких АЦП до $10^5 \dots 10^6$ преобразований в секунду.



После подачи команды "Пуск" с приходом первого тактового импульса РПП принудительно задает на вход ЦАП код, равный половине его шкалы.

Если входное напряжение больше, чем эта величина, то на выходе компаратора устанавливается 1, если меньше, то 0. В этом последнем случае схема управления должна переключить старший разряд обратно в состояние нуля.

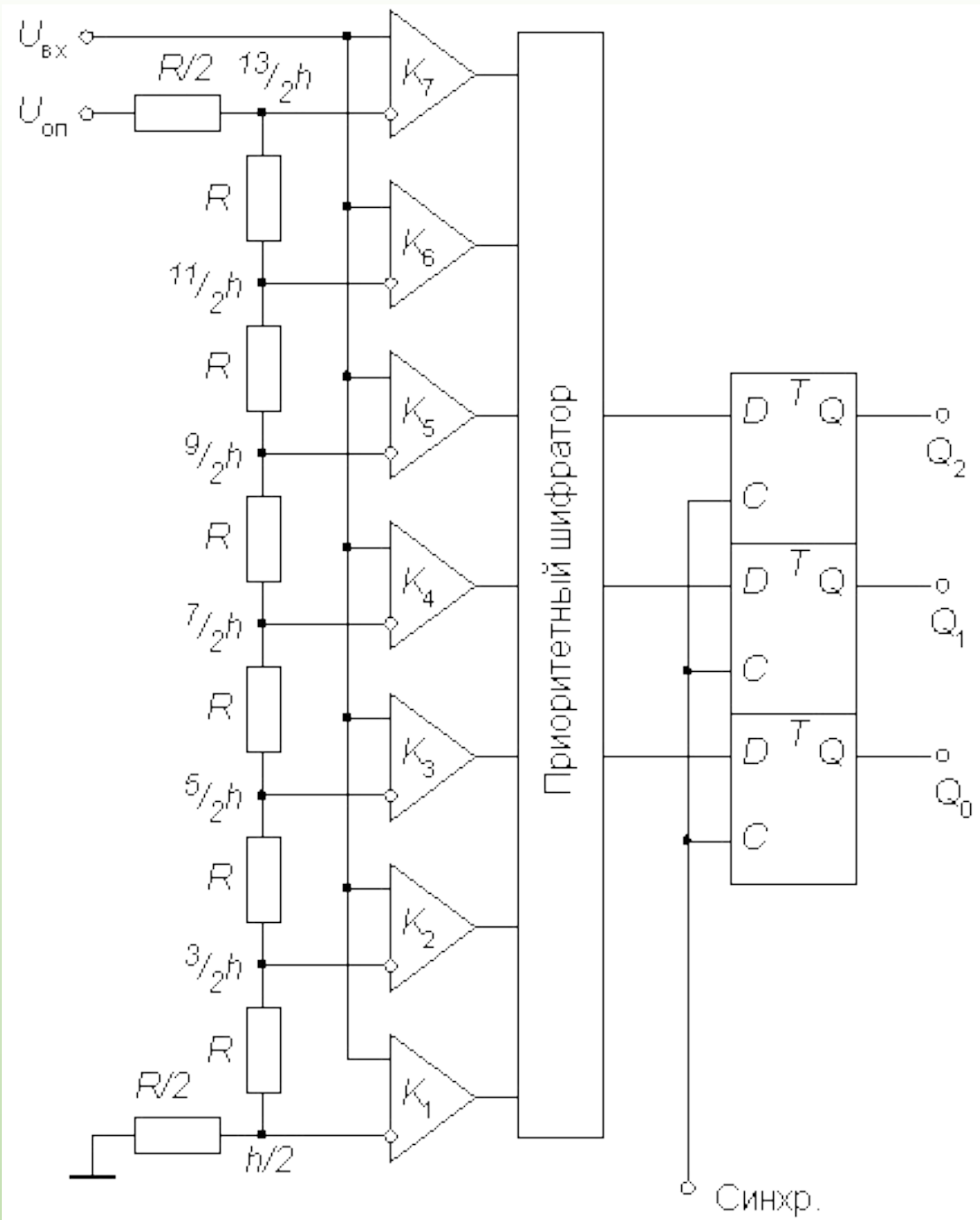
После подобных выравнивающих шагов в регистре последовательного приближения оказывается двоичное число, из которого после цифро-аналогового преобразования получается напряжение, соответствующее $U_{вх}$.

Данный класс АЦП занимает промежуточное положение по быстродействию, стоимости и разрешающей способности между последовательно-параллельными и интегрирующими АЦП и находит широкое применение в системах управления, контроля и цифровой обработки сигналов.

Параллельные АЦП

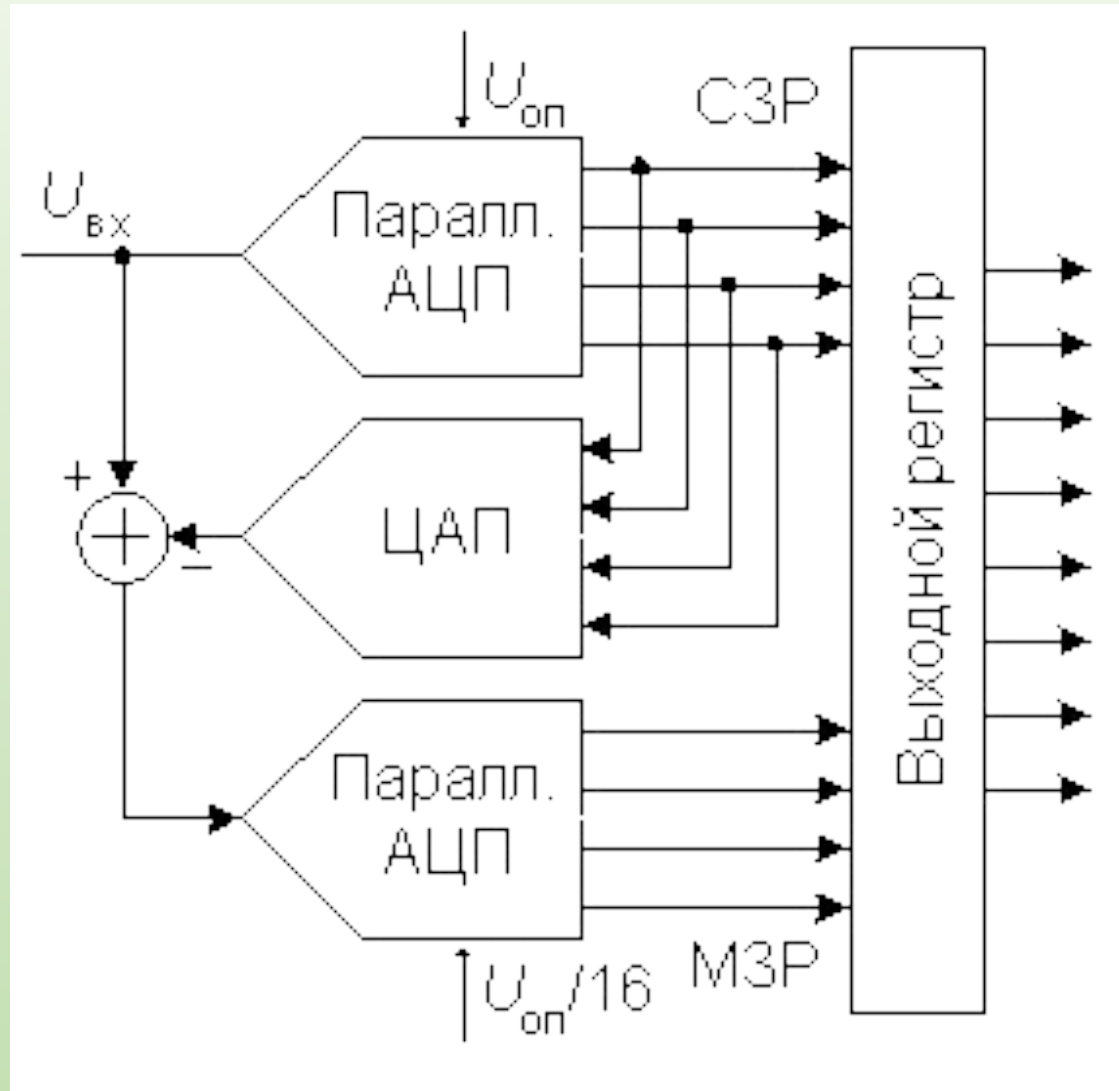
АЦП этого типа осуществляют квантование сигнала одновременно с помощью набора компараторов, включенных параллельно источнику входного сигнала.

С помощью трех двоичных разрядов можно представить восемь различных чисел, включая нуль. Необходимо, следовательно, семь компараторов. Семь соответствующих эквидистантных опорных напряжений образуются с помощью резистивного делителя. Если приложенное входное напряжение не выходит за пределы диапазона от $\frac{5}{2}h$, до $\frac{7}{2}h$, где $h=U_{оп}/7$ - квант входного напряжения, соответствующий единице младшего разряда АЦП, то компараторы с 1-го по 3-й устанавливаются в состояние 1, а компараторы с 4-го по 7-й - в состояние 0. Преобразование этой группы кодов в трехзначное двоичное число выполняет логическое устройство, называемое приоритетным шифратором.



Многоступенчатые АЦП

В многоступенчатом АЦП процесс преобразования входного сигнала разделен в пространстве.



Верхний по схеме АЦП осуществляет грубое преобразование сигнала в четыре старших разряда выходного кода. Цифровые сигналы с выхода АЦП поступают на выходной регистр и одновременно на вход 4-разрядного быстродействующего ЦАП.

Остаток от вычитания выходного напряжения ЦАП из входного напряжения схемы поступает на вход АЦП2, опорное напряжение которого в 16 раз меньше, чем у АЦП1. Как следствие, квант АЦП2 в 16 раз меньше кванта АЦП1. Этот остаток, преобразованный АЦП2 в цифровую форму представляет собой четыре младших разряда выходного кода.

Различие между АЦП1 и АЦП2 заключается прежде всего в требовании к точности: у АЦП1 точность должна быть такой же как у 8-разрядного преобразователя, в то время как АЦП2 может иметь точность 4-разрядного.

Анализ спектров

Анализаторы спектра, называемые также анализаторами гармоник, предназначены для измерения спектра амплитуд сигналов.

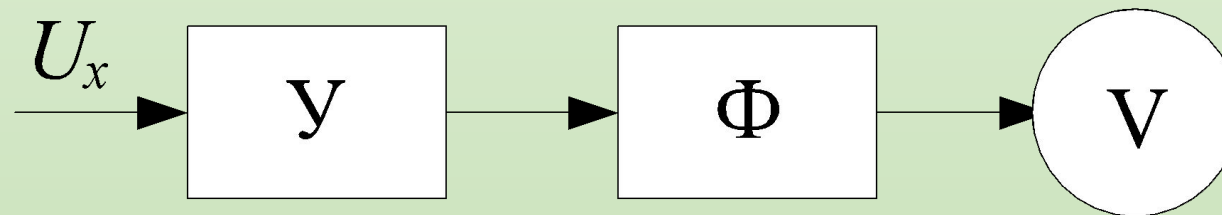
Анализ спектра может производиться двумя способами:

- первый способ анализа называется последовательным, поскольку гармоники определяются поочередно;
- второй способ – параллельный, так как гармоники определяются одновременно.

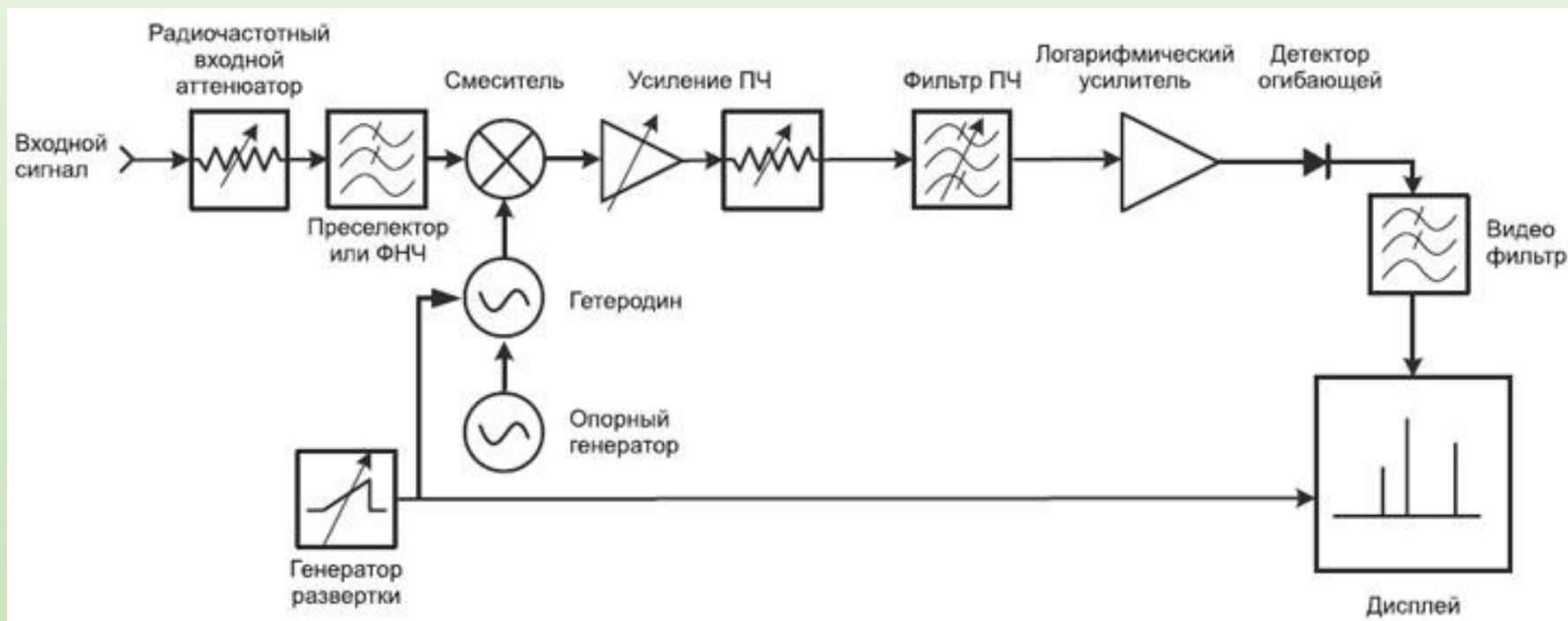
Анализаторов спектра, основанный на последовательном способе анализа.

Исследуемое напряжение u_x после усилителя $У$ поступает на фильтр Φ , который последовательно настраивается на частоту первой, второй, третьей и т.д. гармоник.

По шкале настройки фильтра определяют частоты гармоник, а по показаниям электронного вольтметра V – их действующее значение.



Во второй схеме анализатора применен генератор Г с регулируемой частотой. Фильтр Ф имеет определенную для данного типа анализатора узкую полосу пропускания.



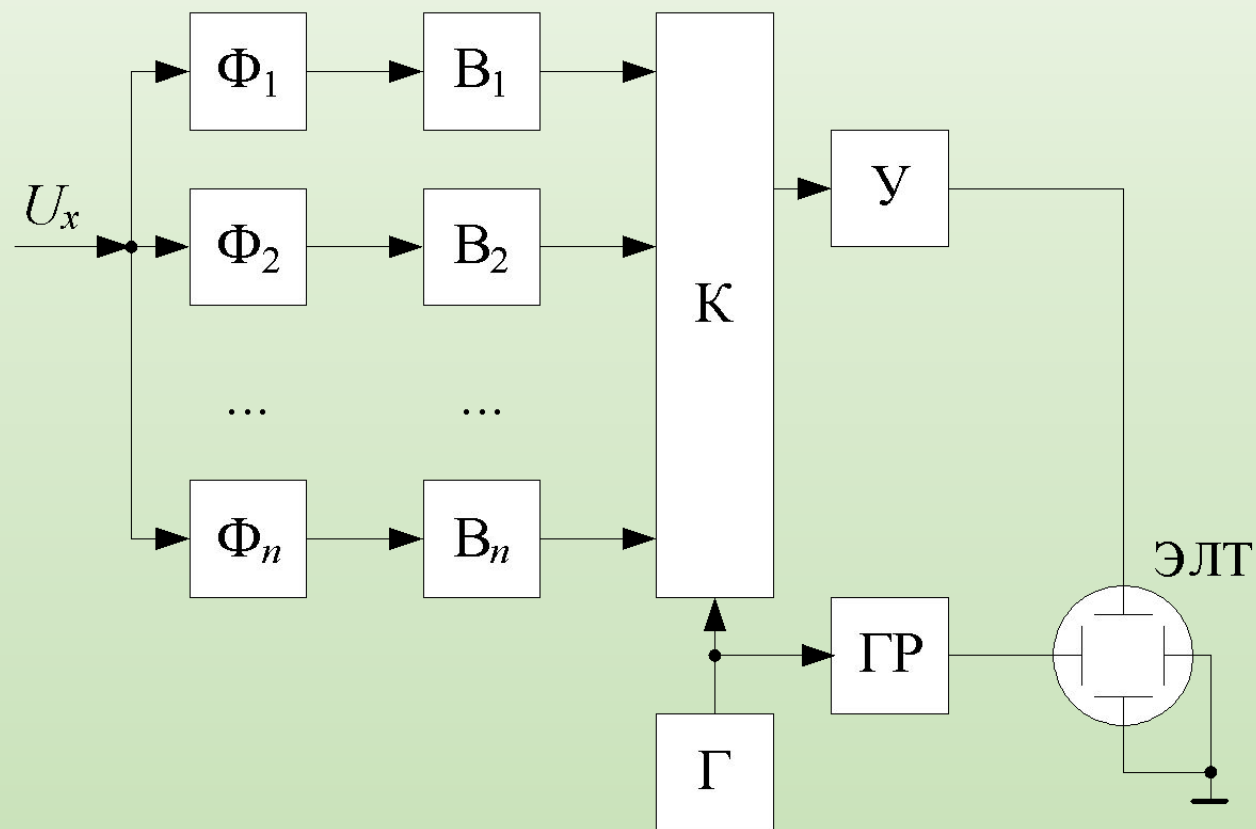
Анализируемое напряжение u_x поступает на смеситель C_m , на который подается сигнал от генератора G . На выходе смесителя C_m образуется сигнал, имеющий частоту, равную разности частот неизвестного сигнала u_x и сигнала гетеродина. Сигнал с выхода смесителя поступает на фильтр Φ .

Гетеродин настраивается так, чтобы его частота отличалась от частоты измеряемой гармоники на значение, соответствующее частоте пропускания фильтра. Напряжение на выходе фильтра измеряется электронным вольтметром V . Частота гармоники определяется по частоте гетеродина.

Так как частота настройки фильтра постоянная, в качестве фильтрующих элементов используют кварцевые резонаторы, отличающиеся очень высокой добротностью. Анализаторы спектра с гетеродином отличаются от анализаторов с перестраиваемым фильтром большей чувствительностью и большей точностью.

Анализаторы последовательного действия применимы лишь для исследования периодических процессов – ими нельзя анализировать одиночные импульсы.

Анализаторы спектра параллельного действия применяются для анализа высокочастотных колебаний и анализа одиночных импульсов.



Исследуемый сигнал напряжением u_x одновременно поступает на фильтры $\Phi_1 - \Phi_n$, настроенные на различные частоты. Сигналы с фильтров через выпрямители $B_1 - B_n$, коммутатор K , усилитель U поступают на пластины вертикального отклонения ЭЛТ.

На пластины горизонтального отклонения ЭЛТ подается напряжение генератора развертки ГР, работа которого синхронизирована с работой коммутатора и управляется тактовым генератором Г.

В результате на экране ЭЛТ за период развертки возникают импульсы, расстояние между которыми пропорционально частотному интервалу между гармониками, а амплитуда пропорциональна спектральной плотности $A(\omega)$ сигнала на соответствующей частоте, т.е. таким образом воспроизводится спектр исследуемого сигнала.