

# МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

*АЦП "напряжение-код"*  
доц. Ленцман В.Л

**Термин АЦП формально применим к измерительным преобразователям любых аналоговых физических величин в цифровой код. Однако чаще всего его относят к преобразователям "напряжение-код", используемых в цифровых вольтметрах и устройствах компьютерной обработки данных.**

# Основные характеристики АЦП "напряжение-код".

## 1. Диапазон измерения.

Современные АЦП в интегральном и модульном исполнении могут быть как однополярными, диапазон которых от 0 до  $U_{\text{макс}}$ , так и двухполярными, диапазон которых  $U_{\text{макс}}$  обычно записывают как  $U_{\text{макс}}/2$

## 2. Разрешающая способность.

Эту характеристику определяют несколькими способами:

2.1. шагом квантования (ценой единицы младшего разряда) ;

2.2. количеством уровней квантования -  $N$ ;

2.3. количеством двоичных разрядов кода (бит)  
-  $n$

2.4. количеством десятичных разрядов кода -  $k$ ;

Эти параметры связаны следующими простыми формулами:

$$N=2n-1, \quad N=10k, \quad \Delta_0 = U_{\text{макс}} / N$$

Следует различать термин «разрешающая способность» от иногда используемого термина «эффективная» (или «реальная») разрешающая способность, который учитывают влияние не только операции квантования, но и других факторов, определяющих погрешность измерения.

### 3. Погрешность.

Принципиальная составляющая погрешности любого АЦП – погрешность квантования. В зависимости от способа построения шкалы квантования (разд. 4) и типа АЦП эта составляющая может быть связана с шагом квантования следующими формулами:

$$\Delta_{\text{КВ}} = \pm \Delta_0 / 2; \quad \Delta_{\text{КВ}} = \pm \Delta_0; \quad -\Delta_0 < \Delta_{\text{КВ}} < 0; \quad 0 < \Delta_{\text{КВ}} < \Delta_0$$

Нормируемая суммарная погрешность (раздел 1) реальных АЦП, в которую вносят вклад составляющие погрешностей отдельных узлов и шумы входных цепей, может быть как соизмерима с погрешностью квантования, так и существенно ее превышать. Это соотношение зависит от типа, назначения и стоимости АЦП. Например, некоторые современные АЦП формируют 24-разрядный двоичный код, но их суммарная погрешность может обеспечить «эффективное» разрешение только 19...20 двоичных разрядов.

**4. Быстродействие (Б)** – количество измерений в секунду (изм/с), выполняемых с нормируемой погрешностью (зарубежные фирмы при указании быстродействия АЦП используют единицы «Гц» или «выборки/с»). Для решения многих измерительных задач с использованием компьютерной обработки получаемых данных (например, в цифровой осциллографии) необходимы АЦП с очень высоким быстродействием. Современная (2008 г.) граница быстродействия АЦП порядка  $40 \cdot 10^9$  изм/с. Но, например, для визуального отсчета показаний цифровых вольтметров не требуется быстродействие выше, чем одно измерение в 2...3 секунды.



**5. Время преобразования ( $t_{np}$ )** – интервал времени от момента подачи импульса запуска до момента выдачи кода с нормируемой погрешностью (иногда в технических описаниях АЦП эту характеристику называют «временем задержки»). Следует обратить внимание на то, что значение  $t_{np}$ , как правило, меньше обратного значения быстродействия  $1/B=T$ , поскольку необходим некоторый интервал времени  $t_{подг}$  для подготовки АЦП к следующему циклу преобразования - сброса счетчиков, разряда интеграторов и других т.п. операций (рис. 7-1).

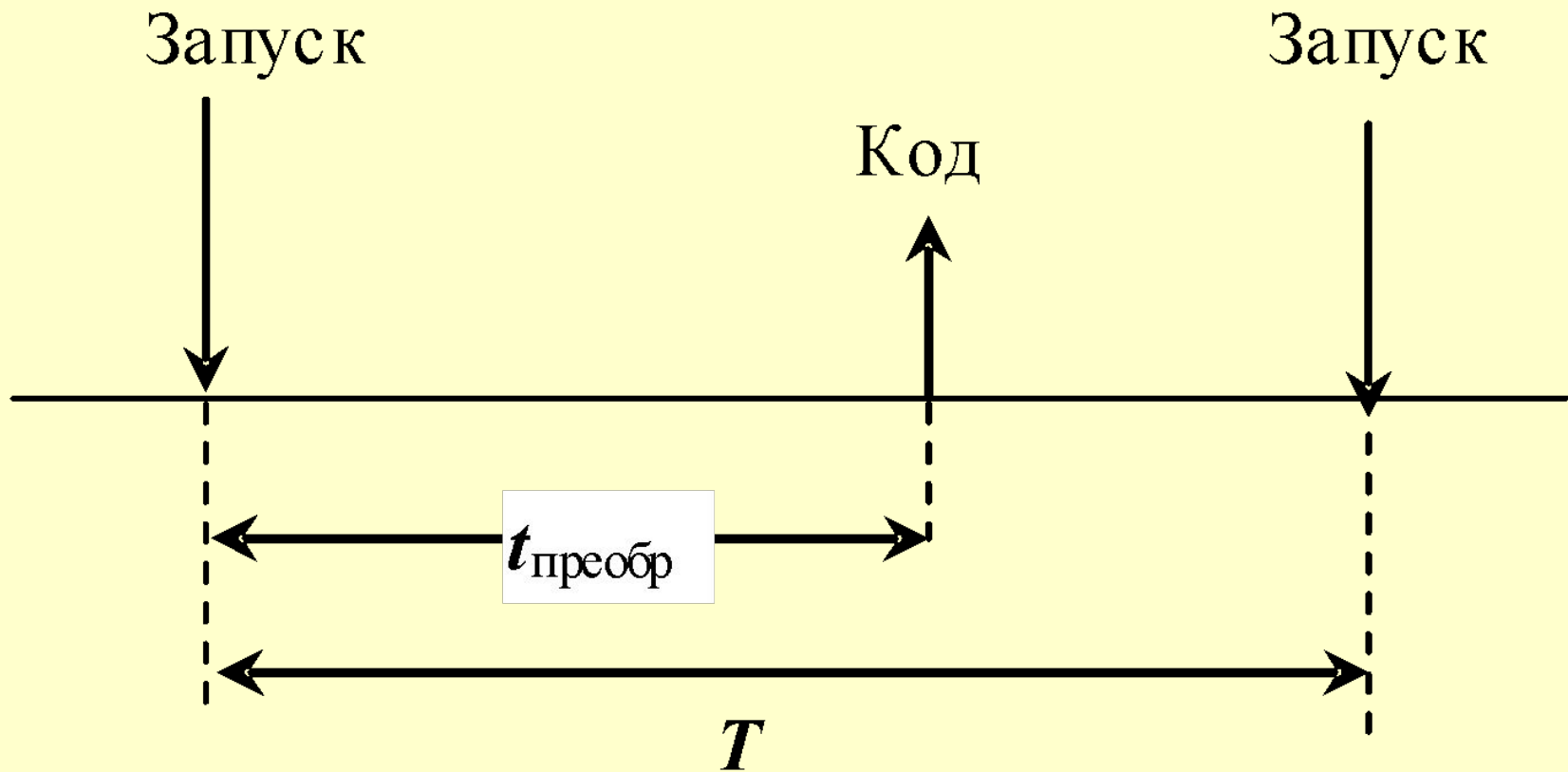


Рис. 7-1

## 6. Помехоустойчивость (П).

Наиболее часто этот термин используют для оценки способности АЦП, предназначенных для измерения постоянного или медленно меняющегося напряжения, подавлять помеху частоты питающей сети 50 Гц (или 60 Гц) путем интегрирования измеряемого сигнала. Дело в том, что несмотря на экранирование и фильтрацию входного сигнала остаток сетевой помехи ограничивает возможности точного измерения постоянного напряжения. Помехоустойчивость определяют отношением (в дБ) напряжения сетевой помехи на входе АЦП к напряжению помехи на выходе:

$$П = 20 \lg U_{\text{помвх}} / U_{\text{помвых}}, \text{ дБ.}$$

## Типы АЦП.

### 1.Время – импульсные АЦП.

Исторически это самый первый практически реализованный тип преобразователей «напряжение код». Принцип действия ВИ АЦП основан на формировании импульса, длительность которого пропорциональна измеряемому напряжению. Длительность импульса измеряют цифровым измерителем временных интервалов с использованием меток времени (раздел 5). Схематически эти преобразования можно отобразить так:

$$U_x \rightarrow \Delta t_x \rightarrow N_x \rightarrow \text{код}$$

Нетрудно понять, что быстродействие таких АЦП принципиально ограничено, а время преобразования не постоянно. Разрешающая способность может быть довольно высокой. Одна из модификаций такого ВИ АЦП предусматривает подавление сетевой помехи.

## 2. Частотно-импульсные АЦП.

Принцип действия ЧИ АЦП основан на формировании последовательности импульсов, частота следования которых пропорциональна измеряемому напряжению. Частоту импульсов измеряют электронно-счетным частотомером. Схематически это преобразование можно отобразить так:

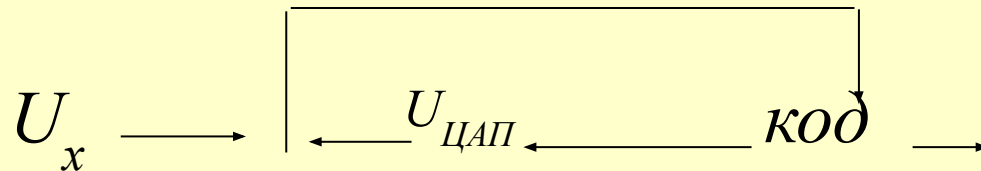
$$U_x \rightarrow f_x \rightarrow N_x \rightarrow \text{код}$$

Поскольку для измерения частоты методом дискретного счета требуется достаточно большой интервал времени, такие АЦП имеют принципиально ограниченное быстродействие, но достаточно высокую разрешающую способность.

Поскольку накопление импульсов в счетчике эквивалентно операции интегрирования входного напряжения, можно создать помехоустойчивый АЦП если время счета сделать равным или в целое число раз больше периода сетевой помехи.

### 3.Кодо-импульсные АЦП.

Принцип работы КИ АЦП основан на применении устройств, выполняющих обратную операцию – операцию преобразование кода в напряжение. Измеряемое напряжение  $U_x$  сравнивают с напряжением  $U_{ЦАП}$  цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), входной код которого формируют по определенному алгоритму. Иногда такую операцию определяют терминами «уравновешивание» или «компенсация». При достижении условия приближенного (в пределах уровня квантования) равенства  $U_{ЦАП}$  измеряемому напряжению  $U_x$  полученный код подают на выход АЦП:

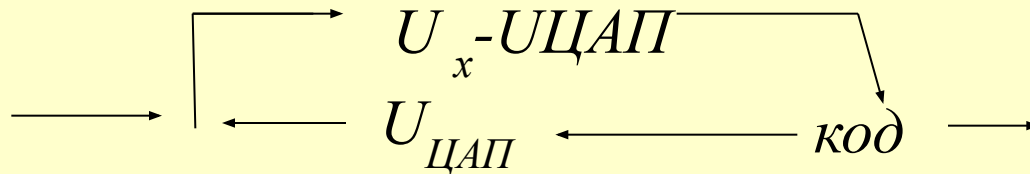




Эта идея многократно обыграна в детективной литературе и кинематографе – подбор злоумышленником кода к сейфу. КИ АЦП могут иметь 17 (по сравнению с ВИ и ЧИ АЦП), но несколько ограниченную разрешающую способность, которая определяется разрядностью используемого ЦАП.

## 4. Сигма-дельта ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) АЦП.

АЦП этого типа появились сначала как «боковая ветвь» КИ АЦП с обратной связью, анализирующих приращения измеряемого сигнала, кодирующих разность ( $U_x - U_{ЦАП}$ ), и на этой основе отслеживающих изменения измеряемого напряжения:



Детальная проработка этой идеи позволила создать следующие  $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП с очень высокой разрешающей способностью и помехоустойчивостью за счет, разумеется, уменьшения быстродействия.

## 5. АЦП параллельного преобразования.

В таких АЦП на основе резистивной матрицы создают совокупность  $N-1$  эталонных значений напряжения, соответствующих всем возможным уровням квантования (Рис. 7-2). Измеряемое напряжение с использованием  $N-1$  компараторов одновременно сравнивают с этими эталонными значениями, что позволяет очень быстро сформировать выходной код.

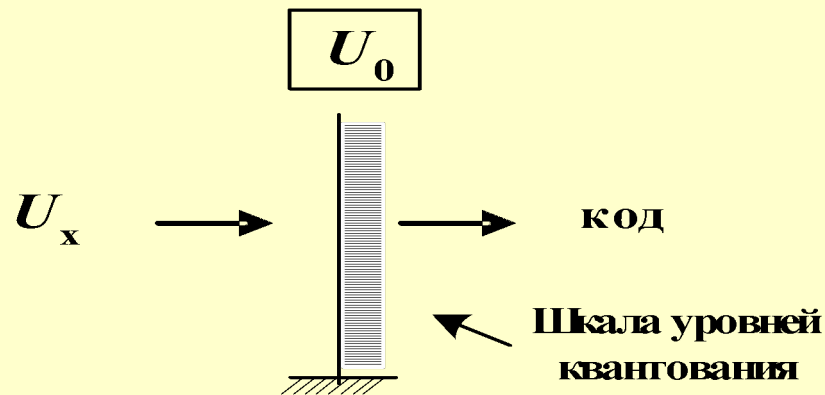
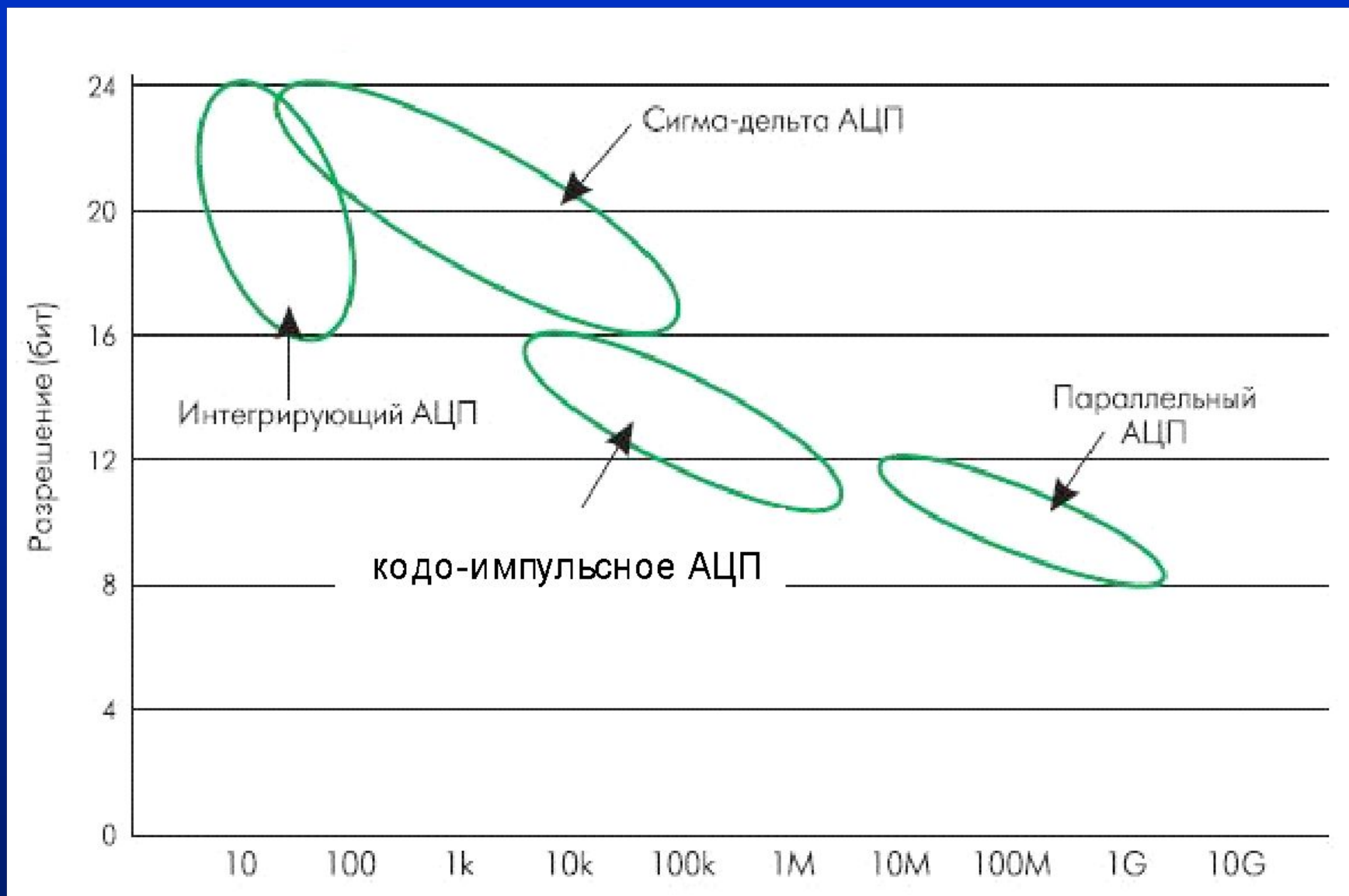


Рис. 7-2

Быстродействие таких АЦП может достигать нескольких миллиардов измерений в секунду, однако их разрешающая способность ограничена технологическими возможностями создания большого количества компараторов и других элементов в корпусе одной микросхемы.

Соотношение разрешающей способности и быстродействия основных типов АЦП «напряжение- код» представлено на рис. 7-3.



**Рис. 7-3.**

## **ВИ АЦП однотоактного интегрирования.**

Исторически это первый практически реализованный и самый несложный по конструкции тип АЦП, на основе которого были созданы первые цифровые вольтметры относительно невысокой точности. Хотя в настоящее время преобразователи этого типа используют редко, однако эту идею полезно представлять для понимания работы более сложных АЦП.

Упрощенная структурная схема АЦП однотоактного интегрирования (иногда его называют преобразователем с пилообразным опорным напряжением) представлена на рис. 7-4.

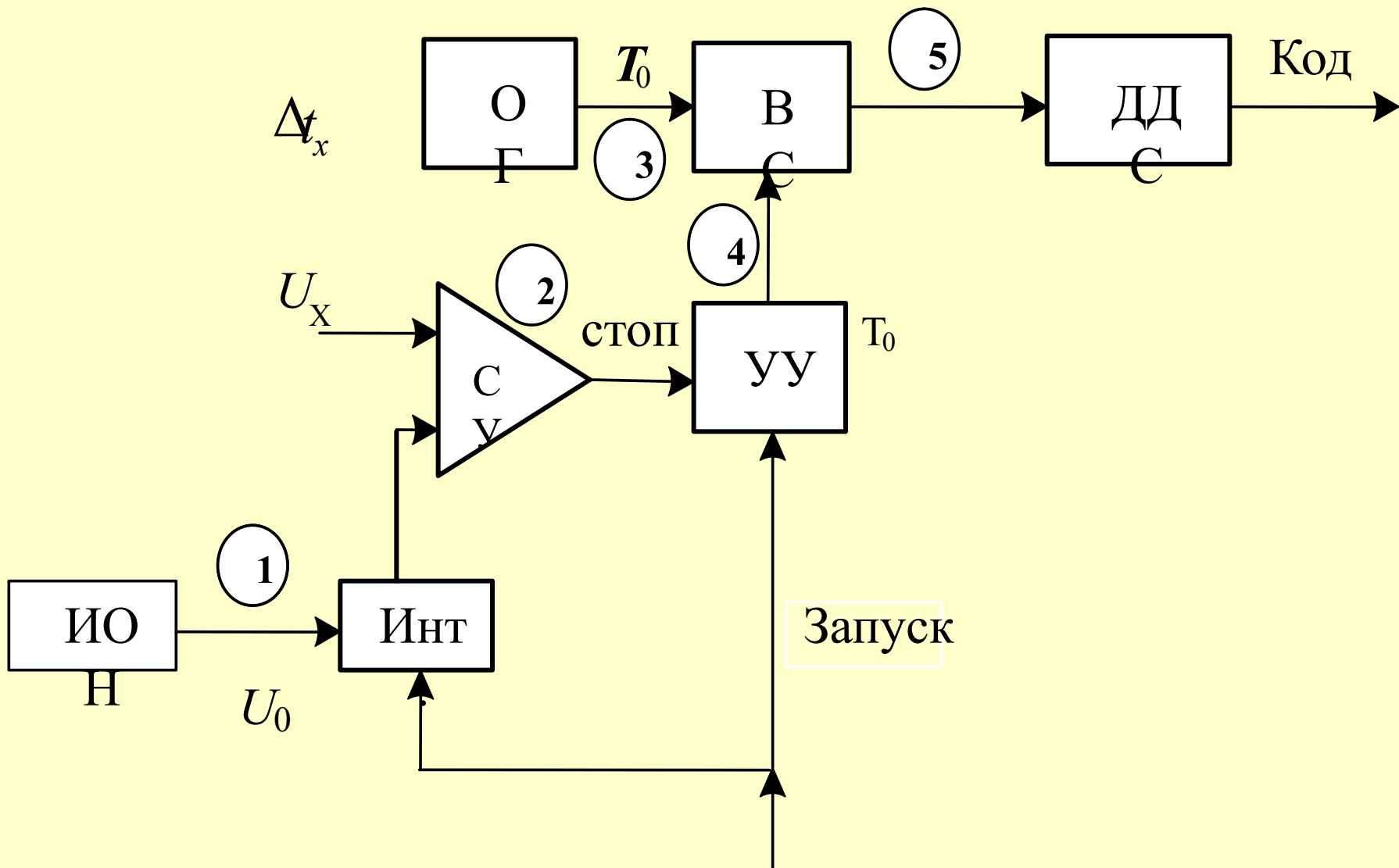


Рис. 7-4

## **Условные обозначения на этой схеме:**

ОГ – опорный генератор,

ВС – временной селектор,

ДДС – двоично-десятичный счетчик,

УУ – устройство управления (комбинация триггеров), которое обеспечивает запуск интегратора Инт, включение и выключение временного селектора ВС.

Эти четыре узла схемы реализуют цифровой измеритель интервалов времени (разд. 5),

ИОН – источник постоянного опорного напряжения  $U_0$ ,

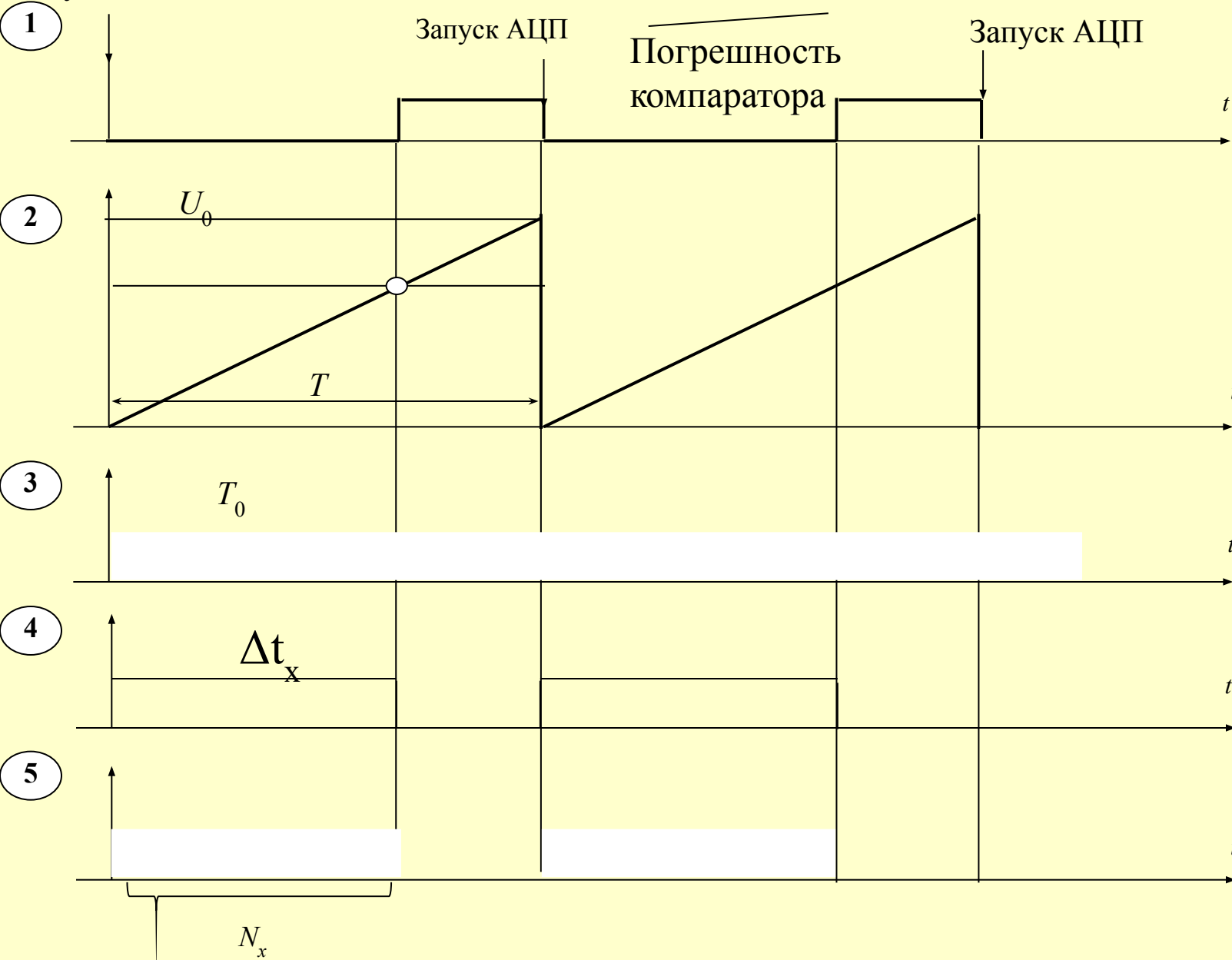
Инт – интегратор, формирующий опорный сигнал пилообразной формы путем интегрирования постоянного напряжения  $U_0$ ,

СУ – сравнивающее устройство (компаратор), которое формирует сигнал логической «1» когда пилообразное опорное напряжение на выходе интегратора Инт превысит измеряемое напряжение.



# Временные диаграммы работы АЦП представлены на рис. 7-5.

Запуск АЦП



$$N_x = \frac{\Delta t_x}{T_0}$$

$$\frac{\Delta f_x}{T_0} = \frac{U_x \Psi}{U_0 \Psi_0}$$

После прихода импульса запуска АЦП устройство управления УУ выдает команду на формирование пилообразного напряжения интегратором Инт, одновременно открывает временной селектор ВС и импульсы опорного генератора ОГ поступают на счетчик ДДС. Как только пилообразное напряжение на выходе интегратора становится больше измеряемого, на выходе компаратора СУ появляется сигнал логической единицы, который закрывает временной селектор. В итоге в счетчике ДДС будет зафиксировано количество импульсов  $N_x$ , пропорциональное измеряемому напряжению  $U_x$ . По диаграммам рис. 7-5 можно определить взаимосвязь этих величин:

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{\Delta t_x}{T} \Rightarrow \Delta t_x = \frac{T U_x}{U_0} \quad N_x = \frac{\Delta t_x}{T_0} = \frac{T U_x}{T_0 U_0}$$

Таким образом, показания АЦП определяются «мгновенным» значением измеряемого напряжения в момент срабатывания компаратора.

Интересно заметить, что если импульсы запуска АЦП формировать путем пересчета импульсов опорного генератора, т.е. период запуска сделать пропорциональным метке времени  $T_0$ , то отношение  $T/T_0$  будет постоянной величиной  $N$ , равной максимальному количеству меток времени между импульсами запуска АЦП. При этом показания счетчика не будут зависеть от периода меток времени ( $Nx = N Ux / U_0$ ) и, соответственно, погрешность опорного генератора будет слабо влиять на точность измерений. Впрочем, эту возможность практически не использовали, поскольку суммарная погрешность такого АЦП определяется, не погрешностью ОГ, а нелинейностью пилообразного напряжения.

# Характеристики ВИ АЦП однопериодного интегрирования:

1. Диапазон измерения определяется размахом пилообразного напряжения, т.е. значением  $U_0$ ,

2. Разрешающая способность (количество уровней квантования) определяется максимальным числом импульсов  $N$ , соответствующим диапазону измерения АЦП:  $N = T/T_0$ .

Казалось бы, если выбрать  $T = 1\text{с}$  (при этом быстродействие составит 1 измерение в секунду) и  $T_0 = 1\text{мкс}$ , то разрешающую способность АЦП можно сделать очень большой:  $N = 10^6$ . Однако на практике это оказалось нецелесообразным, поскольку при низкой помехоустойчивости такого АЦП (об этом ниже) нет смысла добиваться высокой разрешающей способности и точности измерений. Реально АЦП однопериодного интегрирования обеспечивали разрешение порядка  $N = 10^3$ , а соответствующие цифровые вольтметры имели, как правило, только 3 десятичных разряда. Впрочем, при таком низком разрешении можно было обеспечить довольно высокое для первых АЦП быстродействие - порядка  $10^4$  изм/с.

3. Погрешность определяется, как правило, не погрешностью кантования, а свойствами отдельных элементов его схемы:

опорного генератора,

компаратора (соответствующая погрешность аналогична погрешности «уровня запуска» цифровых измерителей интервалов времени),

источника опорного напряжения,

нелинейностью пилообразного напряжения, формируемого интегратором. Именно эта составляющая вносит основной вклад в суммарную погрешность ВИ АЦП однотоктного интегрирования.

4.Быстродействие  $B=1/T$  таких АЦП можно менять в достаточно широких пределах – от одного измерения в несколько секунд до  $10^4$  изм./с.

5.Время преобразования является переменным и зависит от значения измеряемого напряжения (практически это не очень удобно);

6. Помехоустойчивость  $P=0$ , поскольку его схема не обеспечивает подавление сетевой помехи. Именно вследствие низкой помехоустойчивости АЦП однотоктного интегрирования в настоящее время практически не используют.

## **ВИ АЦП двухтактного интегрирования.**

Долгое время это был самый точный и помехоустойчивый тип АЦП для точных цифровых вольтметров постоянного напряжения, которые должны иметь высокую разрешающую способность при низком быстродействии. Обеспечение помехоустойчивости ВИ АЦП ДИ с точки зрения подавления сетевой помехи основано на интегрировании измеряемого напряжения  $U_x$  на интервале времени, равном или кратном периоду сетевой помехи  $\cong 20$  мс ( $\cong 1/50$  Гц). Интеграл от постоянной составляющей  $U_x$  будет постоянной величиной, а сетевая помеха будет существенно подавлена. Поскольку частота сети может несколько отклоняться от значения 50 Гц, длительность такта интегрирования подстраивают под эти изменения. Упрощенная структурная схема ВИ АЦП ДИ представлена на рис. 7-6.

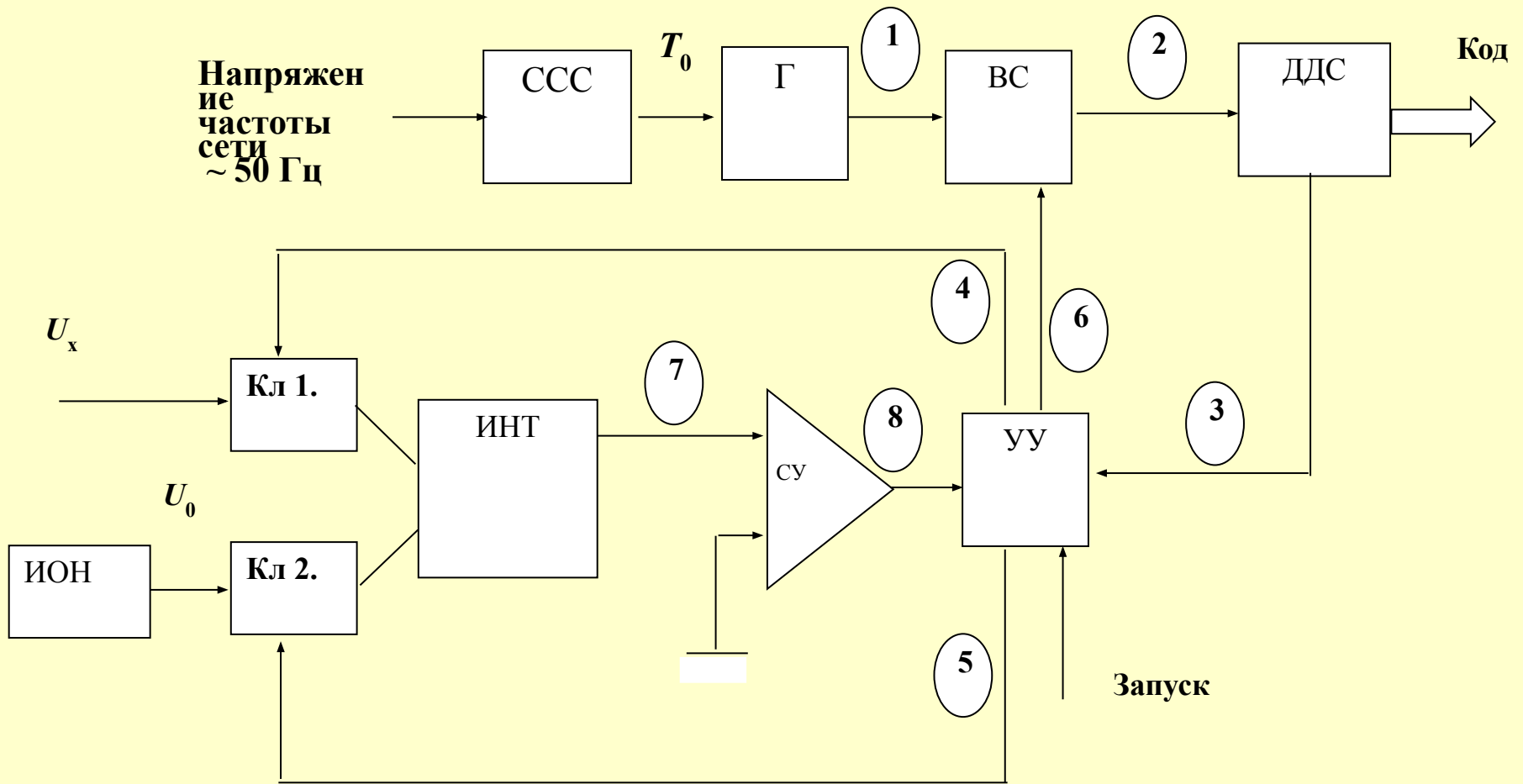


Рис. 7.6



## Условные обозначения на этой схеме:

ГТИ – генератор тактовых импульсов, частота следования которых подстраивается схемой синхронизации ССС под частоту питающей сети. При этом частота ГТИ представляет собой  $N$ -ю гармонику частоты сети. Например, если  $N = 20000$ , то частота тактовых импульсов будет равна  $N \times 50 \text{Гц} = 1 \text{МГц}$ ;

УУ - устройство управления (микропроцессор);

ВС – временной селектор;

ДДС – двоично-десятичный счетчик, объем памяти которого равен  $N$  – это число определяет разрешающую способность АЦП;

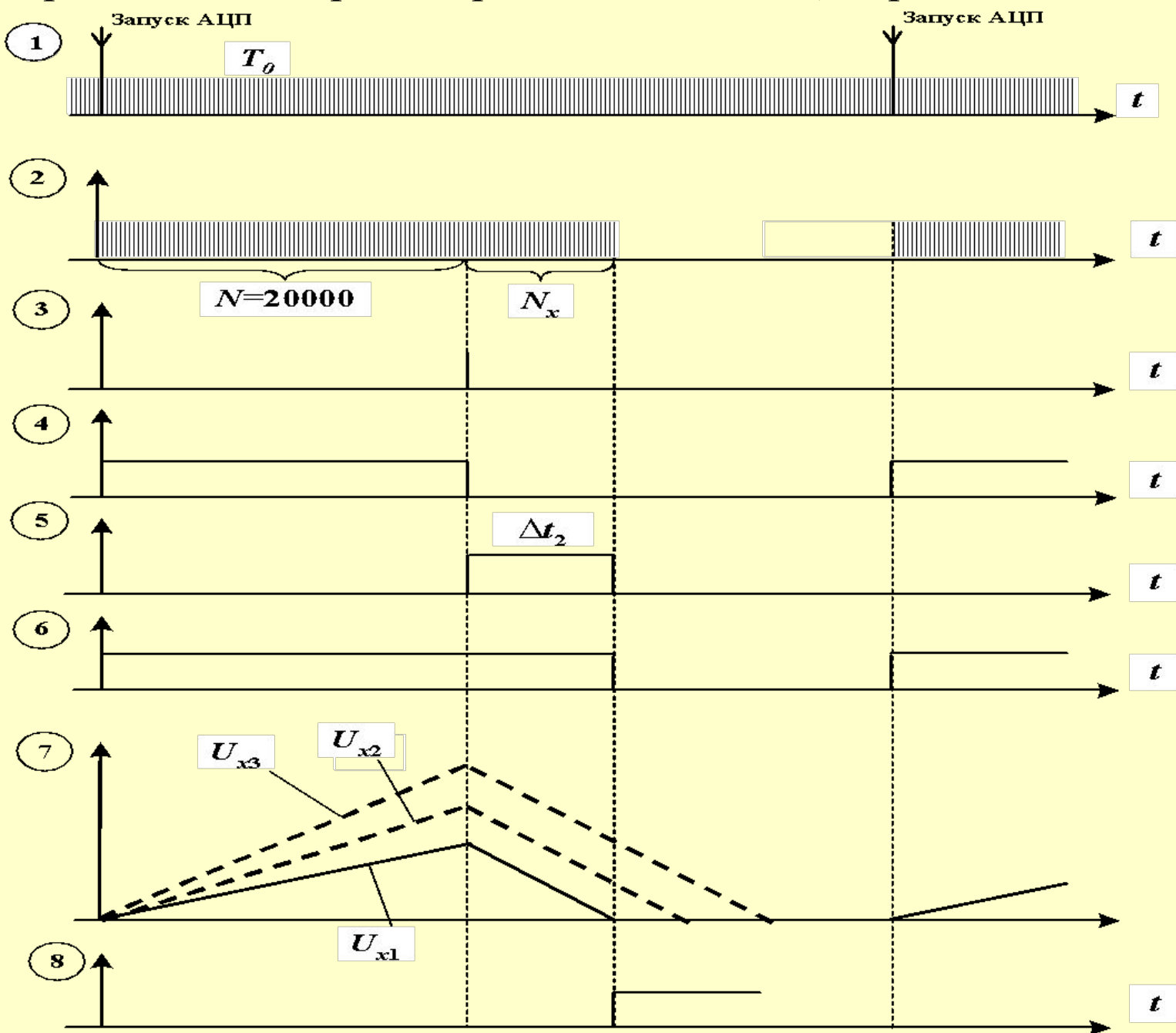
СУ – сравнивающее устройство (компаратор);

ИНТ – интегратор с постоянной времени RC;

Кл1 – ключ, с помощью которого устройство управления УУ подключает измеряемое напряжение на вход интегратора на интервал времени первого такта интегрирования;

Кл2 – ключ, с помощью которого устройство управления УУ подключает источник опорного напряжения ИОН на вход интегратора в полярности, противоположной полярности измеряемого напряжения.

Временные диаграммы работы такого АЦП представлены на рис. 7-7.



Цикл работы этой упрощенной схемы разбит на 2 этапа. На первом этапе УУ включает ключ 1 на интервал времени, длительность которого равна или кратна периоду частоты сети – приблизительно 20мс (так как частота сети не постоянна и несколько отличается от 50 Гц). Для формирования этого интервала используется счетчик ДДС, объем памяти которого должен быть равным N (для данного примера число N должен быть равным 20000 импульсов). Импульс переполнения ДДС передается в устройство управления УУ, которое заканчивает первый такт. В итоге результат интегрирования измеряемого напряжения  $U_x$  будет постоянной величиной, мало зависящей от сетевой гармонической помехи.

На втором такте интегратор разряжается до нуля известным напряжением ИОН  $U_0$ ., которое устройство управления УУ подключает к входу интегратора в полярности, противоположной полярности измеряемого напряжения (на упрощенной схеме рис. 7-7 устройство изменения полярности подключения ИОН не показано).

Момент времени разряда интегратора регистрирует компаратор (сравнивающее устройство СУ) и устройство управления УУ закрывает временной селектор. В результате длительность второго такта и соответственно, число импульсов, регистрируемое ДДС, окажутся пропорциональными измеряемому напряжению:

$$\frac{1}{RC} \int_0^{\Delta t_1} U_x dt = \frac{1}{RC} \int_0^{\Delta t_2} U_0 dt \Rightarrow U_x \Delta t_1 = U_0 \Delta t_2$$

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{U_x}{U_0} = \frac{N}{N_x} \Rightarrow \Delta t_2 = U_x \frac{\Delta t_1}{U_0}$$

$$N_x = \frac{\Delta t_2}{T_0} \Rightarrow N = \frac{\Delta t_1}{T_0} \Rightarrow N_x = \frac{\Delta t_1}{T_0} \frac{U_x}{U_0} = U_x \frac{N}{U_0}$$

Следует обратить внимание на то, что постоянная времени интегратора RC и значение периода тактовых импульсов T<sub>0</sub> не входят в итоговую формулу для N<sub>x</sub>. Это значит, что свойства интегратора и нестабильность частоты ГТИ будут мало влиять на суммарную погрешность такого АЦП.

## Характеристики ВИ АЦП ДИ:

Диапазон измерения определяется напряжением ИОН  $U_0$ .

Разрешающая способность определяется числом  $N$  - количеством уровней квантования, т.е. максимальным числом импульсов, накапливаемых в ДДС.

Для увеличения разрешающей способности и помехоустойчивости АЦП можно увеличить длительность первого такта интегрирования - сделать его в целое число раз больше периода частоты сети (до нескольких секунд). Однако практически оказалось проще и более эффективно увеличить количество циклов заряда и разряда интегратора и накапливать в ДДС суммарное число импульсов. Увеличение объема памяти ДДС вплоть до  $N = (1...3) \times 10^7$  позволяет обеспечить очень высокую разрешающую способность такого АЦП «многотактного» интегрирования за счет уменьшения быстродействия до одного измерения в несколько секунд. Но для точных цифровых вольтметров постоянного напряжения высокое быстродействие не требуется.

Погрешность определяется погрешностью квантования и погрешностями отдельных элементов схемы:

источника опорного напряжения ИОН,

компаратора (соответствующая погрешность аналогична погрешности «уровня запуска» цифровых измерителей интервалов времени),

источника опорного напряжения,

ключей (в частности, вследствие нестабильности их сопротивления в открытом и закрытом состоянии),

интегратора, который вносит относительно небольшой вклад в суммарную погрешность АЦП (в частности, на погрешность не влияет нестабильность постоянной времени интегратора),

Суммарная погрешность АЦП ДИ может в 2...5 раз превышать погрешность квантования – это соотношение зависит от его стоимости.

Быстродействие принципиально ограничено и не может быть выше значения  $B = 1/(2\Delta t1) = 25$  изм/с. Однако для точных цифровых вольтметров практически достаточно одного измерения в несколько секунд – именно поэтому быстродействие «обменивают» на точность и помехоустойчивость.

Время преобразования - не постоянно и зависит от измеряемого напряжения.

Помехоустойчивость  $\Pi$  - очень высокая и достигает значений 60...80дБ, что и позволяет создавать очень точные цифровые вольтметры.

Практические схемы АЦП ДИ значительно сложнее, чем схема рис. 7-7, в частности, обязательно вводится третий такт интегрирования - при закороченном входе. Это позволяет обнаружить и исключить в дальнейшем соответствующую систематическую погрешность - автоматически выполнить операцию «установки нуля».

Надо отметить, что в последнее десятилетие ВИ АЦП ДИ начали терять свою лидирующую роль точных и помехоустойчивых АЦП, уступая постепенно так называемым «сигма – дельта» АЦП.



## Частотно – импульсные АЦП

Это также достаточно точный и помехоустойчивый тип интегрирующего АЦП, который некоторое время конкурировал с АЦП двухтактного интегрирования на рынке точных цифровых вольтметров постоянного напряжения. Но постепенно он «проиграл в соревновании» с АЦП двухтактного интегрирования, в частности потому, что не удалось обеспечить эффективную подстройку интервала интегрирования под изменение частоты сетевой помехи.

Структурная схема ЧИ АЦП, представленная на рис. 7-8, образована последовательным соединением двух узлов. Первый узел преобразует измеряемое постоянное напряжение в импульсный сигнал, частота которого прямо пропорциональна этому напряжению (несколько жаргонно такое устройство называют преобразователем «напряжение частота» - ПНЧ). Второй узел - обычный электронно-счетный частотомер (ЭСЧ), принципы работы и источники погрешностей которого подробно рассмотрены в разделе 5.

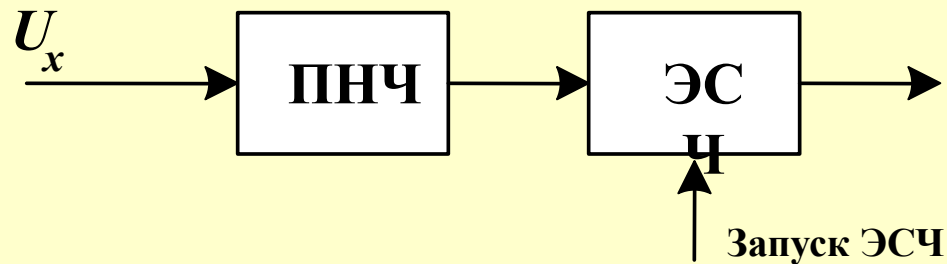


Рис. 7-8

Если выбрать время измерения ЭСЧ  $\Delta t_0$  кратным периоду сетевой помехи  $0,02c$  (например,  $\Delta t_0 = 1c$ ), то суммарное число импульсов  $N_x = [f_x \Delta t_0]$ , регистрируемых счетчиком, не будет зависеть от наличия сетевой помехи в измеряемом постоянном напряжении  $U_x$ . Таким образом, ЧИ АЦП также является интегрирующим и помехоустойчивым преобразователем.

Идеальный ПНЧ должен обеспечивать прямо пропорциональную зависимость частоты выходного сигнала от измеряемого напряжения  $U_x$ :  $f_x = k_{\text{ПНЧ}} U_x$ .

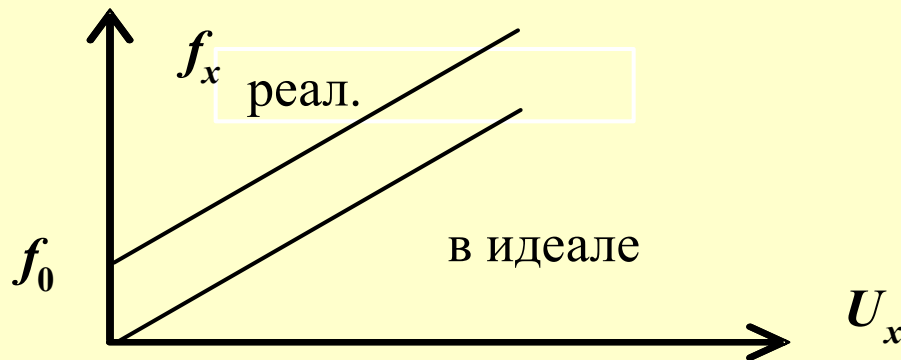


Рис. 7-9

В реальных ПНЧ начальная частота  $f_0$  при  $U_x=0$  имеет конечное значение, но соответствующую систематическую погрешность нетрудно исключить различными способами, в частности, путем предустановки двоично-десятичного счетчика частотомера.

## Характеристики ЧИ АЦП:

1. Диапазон измерения  $U_0$  определяется свойствами преобразователя «напряжение – частота» (ПНЧ), в состав которого входит источник опорного напряжения  $U_0$ .

2. Разрешающая способность может быть достаточно высокой –  $N=10^5\dots10^7$ , если время счета в ЭСЧ выбрать достаточно большим (1...3 с).

3. Суммарная погрешность определяется:

- погрешностью квантования,
- погрешностью опорного генератора,
- погрешностью ПНЧ, которая обусловлена, в основном, нелинейностью зависимости  $f_x(U_x)$

4. Быстродействие  $B = 1/(\Delta t_0 + \Delta t_{\text{подготовки}})$  – как правило, его выбирают не выше одного измерения в секунду.

5. Время преобразования  $\Delta t_{\text{пр}} = \Delta t_0$  - постоянная величина.

6. Помехоустойчивость  $\Pi = (40..50)\text{дБ}$ . Относительно невысокая помехоустойчивость обусловлена трудностями практической реализации подстройки времени интегрирования (времени счета  $\Delta t_0$ ) под изменения частоты сетевой помехи.

В настоящее время ЧИ АЦП проиграли в соревновании с АЦП двухактного интегрирования и «сигма-дельта» АЦП.

## Кодо – импульсные АЦП.

Принцип работы КИ АЦП основан на использовании преобразователей кода в напряжение – цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Упрощенная структурная схема ЦАП и зависимость его выходного напряжения от значений входного двоичного кода представлены на рис. 7-10.

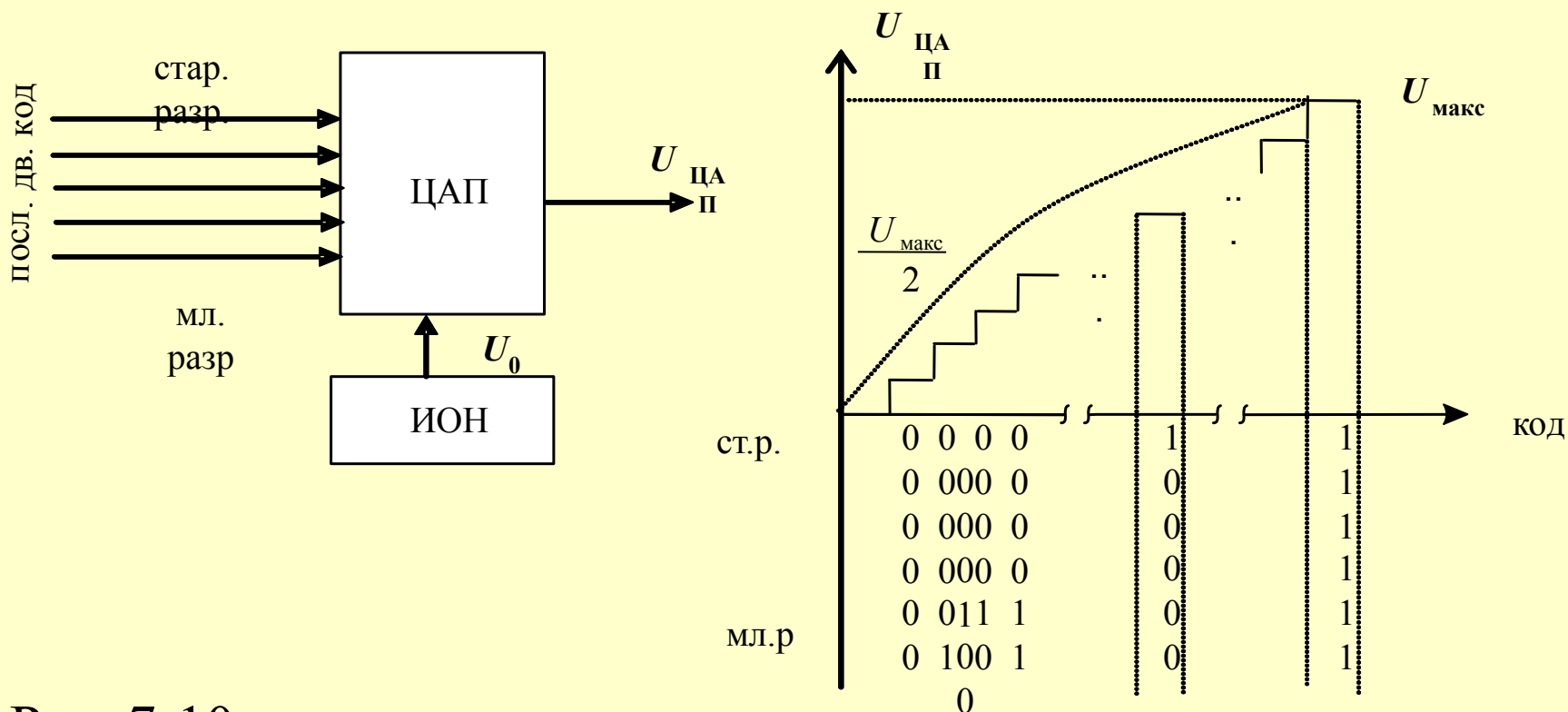


Рис. 7-10

В исходном состоянии, при подаче кода «все нули» выходное напряжение ЦАП  $U_{ЦАП}$  устанавливается равным половине цены единицы младшего разряда. Это смещение обеспечивает устранение систематической составляющей погрешности квантования (раздел 4). При появлении «1» в младшем разряде входного кода значение  $U_{ЦАП}$  увеличивается на минимально возможное значение – на значение шага квантования. При постепенном увеличении кода значение напряжения  $U_{ЦАП}$  пропорционально растет, достигая максимально возможного значения при подаче кода «все единицы», соответствующего диапазону ЦАП. Для дальнейшего понимания работы КИ АЦП важно заметить, что при подаче кода «1 только в старшем разряде» значение  $U_{ЦАП}$  будет приблизительно равно (в пределах цены младшего разряда) половине диапазона ЦАП.

## Характеристики ЦАП:

1. Диапазон определяется напряжением ИОН  $U_0$ ,
2. Разрешающая способность – числом разрядов  $n$  двоичного кода,
3. Суммарная погрешность ЦАП кроме принципиальной погрешности квантования имеет следующие составляющие:

- погрешность источника опорного напряжения,
- погрешность «установки нуля»,
- погрешность установки максимального значения выходного напряжения ,
- погрешность дифференциальной нелинейности, которая обусловлена возможным различием значений «ступенек» выходного напряжения,
- погрешность интегральной нелинейности выходного напряжения.

У «хороших» ЦАП суммарная погрешность находится в пределах 2...3 погрешностей квантования:  $\delta\Sigma\text{ЦАП} = \pm (2...3)\delta_{кв}$  .



4.Время установления выходного напряжения  
*тустЦАП*. При скачкообразном изменении входного кода напряжение ЦАП изменяется не мгновенно, а по экспоненте вследствие наличия паразитной емкости. Чем выше разрядность ЦАП, тем больше времени требуется для установления выходного напряжения с погрешностью меньшей, чем цена единицы младшего разряда. Например, у 8–разрядного ЦАП время установления может составлять 0,1 мкс, а у 16-разрядного - на порядок больше. Соответственно надо будет медленнее изменять значения кода, что скажется на быстродействии АЦП.

Структурная схема кодоимпульсного АЦП приведена на рис. 7-11.

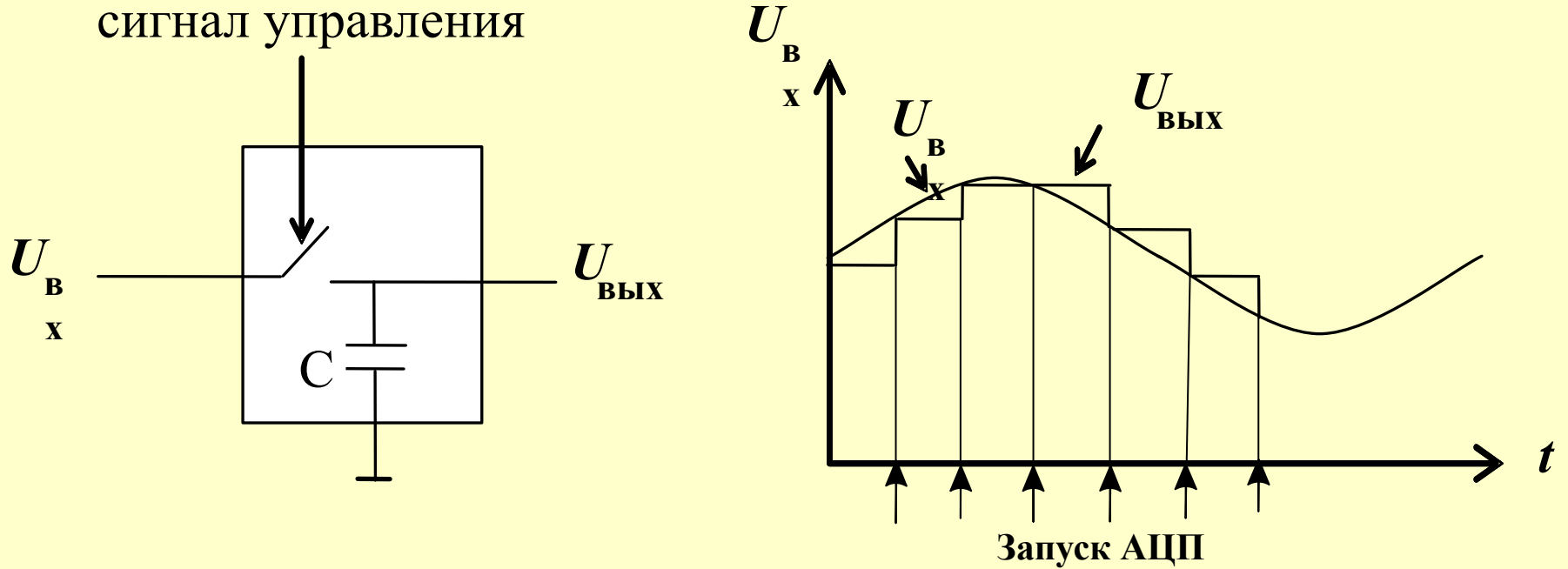


Рис. 7-11

Условные обозначения:

УВХ – устройство «выборки–хранения»,

ГТИ – генератор тактовых импульсов,

СУ – сравнивающее устройство (компаратор),

УУ – устройство управления,

ЦАП – цифроаналоговый преобразователь.

Первый узел КИ АЦП - устройство «выборки–хранения» (УВХ) - аналоговый дискретизатор, запоминающий «мгновенное» значение измеряемого напряжения на время его последующего преобразования в цифровой код. Упрощенно УВХ представляет собой комбинацию ключа и конденсатора (рис.7-12).

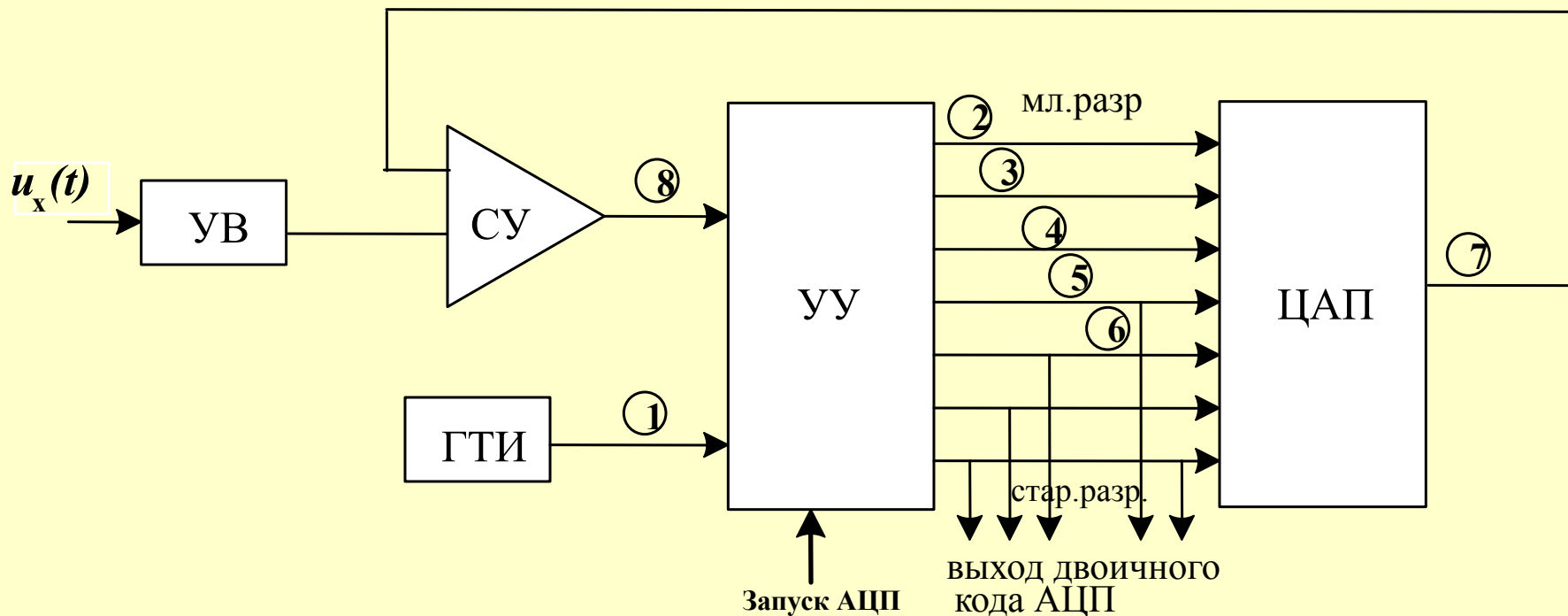


Рис. 7-12

По фронту импульса запуска АЦП конденсатор быстро заряжается, а затем отключается от входа УВХ.

В устройствах управления (УУ) КИ АЦП используют следующие три основных алгоритма формирования кода ЦАП (иногда в литературе используют термин «алгоритм уравнивания»).

## 1. Алгоритм последовательного счета.

Для реализации алгоритма последовательного счета в устройстве управления используют обычный двоичный счетчик. После прихода импульса запуска АЦП содержимое этого счетчика с каждым тактовым импульсом увеличивается на единицу и, соответственно, напряжение на выходе ЦАП возрастает на шаг квантования - на одну минимально возможную «ступеньку» (рис. 7-13). В какой-то момент времени напряжение на выходе ЦАП превзойдет измеряемое напряжение  $U_x$  и на выходе компаратора (СУ) появится сигнал логической «1», который блокирует счетчик УУ. При этом двоичный код на счетчика приближенно (в пределах шага квантования) будет соответствовать «мгновенному» значению измеряемого напряжения, запомненного устройством «выборки–хранения».

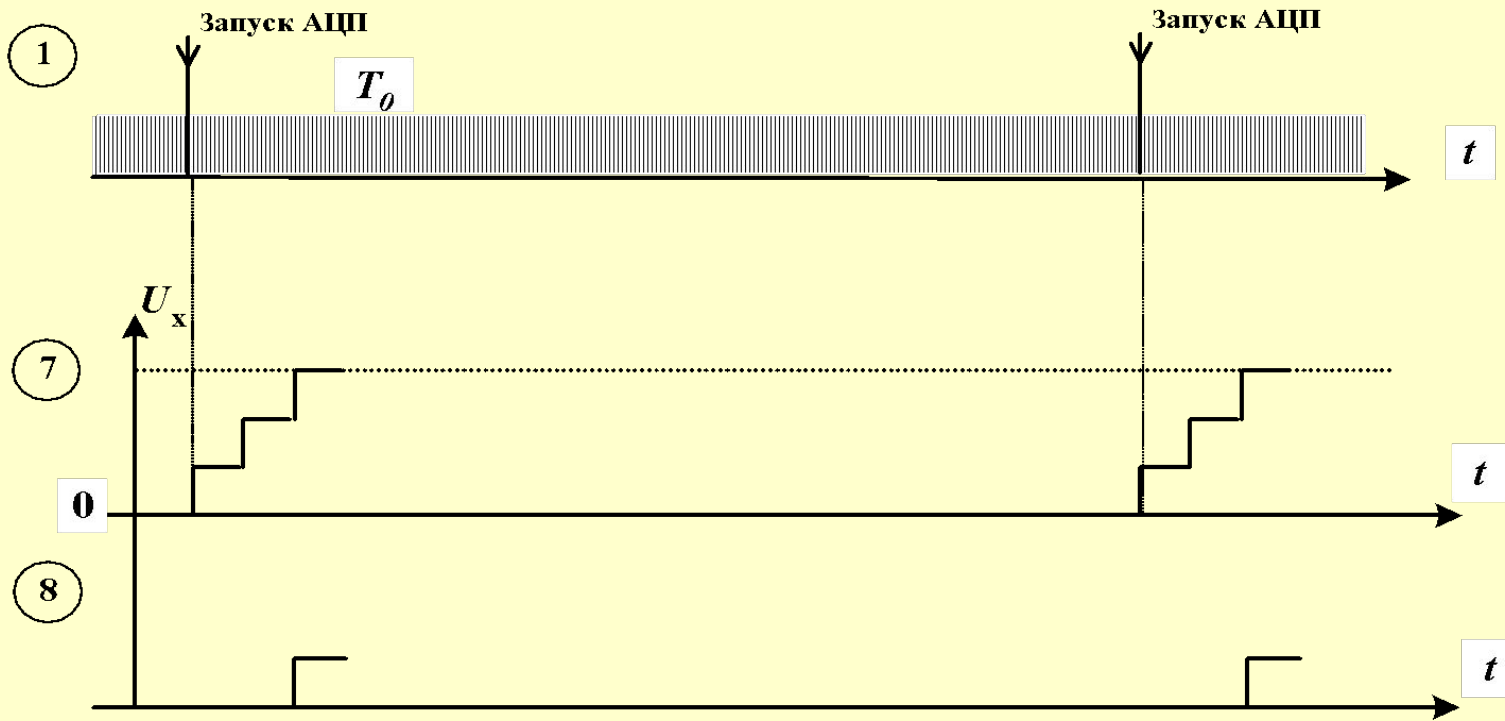


Рис. 7-13

Очевидно, что алгоритм последовательного счета не эффективен с точки зрения времени преобразования и быстродействия. Время преобразования зависит от номера уровня квантования, соответствующего значению измеряемого напряжения  $U_x$ :

$$t_{пр} = N_x \cdot t_{уст.ЦАП} = (2n) \cdot (U_x / U_0) \cdot t_{уст.ЦАП},$$

а его максимальное значение:

$$t_{пр.макс} = (2n) \cdot t_{уст.ЦАП}.$$

Соответственно, быстродействие КИ АЦП при использовании алгоритма последовательного счета получается относительно невысоким:

$B = 1/t_{np} = 1 / [(2n+1) \cdot t_{уст.ЦАП}]$  («+1» учитывает необходимость использования хотя бы одного тактового интервала для подготовки АЦП к следующему запуску). Однако у этого алгоритма есть и положительное свойство, обусловленное малыми приращениями выходного напряжения ЦАП при подборе кода, - при этом уменьшается уровень помех, влияющих на соседние узлы АЦП.

2. Алгоритм поразрядного уравнивания (иногда его называют алгоритмом «последовательного приближения») позволяет существенным образом повысить быстродействие КИ АЦП. Более сложное логическое УУ (специальный регистр или микропроцессор) по первому тактовому импульсу начинает процедуру уравнивания с формирования логической единицы только в старшем разряде входного кода ЦАП, (во всех остальных разрядах – «нули» - диаграмма 1, рис.7-14).



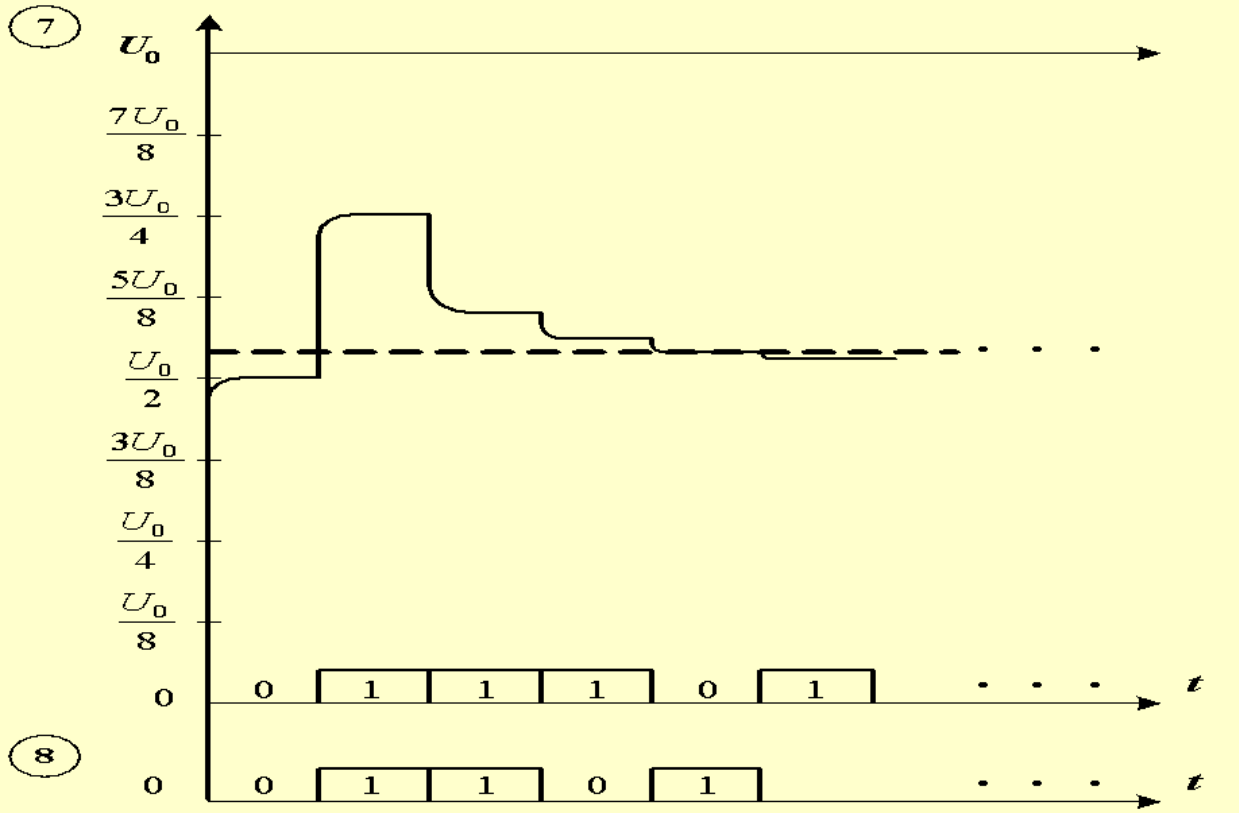
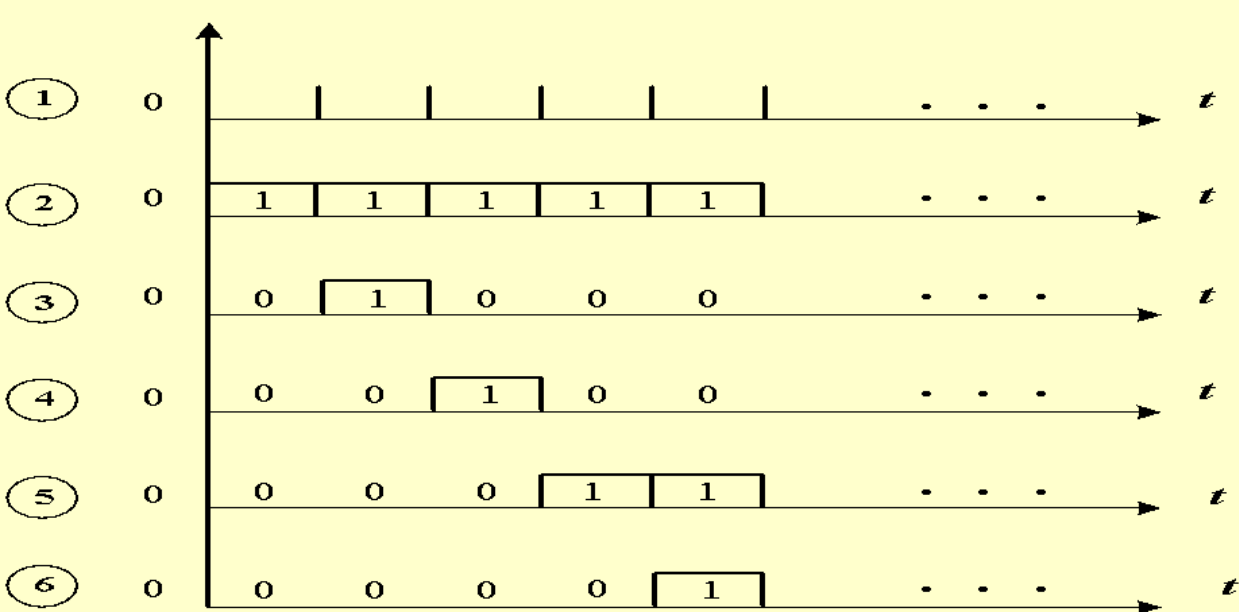


Рис. 7-14 <sup>57</sup>

При таком коде выходное напряжение ЦАП устанавливается равным половине диапазона измерения. Если компаратор (СУ) обнаруживает, что измеряемое напряжение более половины диапазона, то УУ сохраняет «1» в старшем разряде формируемого кода. Если же компаратор не сработал (измеряемое напряжение менее половины диапазона), то УУ изменяет состояние старшего разряда кода с «1» на «0». По следующему тактовому импульсу УУ формирует «1» на шине следующего (по уменьшению старшинства) разряда входного кода ЦАП и повторяет описанную выше процедуру до тех пор, пока не будет сформирован выходной код АЦП. Очевидно, что алгоритм поразрядного уравнивания обеспечивает существенно меньшее (и постоянное) время преобразования:

$$t_{np} = n \cdot t_{уст.ЦАП},$$

чем алгоритм последовательного счета. Соответственно, выше и быстродействие таких АЦП:

$$B = 1 / [(n \cdot t_{уст.ЦАП} + t_{подг})]$$

(при оценке быстродействия учтено время подготовки  $t_{подг}$  АЦП к следующему запуску).

Следует, однако, иметь ввиду, что время установления напряжения ЦАП *туст.ЦАП* - величина не постоянная и зависит от его разрядности. Например, 8-разрядный КИ АЦП поразрядного уравнивания может иметь время преобразование порядка десятых долей микросекунды, а 16-разрядный АЦП - несколько микросекунд.

«Хорошие» 12- разрядные КИ АЦП имеют быстродействие порядка  $1,5 \cdot 10^6$  изм/с, а 16-разрядные – порядка  $0,5 \cdot 10^6$  изм/с.

У алгоритма поразрядного уравнивания есть и недостаток, обусловленный большими скачками выходного напряжения ЦАП, достигающими половины диапазона измерения при включении старшего разряда кода. Это может вызывать появление специфических помех внутри корпуса модуля или микросхемы (так называемых «иголок»).

Характеристики КИ АЦП, использующих два рассмотренных выше алгоритмов уравнивания:

1. Диапазон измерения определяется источником опорного напряжения ЦАП -  $U_0$ ,

2. Разрешающая способность - количеством разрядов ЦАП  $n$ , обеспечивающим  $N=2n$  уровней квантования,

3. Суммарная погрешность определяется

- погрешностью УВХ,
- погрешностью ЦАП (которая включает погрешность квантования),
- погрешностью компаратора.

4. Время преобразования  $t_{пр}$  и

5. Быстродействие  $B$  зависят от используемого алгоритма уравнивания (формулы приведены выше).

Например, недорогой АЦП на 10 дв. разрядов, использующий ЦАП с временем установления выходного напряжения 1 мкс будет иметь быстродействие :

$B = 1/(1024 \cdot 10^{-6}) = 976$  изм/с при алгоритме последовательного счета и

$B = 1/(11 \cdot 10^{-6}) = 91000$  изм/с при алгоритме поразрядного уравнивания (в предположении, что время подготовки занимает один такт).

6. Помехоустойчивость  $P = 0$  (в отношении подавления сетевой помехи), однако это не следует рассматривать как недостаток, поскольку основное назначение КИ АЦП – оцифровка достаточно высокочастотных сигналов, а не точное измерение постоянного напряжения.

### 3. Алгоритм следящего уравнивания

Принципиальное отличие этого алгоритма работы КИ АЦП от двух рассмотренных выше состоит в том, что полученный код  $i$ -того отсчета не сбрасывают в состояние «все нули», а используют как «первое приближение» для формирования кода следующего  $(i+1)$ -го отсчета. В итоге формируют код, отслеживающий изменения входного сигнала. Для реализации такого алгоритма в качестве устройства управления можно использовать реверсивный счетчик. Однако развитие этой идеи привело к появлению следящих преобразователей «напряжение-код» совершенно нового типа - так называемых сигма-дельта ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) АЦП.

## Сигма-дельта АЦП

Сигма- дельта ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) АЦП кодируют не непосредственно измеряемый сигнал  $U_x$ , а разность ( $U_x - U_{ЦАП}$ ) и проводят предварительную операцию «передискретизации» (несколько неудачный перевод англоязычного термина «oversampling») с частотой существенно большей, чем это требует теорема Котельникова (частота Найквиста). Это позволяет обеспечить высокую разрешающую способность и точность преобразователя при использовании одноразрядного (!) ЦАП.

Структурная схема простейшего двуполярного сигма- дельта АЦП (так называемого «первого порядка») представлена на рис. 7- 15.

*Структурная схема простейшего двуполярного сигма-дельта АЦП (так называемого «первого порядка») представлена на рис. 7-15.*

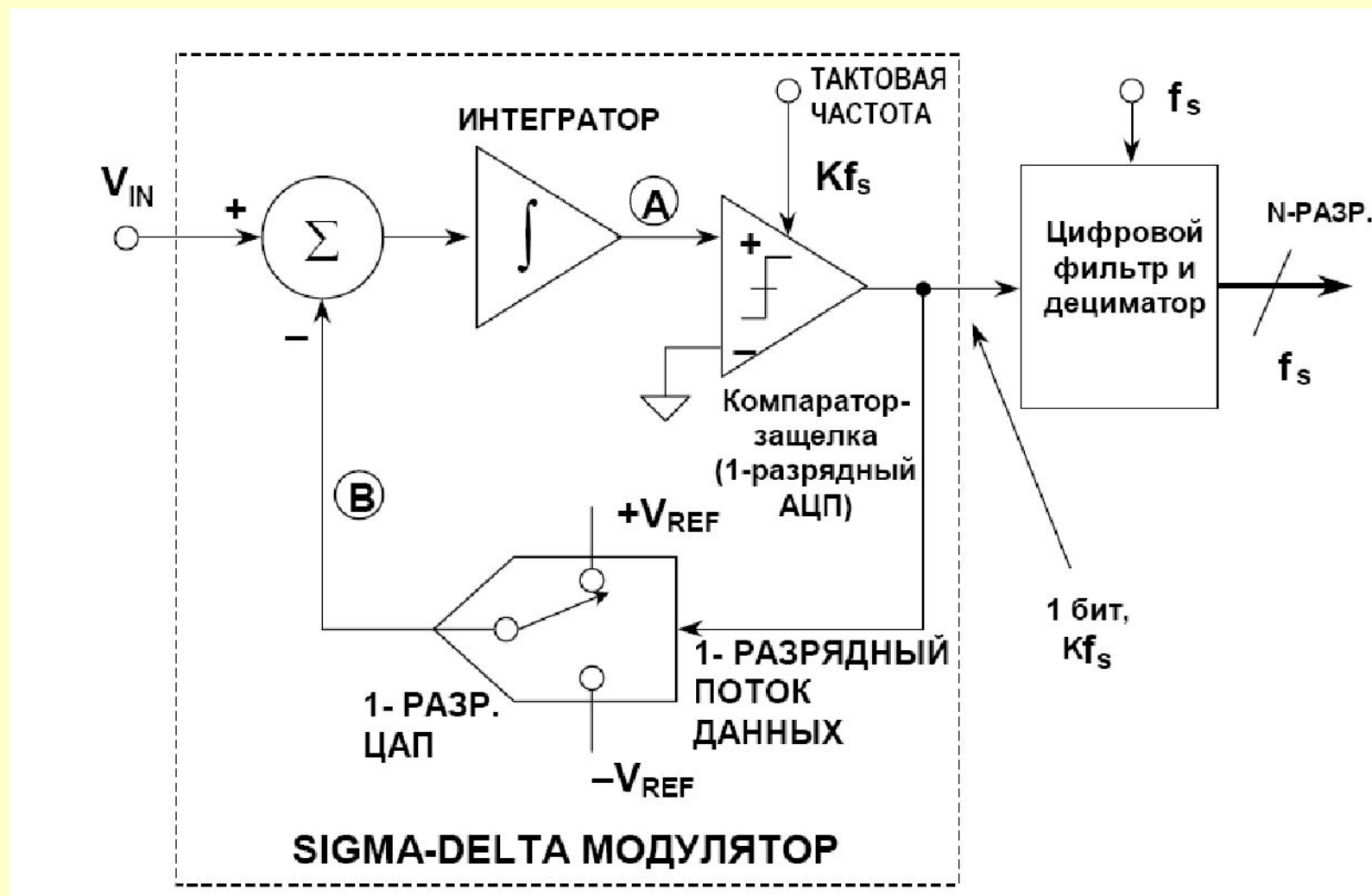


Рис. 7-15  
64



Элементы схемы:

$\Sigma$  – сумматор, который выполняет функцию вычитания, поскольку один из его входов – инвертирующий,

$\int$  – интегратор,

Компаратор-защелка, сбрасываемый в исходное состояние тактовыми импульсами, следующими с частотой  $f_s$ . Такой компаратор можно рассматривать как одноразрядный АЦП,

Переключатель опорного напряжения  $V_{REF}$ , который можно рассматривать как одноразрядный (однобитовый) ЦАП. Если на его входе «1», то на выходе – напряжение  $+V_{REF}$ , если на входе «0», то на выходе – минус  $V_{REF}$ ,

Цифровой фильтр нижних частот и дециматор, подавляющие шумы квантования и формирующие параллельный выходной код.

Первая часть схемы рис. 7-15, выделенная пунктиром, представляет собой так называемый  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятор.

Не вдаваясь в детали, работу  $\Sigma\Delta$  АЦП можно описать следующим образом. Представим, что измеряемое положительное постоянное напряжение  $U_x$  подается на его вход. Сигнал на выходе интегратора в точке А при этом будет линейно расти. При превышении этим сигналом некоторого порогового значения, компаратор СУ вырабатывает сигнал логической «1». Этот логический сигнал (поток «единиц») подается обратно через одноразрядный ЦАП на сумматор (точка В). Благодаря отрицательной обратной связи, соединяющей выход компаратора через одноразрядный ЦАП с точкой суммирования, среднее значение постоянного напряжения в стабилизируется на уровне  $U_x$ . Вследствие этого среднее значение выходного напряжения ЦАП (точка В) определяется плотностью потока единиц в одноразрядном потоке данных, следующего с выхода компаратора. Когда значение входного сигнала увеличивается до опорного напряжения  $+V_{REF}$ , число единиц в последовательном потоке данных увеличивается, а число нулей уменьшается.

Точно так же, когда значение сигнала приближается к отрицательному значению –  $VREF$ , число единиц в последовательном потоке данных уменьшается, а число нулей увеличивается. Таким образом, в последовательном потоке «1» на выходе компаратора содержится информация о среднем значении входного напряжения. Цифровой фильтр и дециматор обрабатывают последовательный поток «1», существенно уменьшают уровень шумов квантования и выдают окончательный параллельный выходной код. Последовательное включение  $k$  интеграторов и сумматоров (значение  $k$  определяет «порядок»  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятора), позволяет в большей степени подавить шумы квантования и реализовать АЦП с очень высокой разрешающей способностью – до 24 двоичных разрядов (бит).

## АЦП параллельного преобразования

Это самый быстродействующий из ныне существующих типов АЦП. Его структурная схема приведена на рис. 7-16.

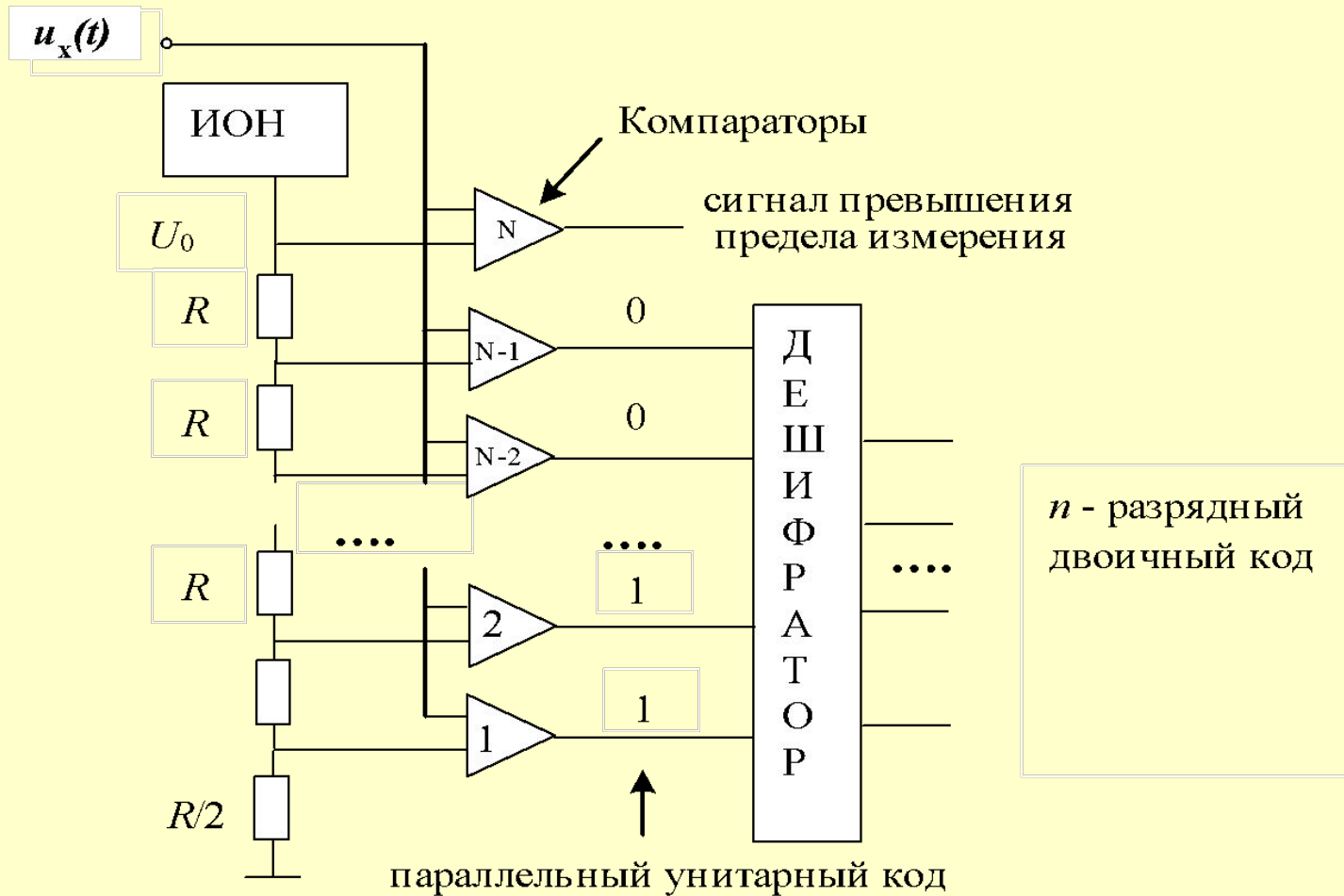


Рис. 7-16

## Условные обозначения:

ИОН - источник опорного напряжения  $U_0$ ,  
 $CU_1, CU_2, \dots, CU_{N-1}$  - сравнивающие устройства  
(компараторы),

$R_1, R_2, \dots, R_{N-1}$  – матрица резисторов,

С помощью источника опорного напряжения и матрицы ( $N-1$ ) резисторов, первый из которых имеет сопротивление  $R_1 = R/2$ , а остальные - одинаковое сопротивление  $R$ , создают  $N-1$  уровней квантования. Если измеряемое напряжение  $U_x$  находится в промежутке между  $0$  и  $U_0$ , то на выходе части компараторов появится сигнал логической «1», а на выходе остальных – сигнал логического «0». Совокупность этих сигналов можно рассматривать как своеобразный параллельный унитарный код (вспомните последовательный унитарный код на выходе временного селектора электронно-счетного частотомера – раздел 4). Дешифратор преобразует этот параллельный унитарный код в параллельный двоичный (или любой другой необходимый) код. Очевидно, что такая процедура преобразования напряжения в код занимает очень мало времени, которое определяется задержкой срабатывания компараторов и логических элементов дешифратора.

## Характеристики параллельных АЦП:

1. Диапазон измерения  $U_{\max}$  определяется напряжением ИОН  $U_0$ .
2. Разрешающая способность  $N = 2^n$  - ограничена технологическими возможностями создания в корпусе одной микросхемы или модуля большого количества ( $N$ ) компараторов. В настоящее время (2007 г.) серийные параллельные АЦП выпускают на 8 и 10 двоичных разрядов.
3. Суммарная погрешность, в общем случае, определяется тремя составляющими:
  - погрешностью квантования,
  - погрешностью ИОН,
  - погрешностью компараторов.У 8-разрядных параллельных АЦП нормируемая погрешность близка к цене единицы младшего разряда.
4. Время преобразования  $t_{np}$  - определяется суммой задержек срабатывания компараторов и логических элементов дешифратора и может быть порядка десятых долей наносекунды
5. Быстродействие  $B$  - до  $40 \cdot 10^9$  изм/с,
6. Помехоустойчивость  $P=0$  - в отношении подавления сетевой помехи, но это не недостаток, поскольку параллельные АЦП не предназначены для точного измерения постоянного напряжения.

Схемы реальных интегральных и модульных АЦП различных типов значительно сложнее, чем рассмотренные выше. В частности, в состав АЦП обычно включают высокоомный входной дифференциальный усилитель с большим входным сопротивлением и с программируемым коэффициентом усиления – это обеспечивает возможность автоматического переключения поддиапазона измерения. Многие АЦП содержат входные аналоговые переключатели (мультиплексоры), что позволяет создавать многоканальные измерительные системы. Важную часть современных АЦП составляет цифровой интерфейс, обеспечивающий возможность процессорного управления их работой, проводить автокалибровку и корректировать программным образом систематические погрешности.

## Автоматизация измерений

Для комплексного использования измерительных приборов и преобразователей, программного управления их работой в составе измерительных систем используют стандартизованные интерфейсы. Одно из определений термина интерфейс – стыкующая часть (плата, блок), через которую происходит обмен информацией. Интерфейс предполагает, в частности, стандартизацию:

- механических требований (типа используемых разъемов и т.п),
- электрических требований (уровней сигналов, типа логики и т.п.),
- информационных требований (вида кодов и протоколов обмена информацией).



Сейчас используют довольно много стандартизованных интерфейсов измерительных систем, важнейшим из которых является последовательно-параллельный интерфейс международной электротехнической комиссии МЭК 625.1 и его дальнейшие модификации. Он более известен под названиями HP-IB (исходная разработка фирмы Хьюлет-Паккард), IEEE-488 (стандарт США), GPIB (The General Purpose Interface Bus). В СССР был стандартизован почти аналогичный интерфейс КОП (Канал Общего Пользования), но сейчас он практически не используется. В последнее время широко применяют «гибрид» интерфейсов GPIB и USB, позволяющий с помощью небольшого переходного устройства очень просто подключать измерительные приборы с шиной GPIB к разъему USB управляющего компьютера. Большинство фирм вместе с приборами поставляют библиотеки драйверов и программ обработки и представления получаемых данных.