



TELKOM-3

# ЦАП и АЦП

«ЭКСПРЕСС-АМ5»

## **Принципы построения цифро-аналоговых и аналогово-цифровых преобразователей**

Аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи появились в начале 60-х годов. Причиной этому послужили первые попытки использования ЦВМ в системах автоматизированной обработки информации и управления. С момента создания первых преобразователей они в процессе развития существенно изменяли свою структуру, принципы действия и элементную базу.

## **История создания АЦП и ЦАП**

Как и ЭВМ, преобразователи принято относить к тому или иному поколению. Принадлежность к тому или иному поколению определяется главным образом типом элементной базы. Условно все множество преобразователей относят к четырем поколениям. К преобразователям I поколения АЦП и ЦАП, сконструированные на базе ламповых и частично полупроводниковых элементов, причем к ним не предъявлялись жесткие требования по точности и быстродействию вследствие ограниченных возможностей используемой элементной базы.

## ЦАП и АЦП

Широкое распространение полупроводниковых приборов в середине и конце 60-х годов позволило провести большие работы по созданию преобразователей с существенно более высокими характеристиками - преобразователи II поколения. Преобразователи III поколения выполнялись на базе интегральных схем с использованием вначале цифровых устройств, а впоследствии и аналоговых узлов. Первые ИС преобразователей появились в 70-х годах.

Современные АЦП и ЦАП создаются в виде больших интегральных схем и относятся к преобразователям IV поколения.

## Принципы работы АЦП и ЦАП

Аналого-цифровые преобразователи служат для преобразования исходной аналоговой величины в соответствующий ей цифровой эквивалент - код. При этом они выполняют преобразование, квантуя входную величину по уровню и по времени. Квантование по уровню вытекает из самого принципа преобразования аналоговой информации в цифровую и определяет степень приближения (с точки зрения точности) цифрового эквивалента исходной аналоговой величине. Квантование же по времени связано, прежде всего, с необходимостью выполнения преобразования, которое требует использования определенного цикла вычисления на некотором временном интервале.

## ЦАП и АЦП

Цифроаналоговые преобразователи воспроизводят на выходе аналоговую величину, соответствующую входному цифровому коду.

В абсолютном большинстве случаев АЦП и ЦАП используются для преобразования сигналов, изменяющихся в реальном масштабе времени, поэтому одно из основных требований, предъявляемых к преобразователям, - это обеспечение высокого быстродействия. Другое основное требование состоит в обеспечении заданной точности преобразования, которая определяется избранным алгоритмом работы преобразователя и техническим совершенством элементной базы.

## ЦАП и АЦП

Аналоговые сигналы представляются в виде напряжения или тока, цифровые сигналы — в определенном коде (двоичном, двоично-десятичном). Возможны и другие формы представления дискретных сигналов. Например, в системах отображения цифровые сигналы представляются в форме, удобной для непосредственного управления устройством отображения.

Как правило, преобразователи являются линейными устройствами, в них соблюдается линейное соотношение между значениями аналогового сигнала и соответствующего ему цифрового кода. Разрабатываются также и нелинейные преобразователи, в которых может осуществляться функциональная связь между аналоговой и цифровой величинами.

## **Классификация методов преобразования в АЦП и ЦАП**

Основой классификации преобразователей является алгоритм преобразования, который определяет содержание и последовательность выполнения операций преобразования. Алгоритм преобразования не зависит от конструктивных особенностей и схемных решений преобразователей. С точки зрения используемого алгоритма АЦП могут быть реализованы в соответствии с одним из трех методов преобразования аналоговой величины в цифровую.

## ЦАП и АЦП

**Первый метод** состоит в том, что аналоговая величина ставится в соответствие сумме одинаковых и минимальных по величине эталонов (квантов). В момент достижения равенства подсчитывается число квантов, которое и характеризует результат преобразования.

**Второй метод** подразумевает использование  $n$  эталонов, значения которых пропорциональны степени числа 2. Сравнение преобразуемой величины начинается с максимального по значению эталона. В случае превышения значения эталона над значением преобразуемой величины в старшем разряде кода фиксируется число 0, в обратном случае значение аналоговой величины (превышает значение эталона) фиксируется число 1; далее разность значений преобразуемой величины и эталона сравнивается с последующим эталоном и т. д.

## ЦАП и АЦП

**Третий метод** состоит в том, что преобразуемая величина сравнивается одновременно с набором  $(2n - 1)$  эталонов. «Вес» старшего эталона определяется количеством  $(2n - 1)$  квантов; вес следующего эталона — количеством  $(2n - 2)$  квантов и т. д.; вес младшего эталона соответствует одному кванту. Структура такого типа АЦП использует  $(2n - 1)$  сравнивающих устройств. Результат преобразования фиксируется по числу сравнивающих устройств, отметивших превышение значения входной величины над значением данного эталона. На выходе преобразователя образуется параллельный единичный код, который далее преобразуется в позиционный двоичный код.

## ЦАП и АЦП

Преобразователи, в которых входной сигнал уравнивается либо суммой эталонов, либо набором из  $n$  эталонов с весами, пропорциональными степени двойки, называются **АЦП последовательного действия**. К ним относятся преобразователи с накоплением, с промежуточным и без промежуточного преобразования. По принципу **беспромежуточного преобразования** работают АЦП типа «напряжение — частота». При этом частота следования импульсов пропорциональна значению входного сигнала.

## ЦАП и АЦП

**Промежуточное преобразование** в АЦП обычно выполняется с использованием временного интервала или частоты. Временной интервал ставится в соответствие входному сигналу, а затем заполняется последовательностью импульсов стабильной частоты, которые затем подсчитываются. При использовании частоты в качестве промежуточного преобразования входному сигналу ставится в соответствие частота следования импульсов, которые подсчитываются на определенном временном интервале. Импульсы вырабатывает генератор плавающей частоты.

## ЦАП и АЦП

**Цифроаналоговые преобразователи** выполняют функции преобразования цифрового сигнала в соответствующий ему аналоговый сигнал несколькими способами. В зависимости от формы представления аналогового сигнала они называются преобразователями, работающими по принципу суммирования токов, напряжений или сопротивлений. Цифроаналоговое преобразование - это представление результатов вычислений ЦВМ к виду, удобному для последующего их использования в качестве сигналов управления, иными словами, это формирование аппроксимирующего сигнала по входной последовательности.

## ЦАП и АЦП

**Микроэлектронные ЦАП** работают по одному из двух принципов: с прямым или промежуточным преобразованием. ЦАП с прямым преобразованием в зависимости от выбранного алгоритма преобразования делятся на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные. Наиболее часто используются ЦАП параллельного действия, как обладающие большим быстродействием. ЦАП с промежуточным преобразованием преобразует вначале код входной величины в некоторую промежуточную величину, представленную, например, длительностью или частотой следования импульсов, которые затем преобразуются в управляющий сигнал.

## Параметры АЦП и ЦАП

При разработке АЦП и ЦАП пользуются понятиями параметров преобразователей, которые определяют основные характеристики преобразователей — точность и скорость преобразования. Обычно указывают три таких параметра, хотя есть и другие, отражающие особенности построения и функционирования АЦП и ЦАП:

- **разрешающая способность;**
- **нелинейность;**
- **время установления для ЦАП и время преобразования для АЦП.**

## ЦАП и АЦП

**Разрешающая способность** определяется числом разрядов. Для АЦП — это число разрядов  $n$  выхода преобразователя, а следовательно, и число ступеней выходного сигнала. Для ЦАП — это число разрядов входного цифрового сигнала. В общем случае число разрядов определяется двоичным логарифмом максимального числа кодовых комбинаций на входе ЦАП или выходе АЦП.

Для двоичных преобразователей:

$$N n = \log_2[(L_{max} - L_{min})/\Delta L],$$

где  $L_{max}$  и  $L_{min}$  — соответственно максимальное и минимальное значения преобразуемой величины;  $\Delta L$  — допустимая ошибка преобразования.

## ЦАП и АЦП

**Нелинейность**  $\delta L$  характеризует степень отклонения выходного значения сигнала от идеального и записывается в единицах младшего разряда. Обычно под идеальным значением подразумевается «наилучшая» линия (рис. а), либо линия, соединяющая начальную при наличии нулей во всех разрядах) и конечную (при наличии единиц во всех разрядах) точки (рис. б) характеристики преобразователя. Для АЦП прямая линия проходит через точки характеристики преобразования, которые делят пополам расстояние между средними значениями уровней квантования.

# ЦАП и АЦП

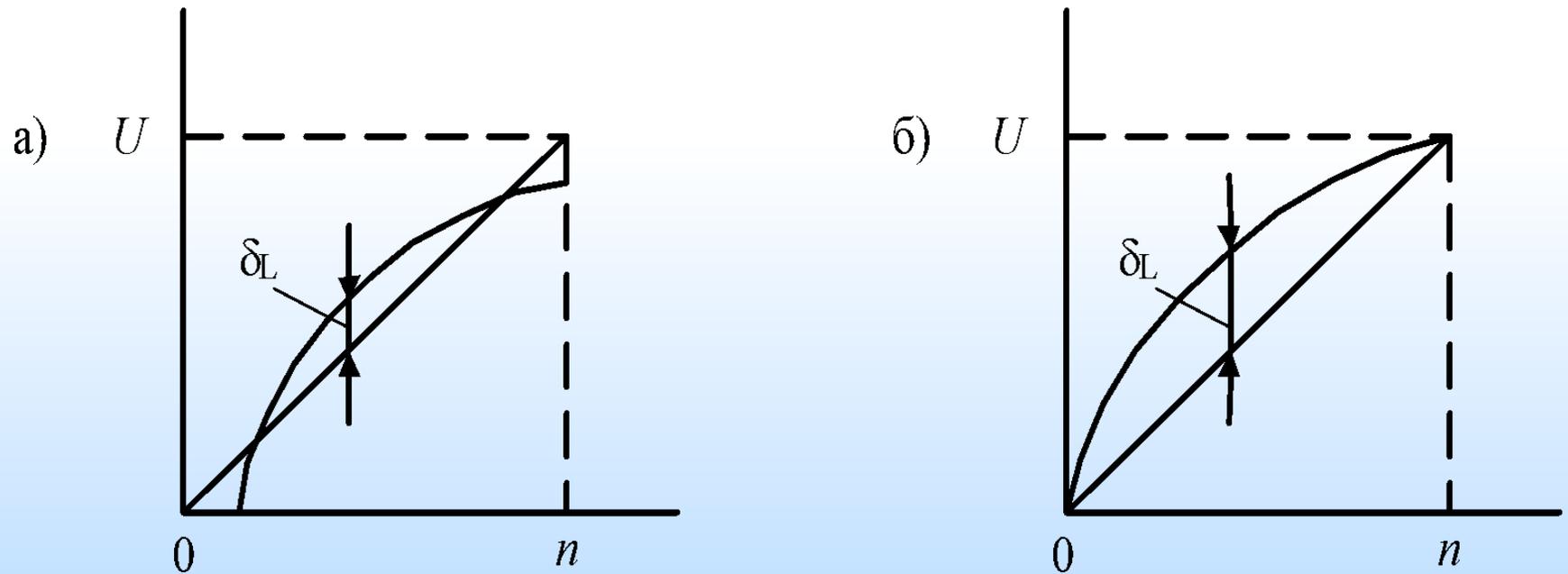


Рис. Нелинейные характеристики преобразователей

## ЦАП и АЦП

Иногда вводится дополнительно понятие дифференциальной нелинейности, под которой подразумевают отличие (больше или меньше) реальной ступеньки от идеальной, соответствующей соседним кодам. Дифференциальная нелинейность представляется в единицах младшего разряда. По форме представления понятию нелинейности близко понятие монотонности характеристики преобразования, хотя по существу это понятия разные. Монотонность характеристики преобразования — это соответствие знака приращения мгновенных значений входного и выходного сигналов преобразования. Для нелинейных преобразователей это соответствие знаков приращения не всегда справедливо.

## ЦАП и АЦП

**Быстродействие АЦП** характеризуется той максимальной скоростью, с которой можно получить очередной результат преобразования. Иными словами, время преобразования определяется интервалом, необходимым для образования на выходе АЦП устойчивого кода от момента изменения сигнала на входе преобразователя. При использовании параллельных АЦП задается ширина полосы, в пределах которой выходной сигнал отслеживает входной сигнал с погрешностями, не превышающими заданные.

# ЦАП и АЦП

**Быстродействие ЦАП** характеризуется временем установления выходного аналогового сигнала  $t_{su}$  до того момента, когда его значение станет меньше единицы младшего разряда, преобразователя, иными словами, до того момента, когда выходной аналоговый сигнал войдет в зону (и не выйдет из нее) шириной, равной единице младшего разряда (EMR), середина которой совпадает с установившимся значением преобразованной величины (рис. ).

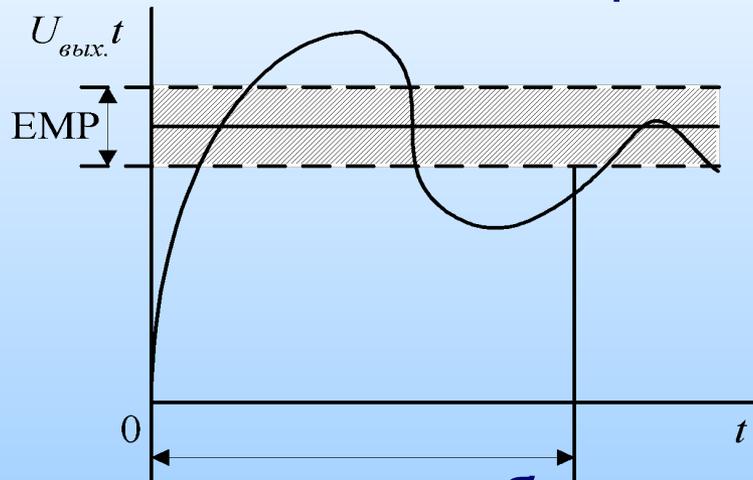


Рис. Характеристика преобразования ЦАП

### **АЦП и ЦАП параллельного и последовательного действия**

Рассмотрим наиболее распространенные типы АЦП и ЦАП и перспективы их развития. Как отмечалось, в зависимости от алгоритма преобразования аналого-цифровые преобразователи могут использовать три метода преобразования: параллельный, последовательный и последовательно-параллельный. Выбор того или иного метода зависит от области применения преобразователя.

## ЦАП и АЦП

В тех случаях, когда к быстродействию преобразователя не предъявляются жесткие требования, используются АЦП последовательного действия. В системах управления, работающих в масштабе реального времени или при обработке видеосигналов, как правило, применяются АЦП параллельного действия. Типичная структурная схема АЦП параллельного преобразования показана на рис. ниже. Компаратор можно рассматривать как одноразрядный параллельный преобразователь.

## ЦАП и АЦП

В тех случаях, когда к быстродействию преобразователя не предъявляются жесткие требования, используются АЦП последовательного действия. В системах управления, работающих в масштабе реального времени или при обработке видеосигналов, как правило, применяются АЦП параллельного действия. Типичная структурная схема АЦП параллельного преобразования показана на рис. ниже. Компаратор можно рассматривать как одноразрядный параллельный преобразователь.

# ЦАП и АЦП

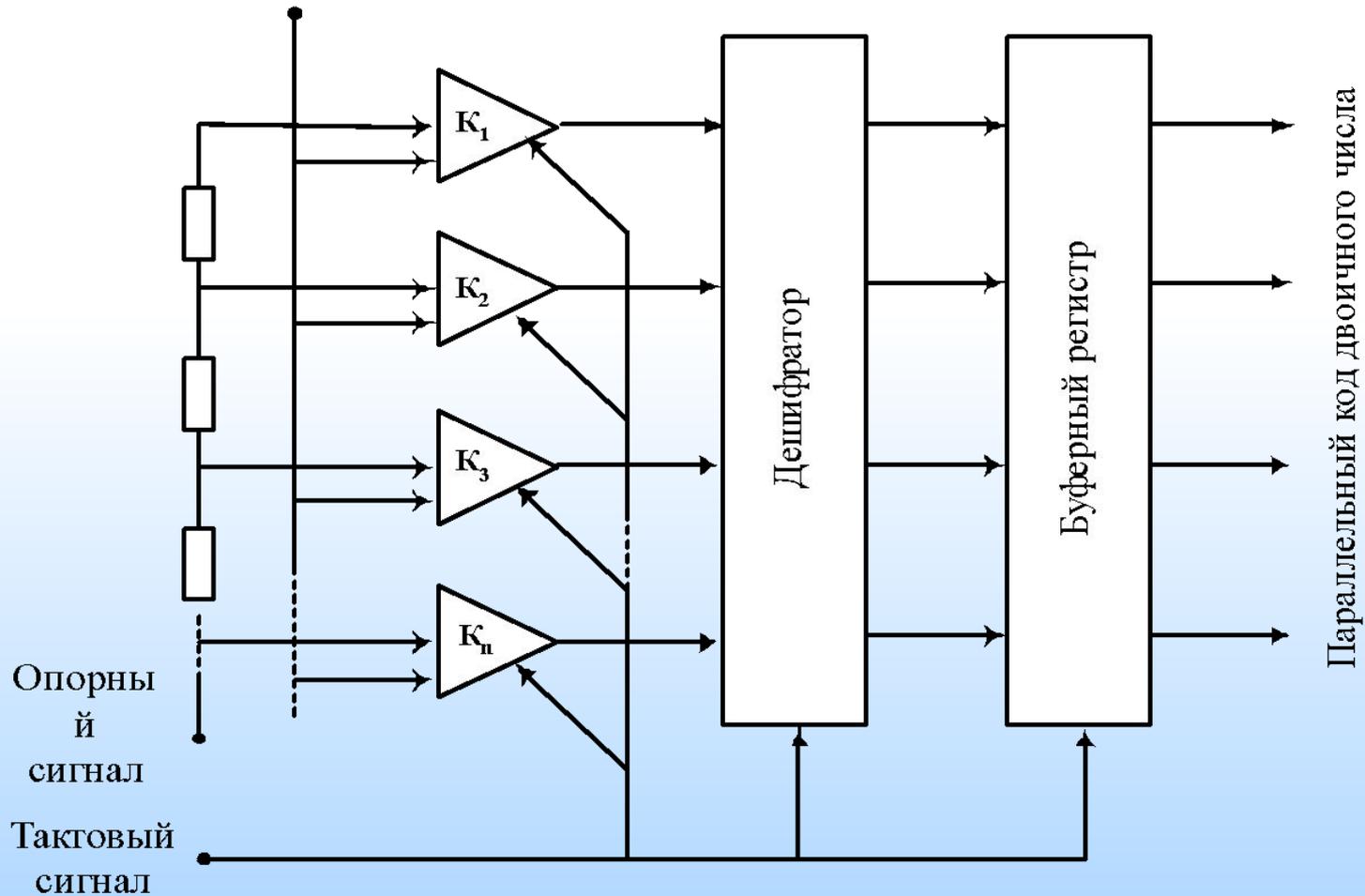


Рис. Схема АЦП параллельного действия

## ЦАП и АЦП

Для повышения быстродействия преобразователя его внутреннюю архитектуру строят по конвейерному способу, что позволяет осуществлять цифровую обработку одного отсчета одновременно с записью следующего. Этот способ требует больших аппаратурных затрат (большое количество компараторов и сопутствующих элементов).

## ЦАП и АЦП

В последнее время появились АЦП параллельного действия в интегральном исполнении, что позволило уменьшить их массу и габаритные размеры. Однако эти преобразователи обладают относительно небольшой точностью из-за нестабильности напряжения смещения компараторов. Этому недостатка лишены преобразователи, выполненные в виде интегральной схемы на основе КМОП-технологии. В этой схеме предусмотрена автокомпенсация смещения нуля каждого компаратора.

# ЦАП и АЦП

Структурная схема АЦП последовательного преобразования приведена на рис. ниже. В цепи обратной связи используется ЦАП, выходной сигнал которого сравнивается с преобразуемым аналоговым сигналом. В момент равенства этих сигналов двоичный код на входе ЦАП является цифровым эквивалентом преобразуемого сигнала. Компаратор выполняет роль сравнивающего устройства, а регистр последовательного приближения является логической схемой, реализующей заданный алгоритм.

# ЦАП и АЦП

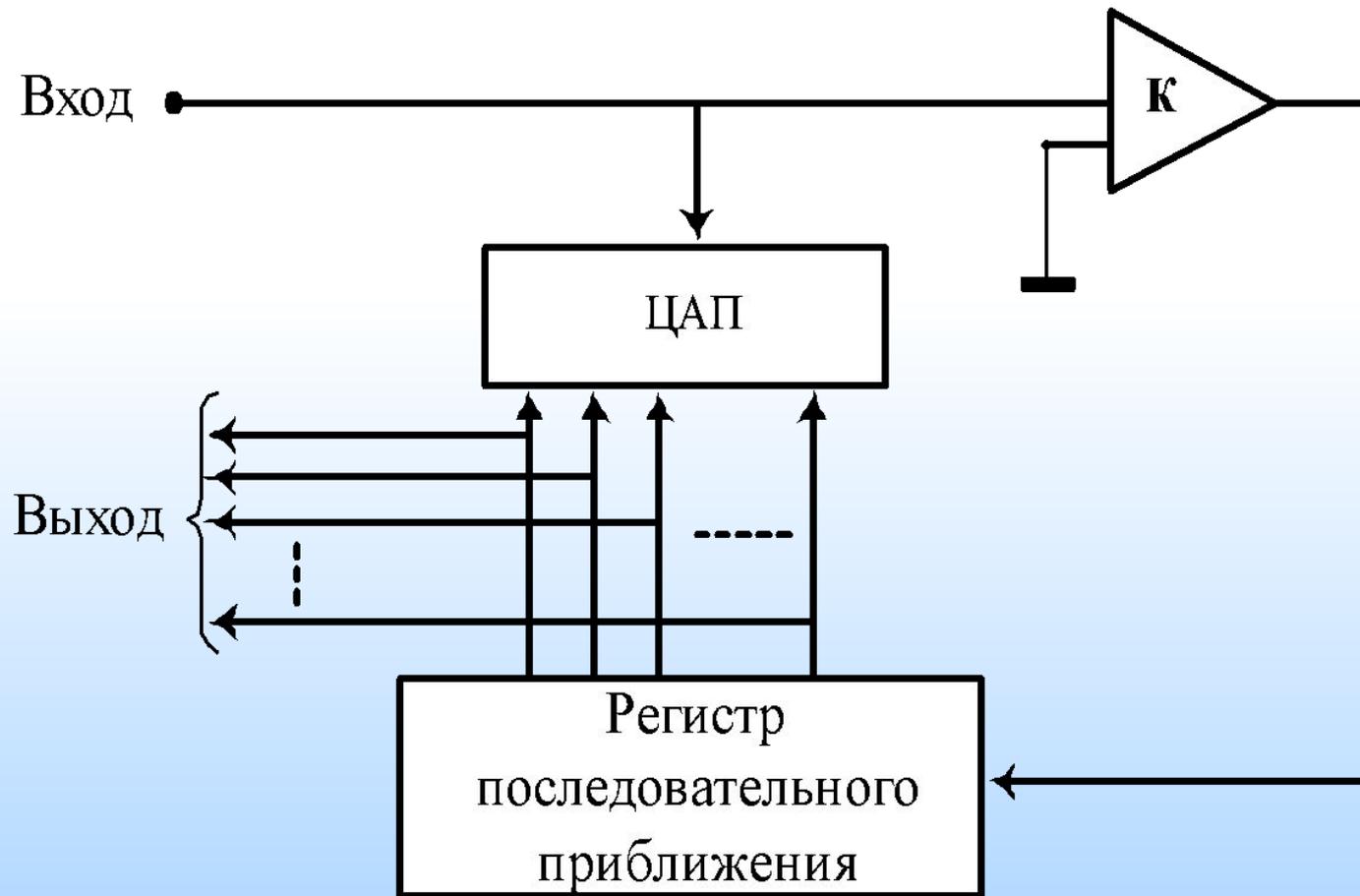


Схема АЦП последовательного действия

## ЦАП и АЦП

В последнее время получили распространение интегрирующие преобразователи нескольких разновидностей. Принцип их действия основан, как правило, на воспроизведении пилообразного изменения выходного сигнала интегратора под действием управляющего сигнала.

## ЦАП и АЦП

Чаще всего применяются интегрирующие преобразователи с двойным (двухтактным) интегрированием. Входной сигнал интегрируется либо за определенный интервал времени, либо до заданной величины. За первый такт интегрируется входной сигнал, а за второй (он начинается по окончании первого такта) — противоположный ему по знаку опорный сигнал. Интервал времени преобразования заполняется последовательностью импульсов, подсчет которых прекращается в момент равенства нулю сигнала на выходе интегратора. Количество импульсов, подсчитанное счетчиком, эквивалентно аналоговой величине на входе преобразователя.

# ЦАП и АЦП

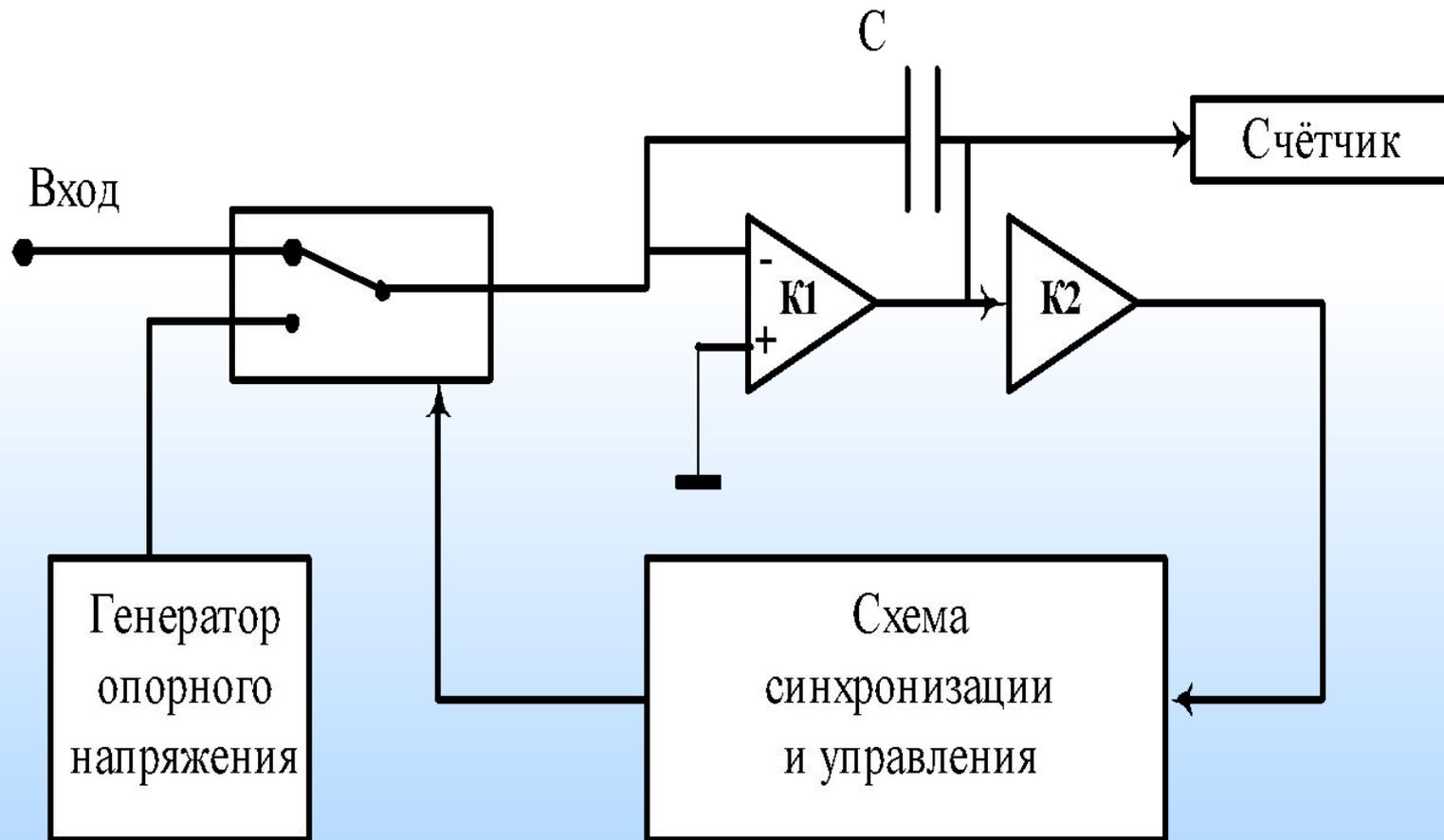


Схема интегрирующего АЦП

## ЦАП и АЦП

Структурная схема интегрирующего преобразователя показана на рис выше. Такты интегрирования в преобразователе регулирует схема синхронизации и управления, связанная с выходом второго компаратора. В первом такте входной сигнал (верхнее положение переключателя) интегрируется в течение фиксированного интервала времени, определяемого схемой синхронизации и управления. Во втором такте (нижнее положение переключателя) на вход интегратора подается сигнал опорного напряжения. Время интегрирования во втором такте переменное и определяется моментом равенства нулю выходного напряжения интегратора.

# ЦАП и АЦП

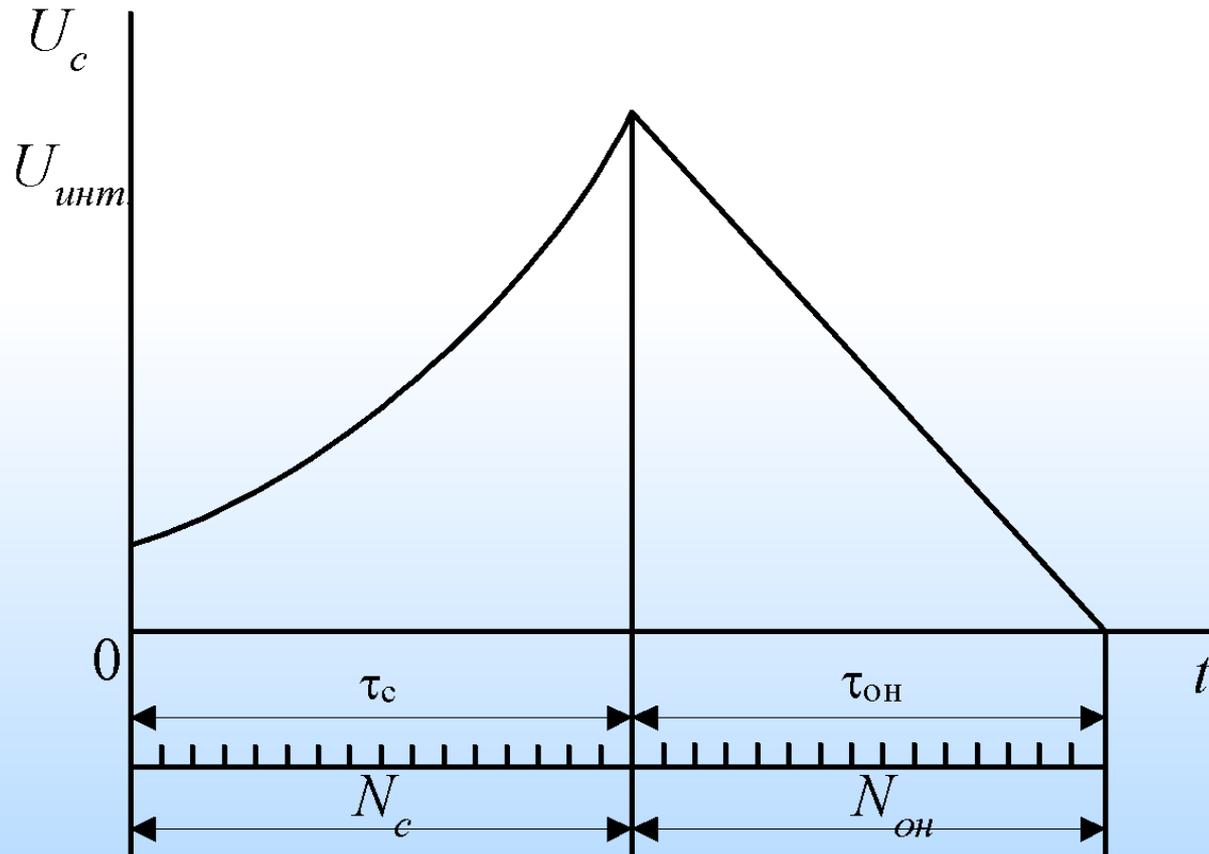


График работы интегрирующего АЦП с двойным преобразованием

## ЦАП и АЦП

На рис. приняты следующие обозначения:

$t_c$  - время интегрирования входного сигнала (постоянно) ;

$N_c$  - число импульсов за время интегрирования входного сигнала;

$t_{он}$  - время интегрирования сигнала опорного напряжения;

$N_{он}$  - число импульсов за время интегрирования опорного напряжения;

$U_c$  - напряжение входного сигнала;

$U_{инт}$  - напряжение на выходе интегратора.

Очевидно, что число импульсов, зафиксированных в счетчике, пропорционально преобразованному входному напряжению.

### **ЦАП с коммутацией тока и напряжения**

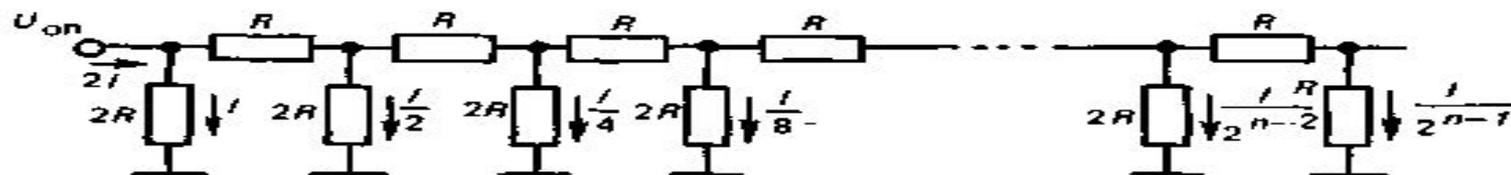
По алгоритму преобразования ЦАП делятся на параллельные, последовательные и последовательно-параллельные. Известны и другие способы их классификации. Некоторые авторы, например, разделяют все ЦАП на два больших класса: преобразователи, использующие статические методы преобразования, и преобразователи, использующие методы временного разделения

## ЦАП и АЦП

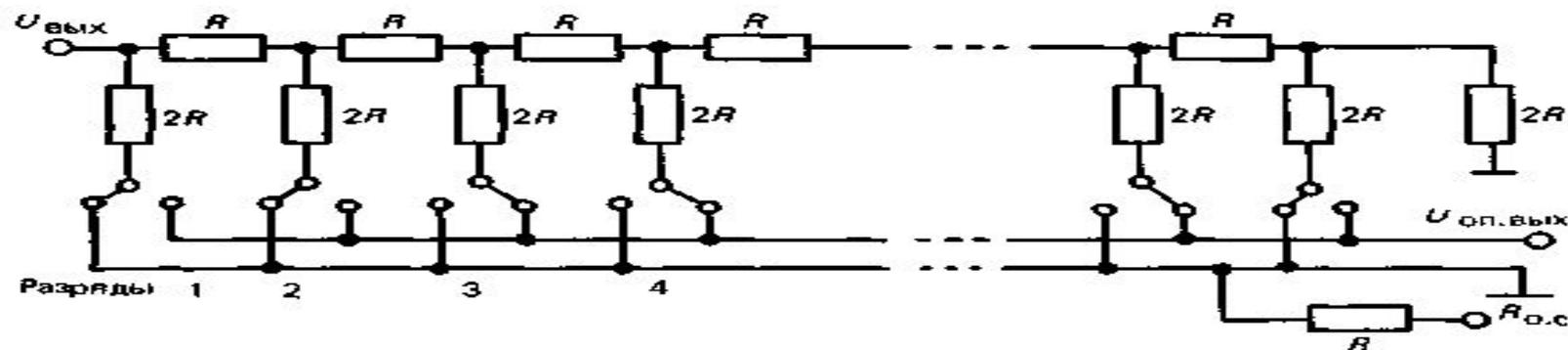
В первом из них цифровой сигнал постоянно замыкает ряд ключей, управляющих токами или напряжениями;  
во втором ключ работает в динамическом режиме и схема преобразователя обеспечивает выработку среднего значения тока или напряжения за некоторый интервал времени, соответствующий требуемому значению.

Иными словами, этот способ классификации ЦАП основан на использовании различных режимов работы переключающих устройств ЦАП с коммутацией тока.

# ЦАП и АЦП



Р и с. 3.8. Схема резисторной цепи лестничного типа



Р и с. 3.9. Схема ЦАП с целью лестничного типа

образуется  $n$ -разрядное число,  $U_{\text{вых}} = 2iR \sum_{k=0}^n 2^k x_k - (2^n - 1)iR$ . Здесь  $i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$ ;  $\sum_{k=0}^n 2^k x_k = x$ , причем  $x = x_n x_{n-1} \dots x_k \dots x_2 x_1 x_0$  — преобразуемое двоичное число.

Если обозначить  $2iR = k_{m1}$  и  $(2^{n-1} - 1)iR = k_{m2}$ , то выходное напряжение преобразователя

$$U_{\text{вых}} = k_{m1}x - k_{m2}.$$

### **АЦП и ЦАП с разомкнутой и замкнутой схемой**

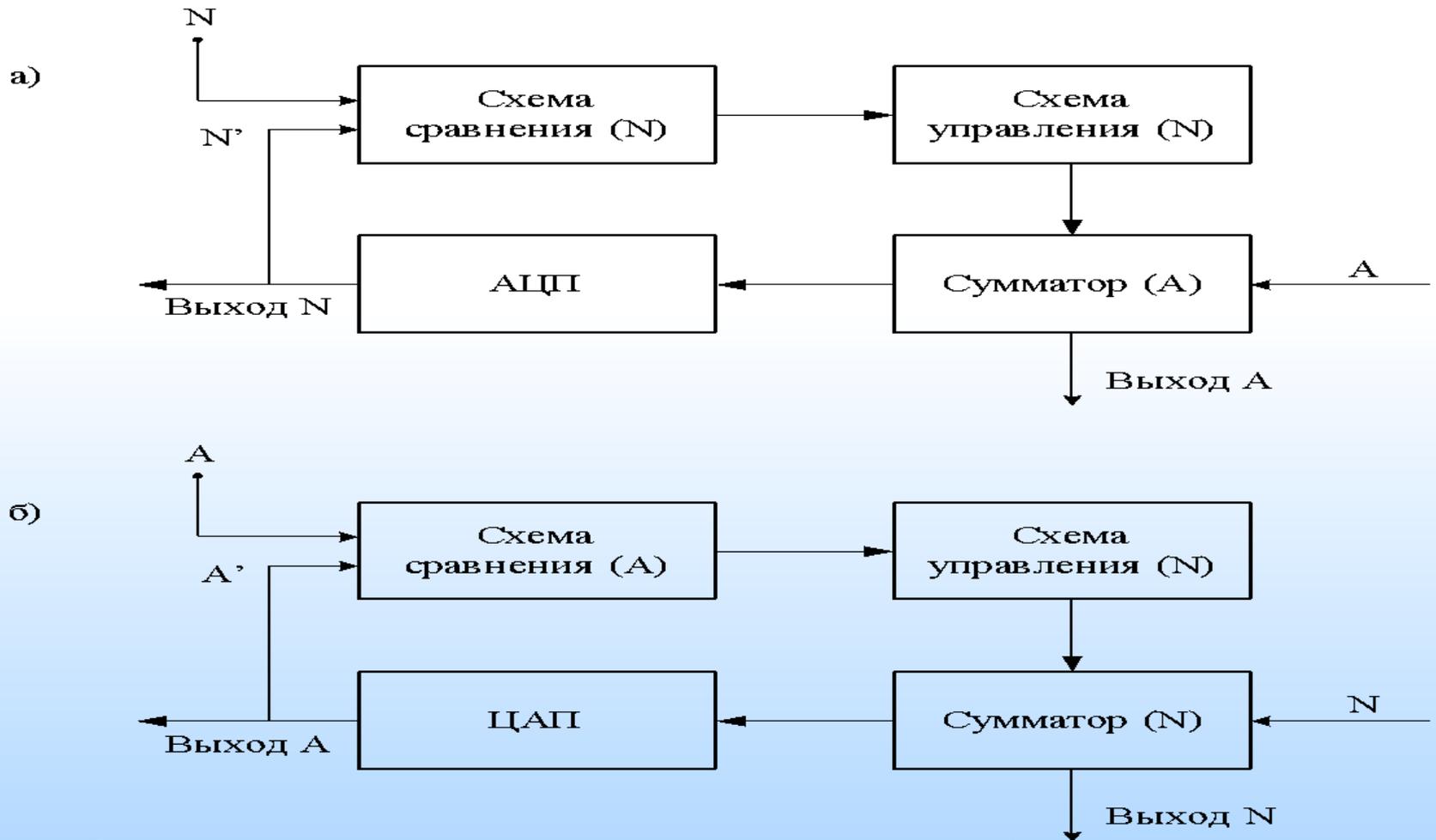
Следует отметить, что АЦП и ЦАП строятся не только по разомкнутой (в большинстве случаев), но и по замкнутой схеме. Во втором случае в схеме преобразователя используется обратная связь, охватывающая преобразователь полностью. Смысл включения обратной связи заключается в том, что входная величина сравнивается с величиной, выработанной в цепи обратной связи.

На рис. ниже показаны схемы ЦАП и АЦП, построенные по принципу преобразователей с обратной связью.

## ЦАП и АЦП

В состав ЦАП, построенного по замкнутой схеме (рис. а), входят: АЦП, включенный в цепь обратной связи; схема управления и сумматор. Преобразуемый цифровой код поступает на первый вход цифровой схемы сравнения, а на второй ее вход подается сигнал с выхода АЦП, выработанный в цепи обратной связи. В результате сравнения формируется входной сигнал схемы управления, связанной выходом с входом сумматора.

# ЦАП и АЦП



Преобразователи, построенные по замкнутой схеме:  
а) - схема ЦАП с обратной связью; б) - схема АЦП с обратной связью

## ЦАП и АЦП

Аналоговая величина, воспроизведенная на выходе сумматора, преобразуется в АЦП в цифровой код и далее, как было отмечено, сравнивается с входным сигналом. По существу, такая схема является цифровой системой регулирования с глубокой обратной связью. Преобразованная аналоговая величина снимается с выхода сумматора в момент равенства сигналов на входе схемы сравнения. Преобразователь может выполнять функции АЦП при разомкнутой схеме, если использовать только АЦП и сумматор (на схеме отмечено жирными линиями).

## ЦАП и АЦП

Аналогично работает АЦП с обратной связью.

ЦАП с обратной связью удобно использовать и при преобразовании цифрового кода в аналоговую механическую величину, представленную, например, в виде угла поворота исполнительного вала.

## ЦАП с временной коммутацией

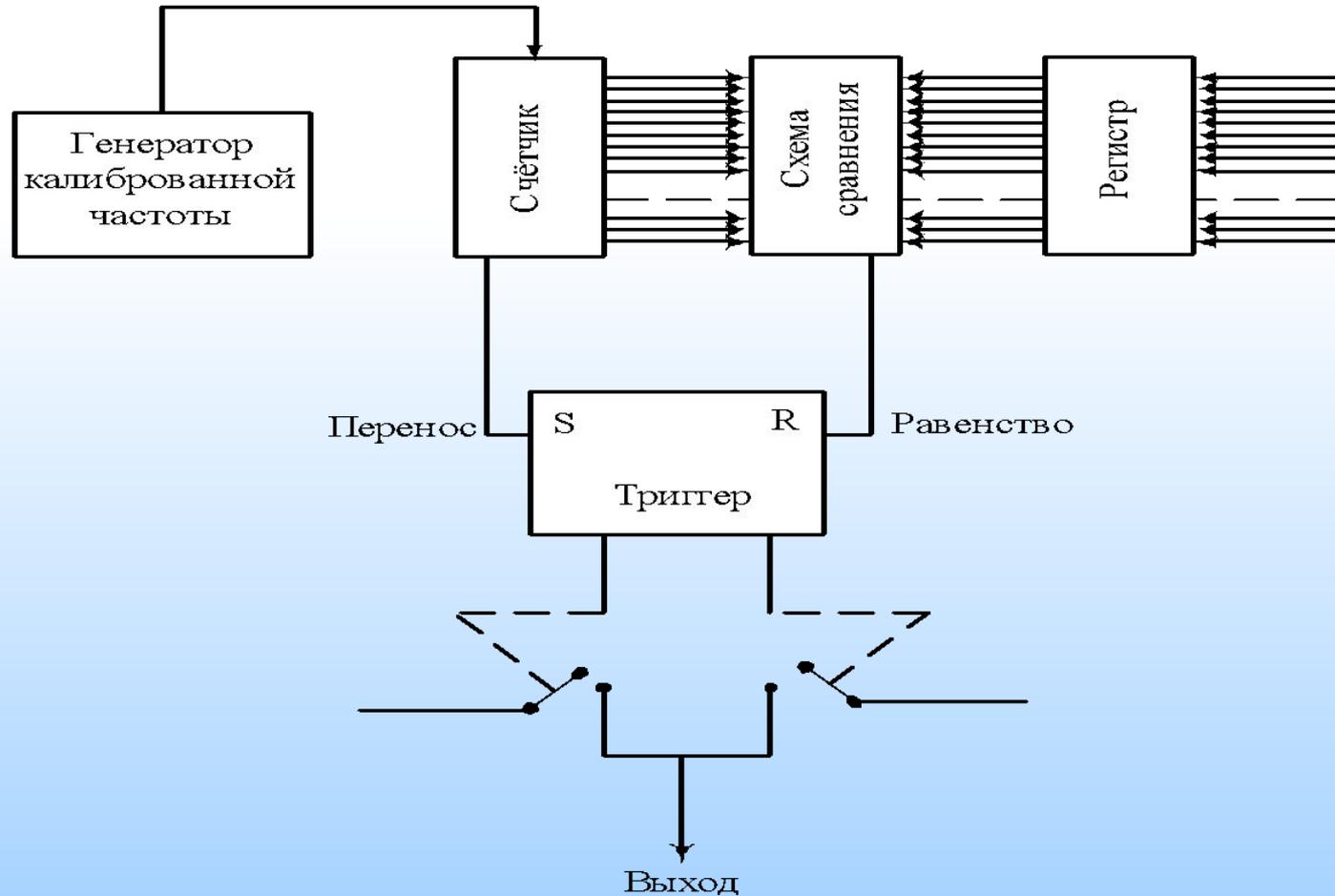


Схема ЦАП с временной коммутацией

## ЦАП и АЦП

На рис. выше показана схема ЦАП с временной коммутацией с использованием схемы сравнения. Практически это одноразрядный ЦАП, наиболее простой с точки зрения схемной реализации. Триггер управляется по входам S и R счетчиком и регистром через схему сравнения. До момента установления равенства числа тактовых импульсов в счетчике содержанию регистра триггер находится в состоянии высокого логического уровня. Время, оставшееся до окончания полного цикла работы счетчика, триггер находится в состоянии низкого логического уровня.

## ЦАП и АЦП

Точность преобразования в этой схеме зависит от стабильности опорного сигнала и частоты следования тактовых импульсов, а также от погрешностей, вызываемых работой выходного переключателя. Иногда на выходе схемы преобразователя устанавливается фильтр с относительно большой постоянной времени для сглаживания пульсаций по уровню, превышающих значение единицы младшего разряда.

### **Перспективы развития АЦП и ЦАП**

Перспективы развития АЦП и ЦАП связаны с решением в основном двух задач - с увеличением скорости преобразования (быстродействие преобразователей) и повышением точности преобразования (повышение разрядности). Предстоит одновременно решать и другие задачи, например задачи расширения функциональной структуры преобразователей, уменьшения массы и габаритных размеров, значительного повышения их надежности. Решение этих и других задач рассматривается в плане совершенствования архитектур, конструкций и технологий БИС и СБИС, на базе которых проектируются преобразователи.

### Увеличение скорости преобразования

связано, как правило, с повышением тактовых частот. В настоящее время выпускаются семейства преобразователей параллельного действия с частотами преобразования до 30 - 40 МГц. Такие преобразователи обычно используют конвейерную архитектуру.

Новое направление в области создания перспективных моделей преобразователей, обладающих большей степенью интеграции и меньшей рассеиваемой мощностью, базируется на использовании приборов с зарядовой связью (ПЗС)

## ЦАП и АЦП

Идея использования ПЗС в схемах АЦП состоит в том, что существует линейная связь между входным напряжением и числом зарядов, которое необходимо для заполнения потенциальной области под электродом.

Если область под электродом обладает потенциалом, соответствующим уровню отсечки, то напряжение, поступающее на вход схемы ПЗС, как бы «вытесняет» определенное количество зарядов. И при условии, что уровень потенциала области под электродом всегда соответствует уровню отсечки, количество зарядов, вытесненных входным напряжением, будет пропорционально входному напряжению.

## ЦАП и АЦП

Разработка новых видов технологий высокоскоростных КМОП-схем с высокой плотностью компоновки обеспечила возможность создания микросхем, свободных от свойственных биполярным технологиям ограничениям, например ограничения по мощности рассеивания. При этом создаются схемы, обладающие, по крайней мере, такими же скоростными характеристиками, как и схемы, изготавливаемые по традиционным биполярным технологиям. Кроме того, КМОП-схемы обладают возможностью производства ИС с плотностью упаковки около 100 тыс. транзисторов на кристалл. Эти схемы можно реализовать весьма портативными вследствие уменьшения потребляемой мощности. К тому же снижение требований по питанию и уменьшению временных задержек между элементами схем позволяет использовать их весьма эффективно в преобразователях.

### Проблема повышения точности

**преобразования** является не менее сложной, чем проблема улучшения характеристик по быстродействию преобразователей. Использование новых схемотехнических решений, улучшение конструктивных характеристик ЦАП и АЦП, предварительная фильтрация сигнала на входе АЦП, дешифрация старшего разряда входного кода ЦАП - далеко не полный перечень мероприятий в плане решения указанной проблемы. Другим возможным способом улучшения точностных характеристик преобразователей является повышение степени интеграции и усложнение их структуры для обеспечения возможности использования дополнительных схем - программной компенсации погрешностей и контроля.

## ЦАП и АЦП

Работы в области преобразования сигналов в настоящее время развиваются в направлении создания СБИС, предназначенных для обработки аналоговых сигналов средствами микропроцессорной техники. Эти системы обладают гибкой архитектурой и могут использоваться в общем случае для решения сложных задач по обработке аналоговых сигналов с широкими функциональными возможностями.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ.**

