

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ

И

КВАНТОВАНИЕ

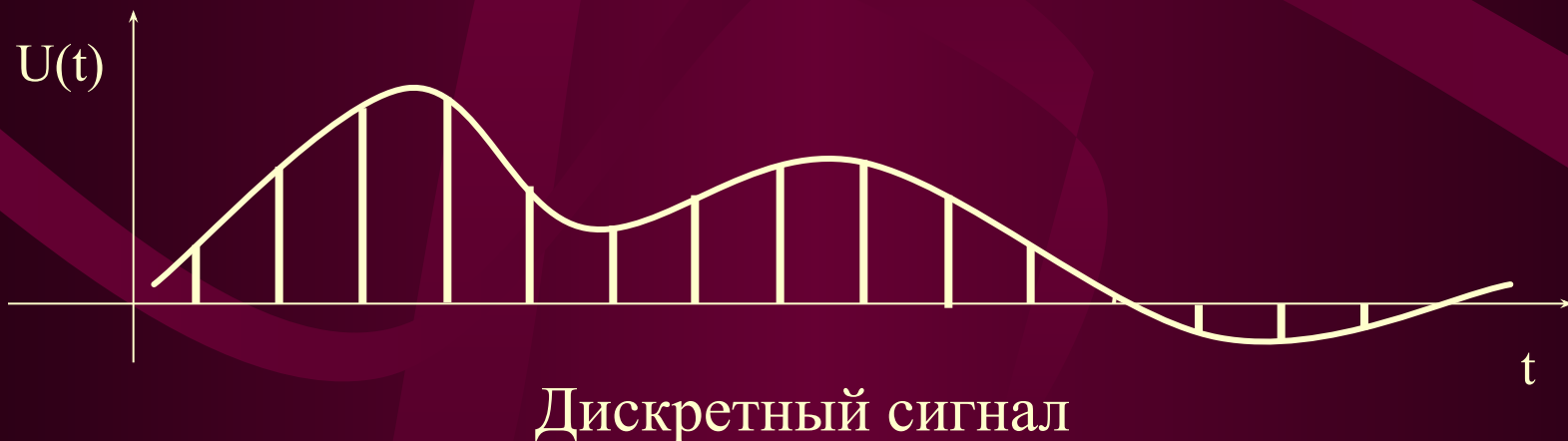
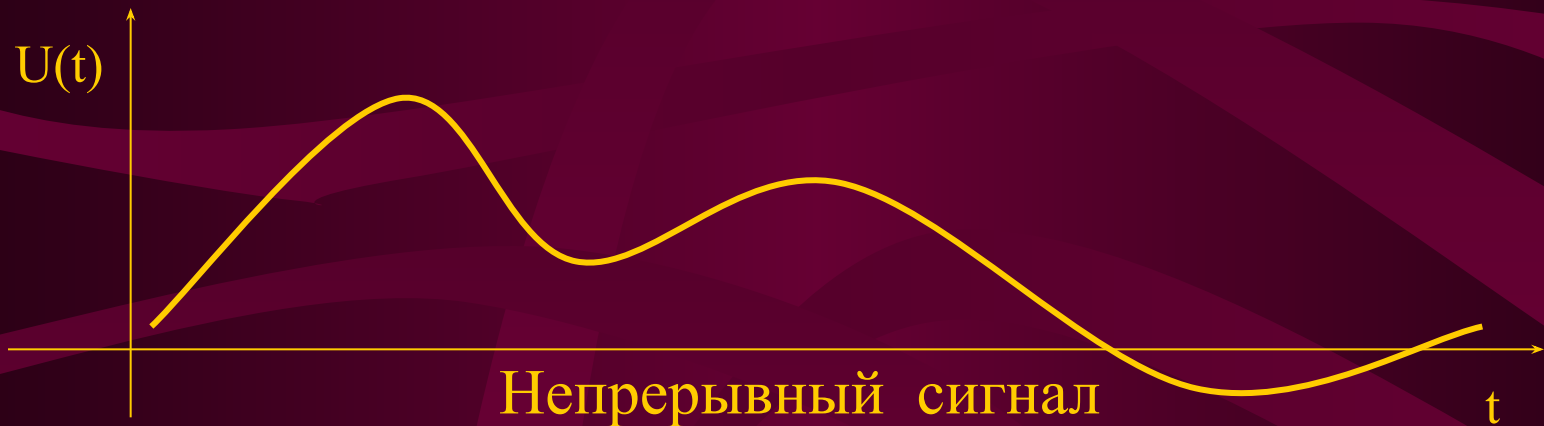
АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ



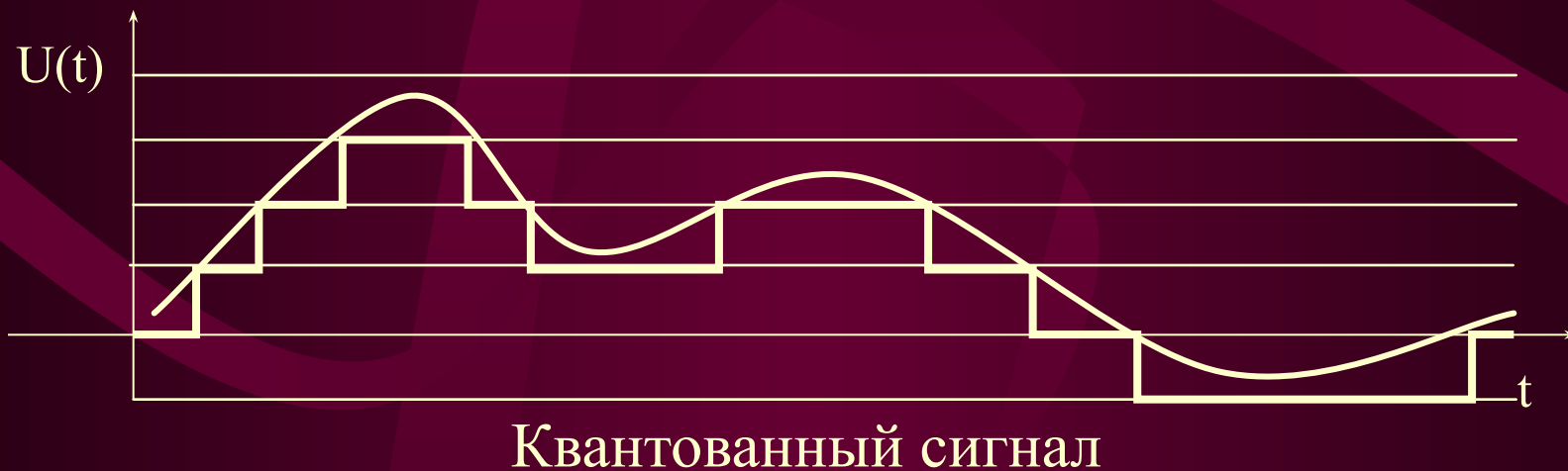
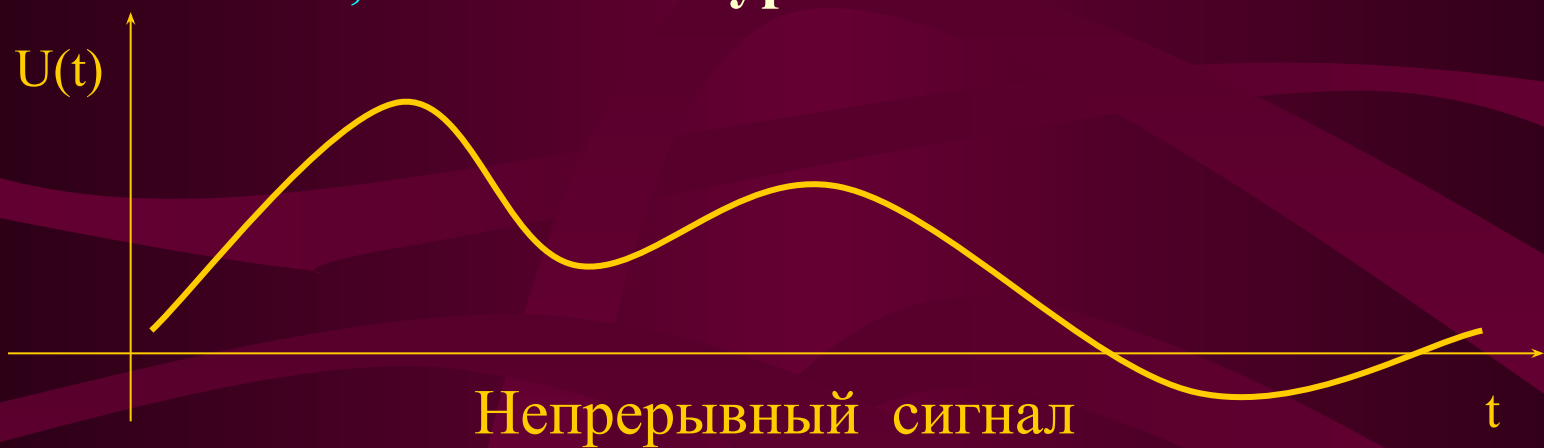
ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ ЛЕКЦИИ

- ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДИСКРЕТИЗАЦИИ
- ТЕОРЕМА КОТЕЛЬНИКОВА-НАЙКВИСТА
- КВАНТОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО СИГНАЛА
- ВЫБОР ВЕЛИЧИНЫ ШАГА КВАНТОВАНИЯ
- ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ЦАП)
- ПАРАМЕТРЫ ЦАП
- АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (АЦП)
- ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ
- ПАРАМЕТРЫ АЦП

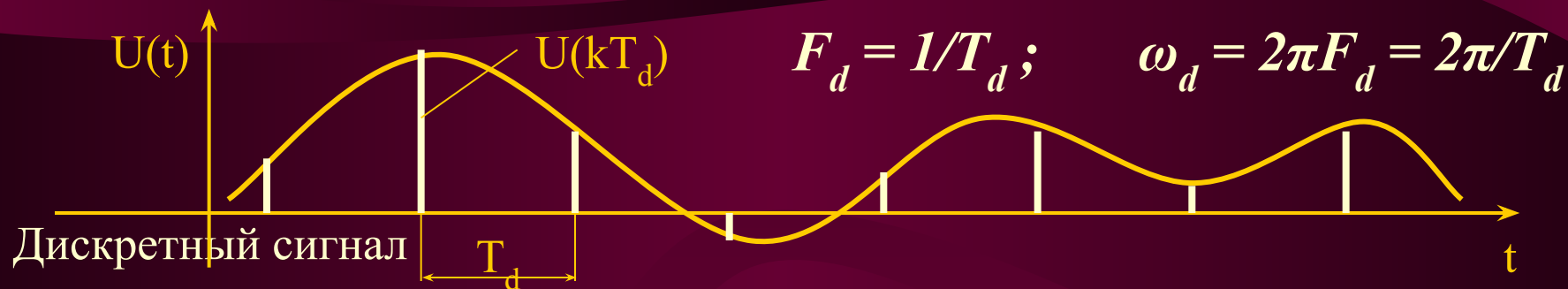
Под **ДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ** будем понимать *преобразование функции непрерывного времени в функцию дискретного времени, представляемую совокупностью величин, называемых координатами (или дискретными отсчетами), по значениям которых исходная непрерывная функция может быть восстановлена с заданной точностью.*



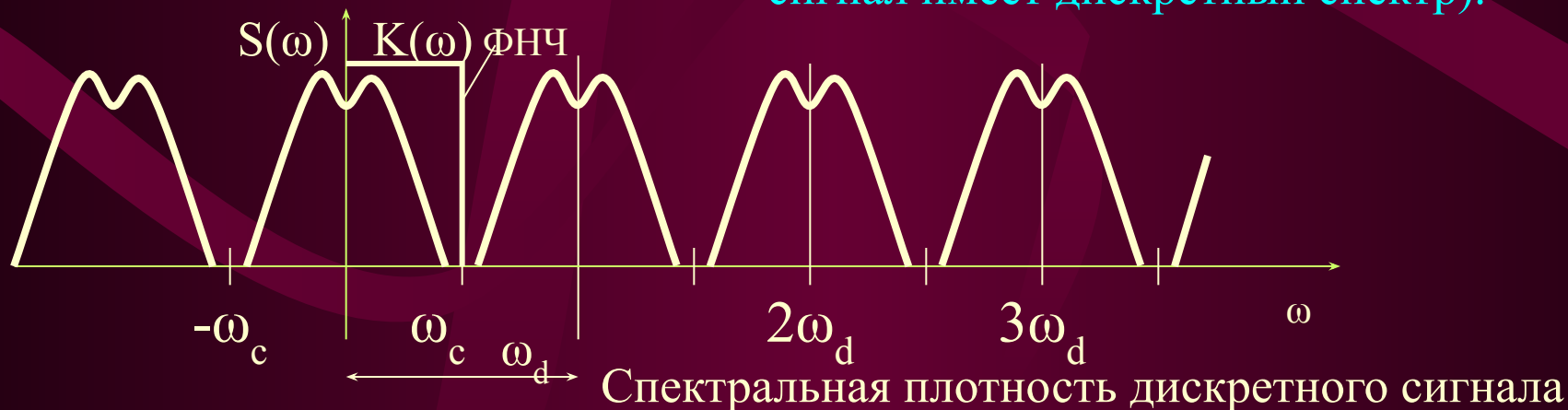
Под **КВАНТОВАНИЕМ** будем понимать *преобразование* некоторой величины с непрерывной шкалой значений в величину, имеющую дискретную шкалу значений. Это преобразование сводится к замене любого мгновенного значения сигнала одним из конечного множества разрешенных значений, называемых уровнями квантования

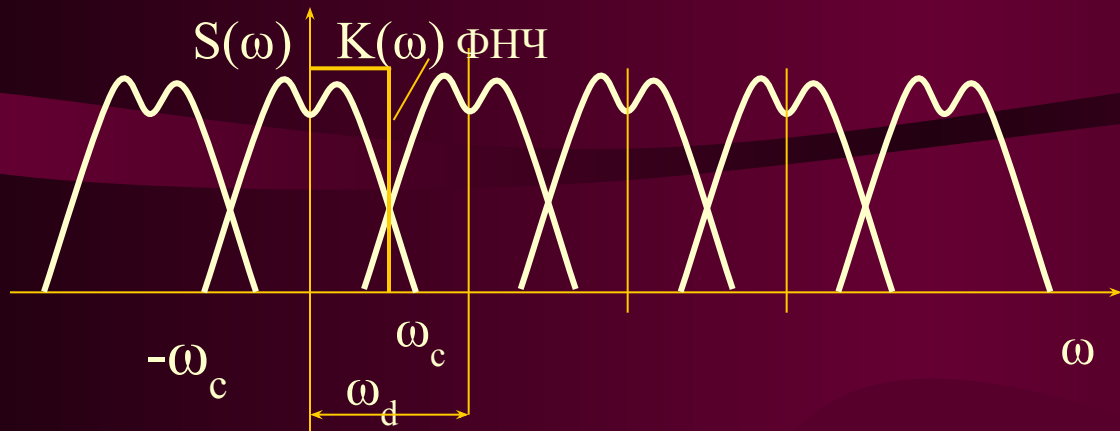


ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДИСКРЕТИЗАЦИИ



Учитывая полную симметричность прямого и обратного преобразования Фурье, можно утверждать, что дискретизация сигнала по времени приведет к образованию периодической функции спектральной плотности. (Аналогично: периодический по времени сигнал имеет дискретный спектр).



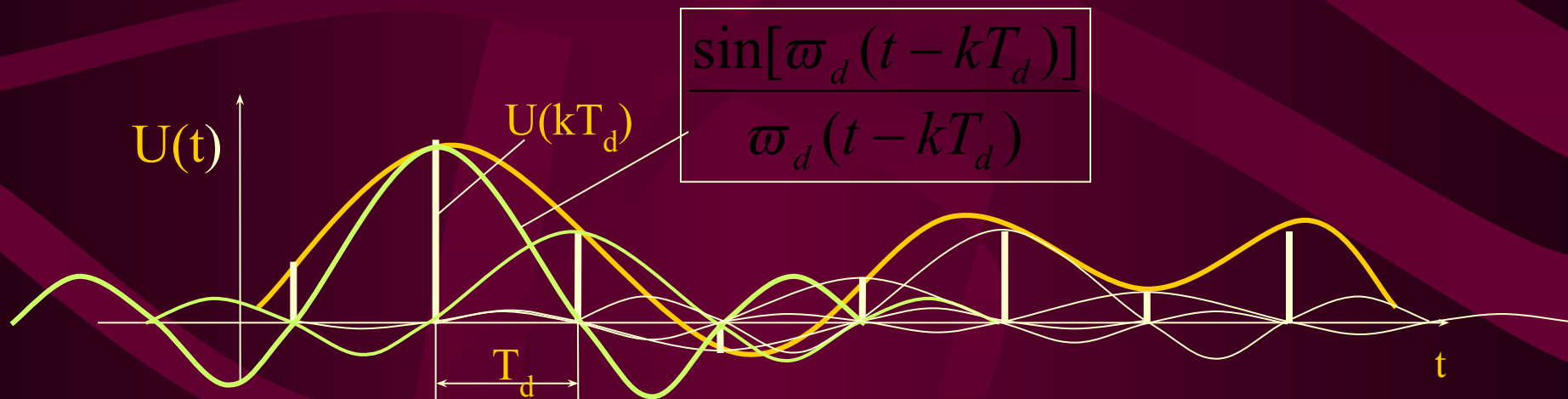


$$\omega_c \leq \omega_d / 2; \quad F_c \leq F_d / 2;$$

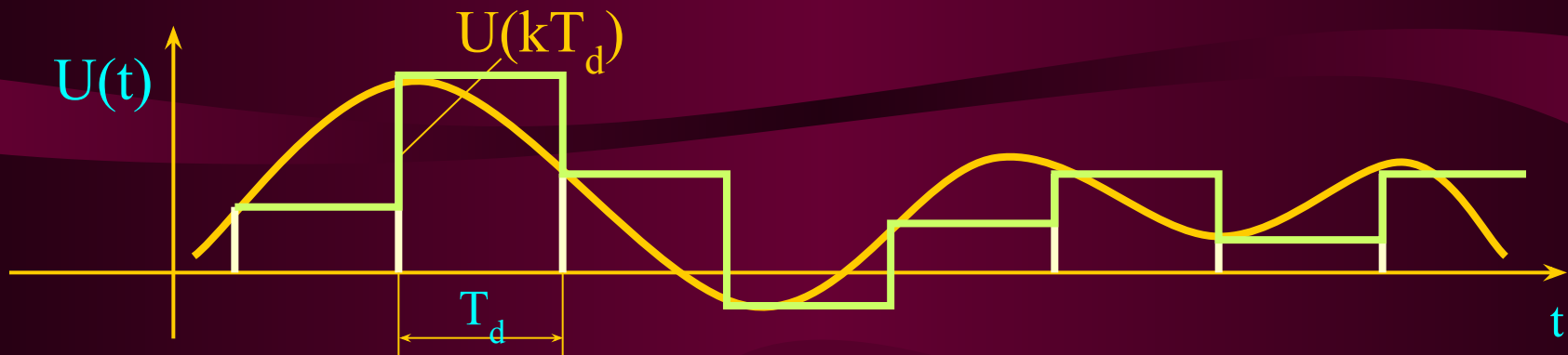
$$F_d \geq 2 F_c; \quad T_d \leq 1 / (2 F_c)$$

Спектральная плотность сигнала с увеличенным временем дискретизации

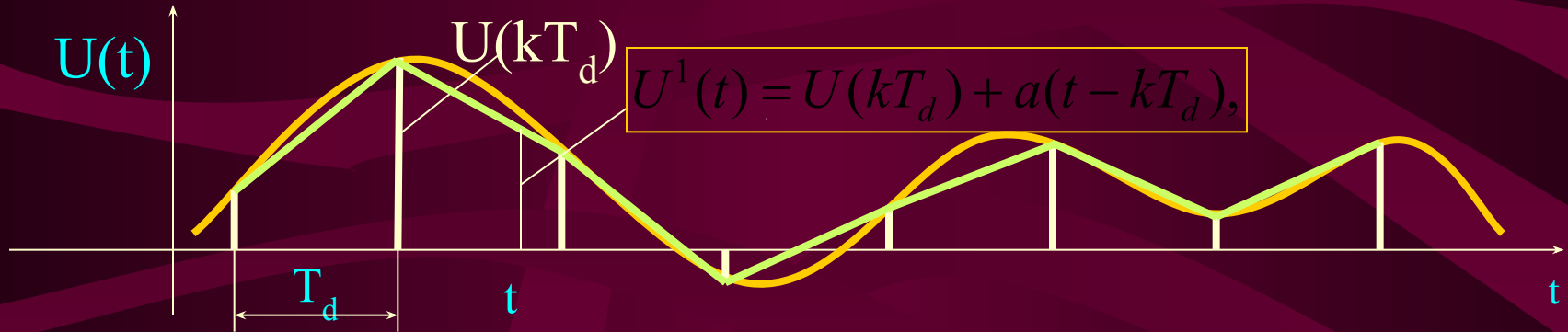
$$U(t) = \sum_k U(kT_d) * \frac{\sin[\omega_d(t - kT_d)]}{\omega_d(t - kT_d)}$$



Восстановление непрерывного сигнала по дискретным отсчетам

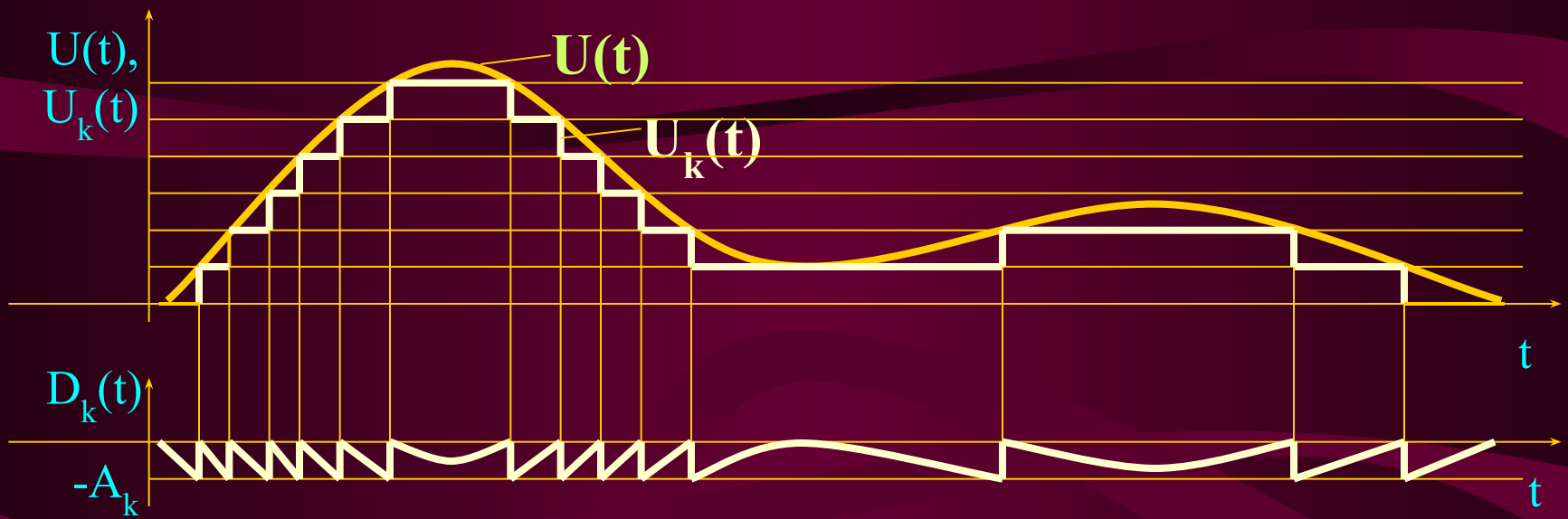


Аппроксимация полиномом нулевого порядка

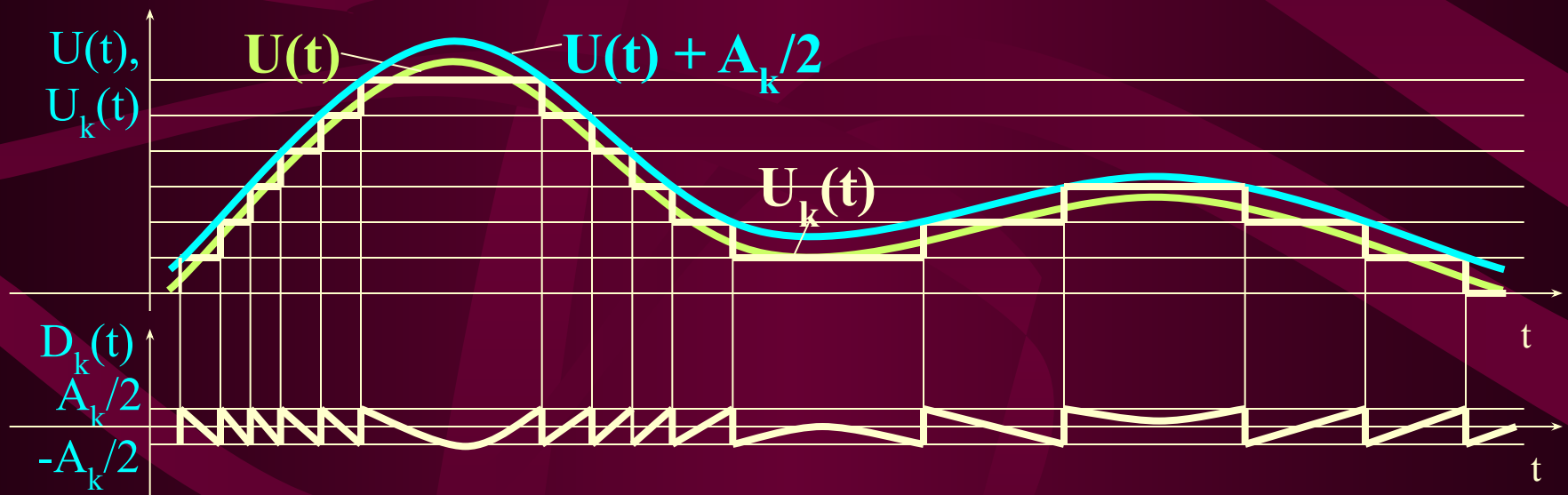


Кусочно-линейная аппроксимация полиномом первой степени

- Более высокую точность обеспечивает аппроксимация полиномом, имеющим **порядок выше первого**. Кривая такой аппроксимирующей функции может состоять из отрезков **дуг окружностей**, отрезков **парабол** и т.п.



Квантование непрерывного сигнала с отбрасыванием дробной части



Квантование непрерывного сигнала с округлением

ВЫБОР ВЕЛИЧИНЫ ШАГА КВАНТОВАНИЯ

Относительная погрешность квантования

$$\xi = \frac{D_k(t)}{U(\max) - U(\min)} \quad \xi = \frac{1^\circ C}{+50^\circ C - (-50^\circ C)} = 0,01(\text{раз})$$

Относительные величины принято выражать в дециБелах или Неперах:

$$\xi(\text{дБ}) = 10 * \lg(\xi) \quad \xi(\text{Неп}) = \ln(\xi).$$

Величина, обратная относительной погрешности, называется динамическим диапазоном передаваемых сообщений

$$d = \frac{1}{\xi} = \frac{U(\max) - U(\min)}{A_k} \quad d(\text{дБ}) = -\xi(\text{дБ}).$$

Динамический диапазон непрерывных сообщений (сигналов) определяется отношением максимального сигнала к уровню шумов в непрерывном сигнале.

- **Динамический диапазон** непрерывных сообщений (сигналов) определяется отношением **максимального сигнала** к уровню шумов в непрерывном сигнале.
- Например, когда мы говорим о **динамическом диапазоне акустических сигналов**, за уровень шума (или минимального акустического сигнала) принимается **уровень шума в лесу** в безветренную погоду.
- При этом мощность акустического сигнала при **спокойном разговоре** нескольких человек в **1000 раз** больше или составляет **30дБ**.
- Уровень шума на проезжей части улицы в час пик оценивается в **1000000 раз** больше мощности шума в безветренном лесу или **60дБ**.

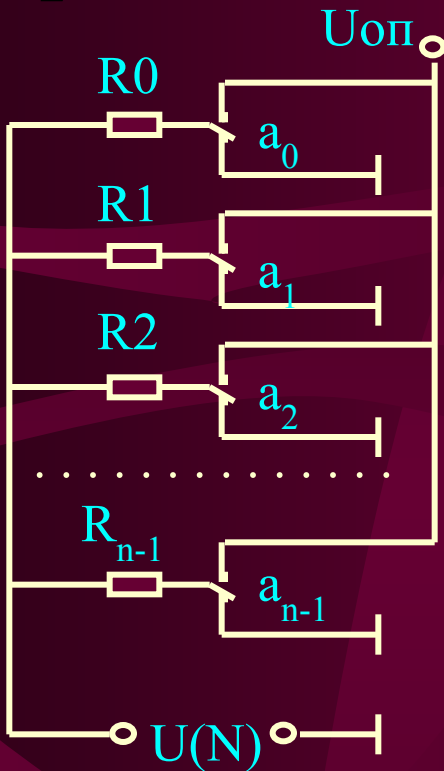
- Шум моторов реактивного самолета по мощности в 10^{12} раз больше минимального шума леса или **120дБ**. Обычно этот уровень называют порогом болевых ощущений для акустического аппарата человека (уха).
- Таким образом, говоря об **уровне акустического сигнала в дБ**, мы сравниваем этот сигнал с **минимальным шумом**.
- Максимальный динамический диапазон акустических сигналов, воспринимаемых человеческим ухом — **120дБ**.
- Акустический сигнал с таким **диапазоном** можно преобразовать в **аналоговый электрический сигнал** (например, в напряжение) с помощью **микрофона**.

- Однако, передача такого сигнала через **реальные каналы связи**: проводной (телефонный), радио-канал, запись и воспроизведение на магнитофон или другие носители информации – происходит с **потерей динамического диапазона**.
- **Динамический диапазон аналоговых каналов связи составляет от 20дБ до 60дБ. Это объясняется наличием шумов в каналах связи.**
- **Квантование аналоговых сигналов на передающем конце и передача цифровых сигналов по каналам связи позволяют передавать сигналы с динамическим диапазоном 90дБ и более. Например, запись музыкальных программ на лазерные компакт-диски (CD).**

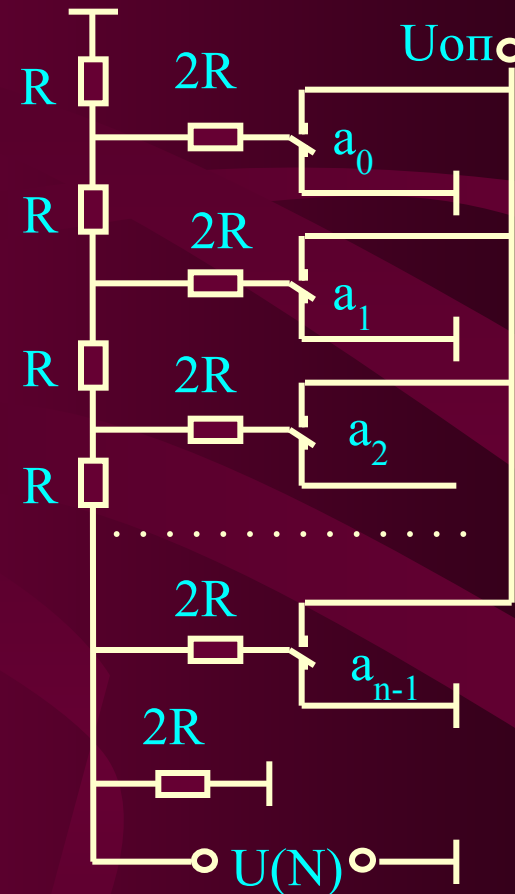
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ЦАП)

предназначены для преобразования цифрового кода N в пропорциональные аналоговые уровни напряжения $U(N)$

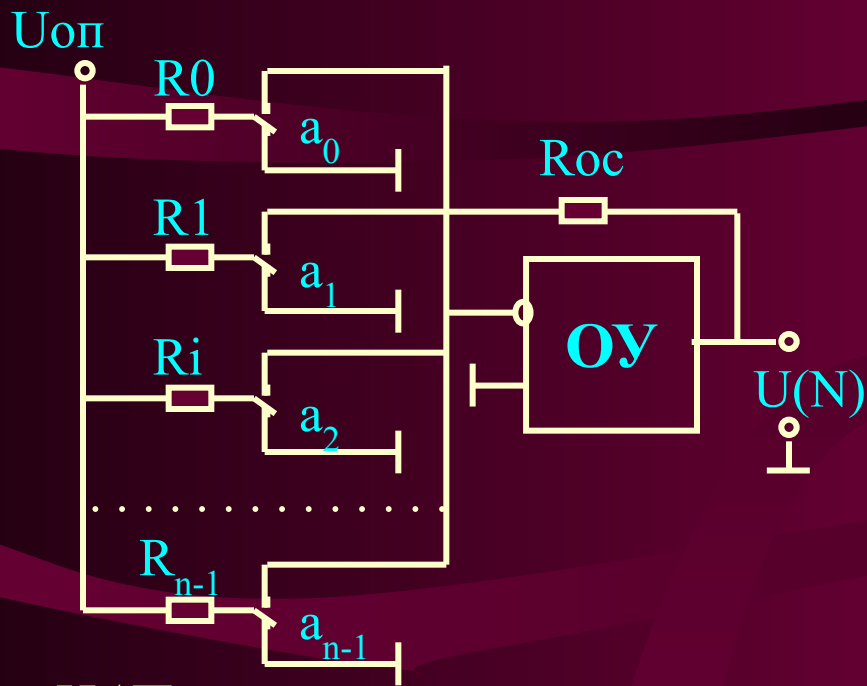
$$R_i = R * 2^{(n-i-1)}$$



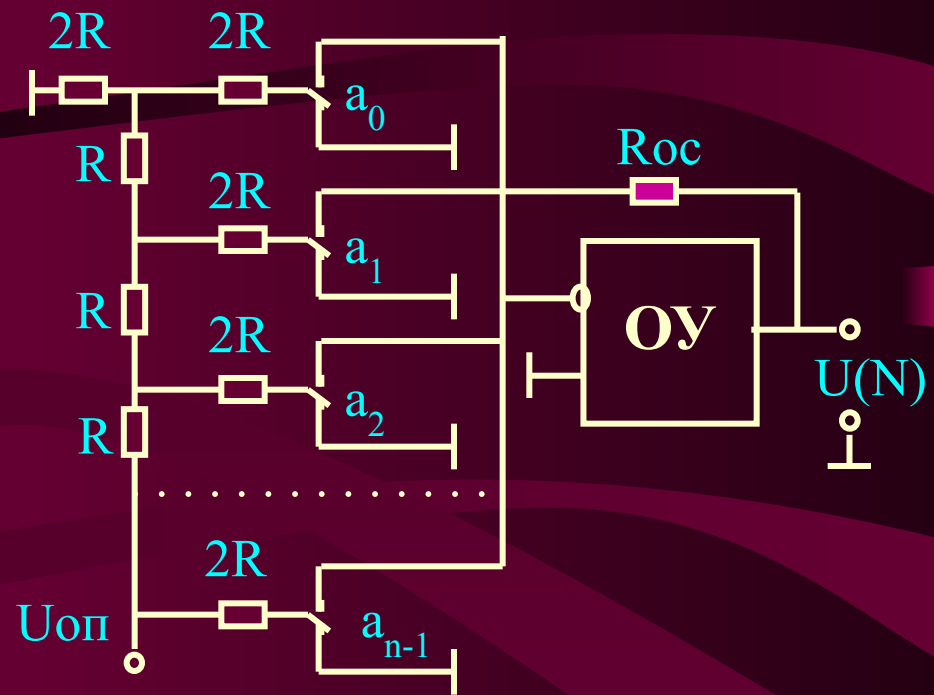
ЦАП с делением напряжения и матрицей $R * 2^n$



ЦАП с делением напряжения и матрицей $R-2R$



ЦАП с суммированием токов и весовыми резисторами



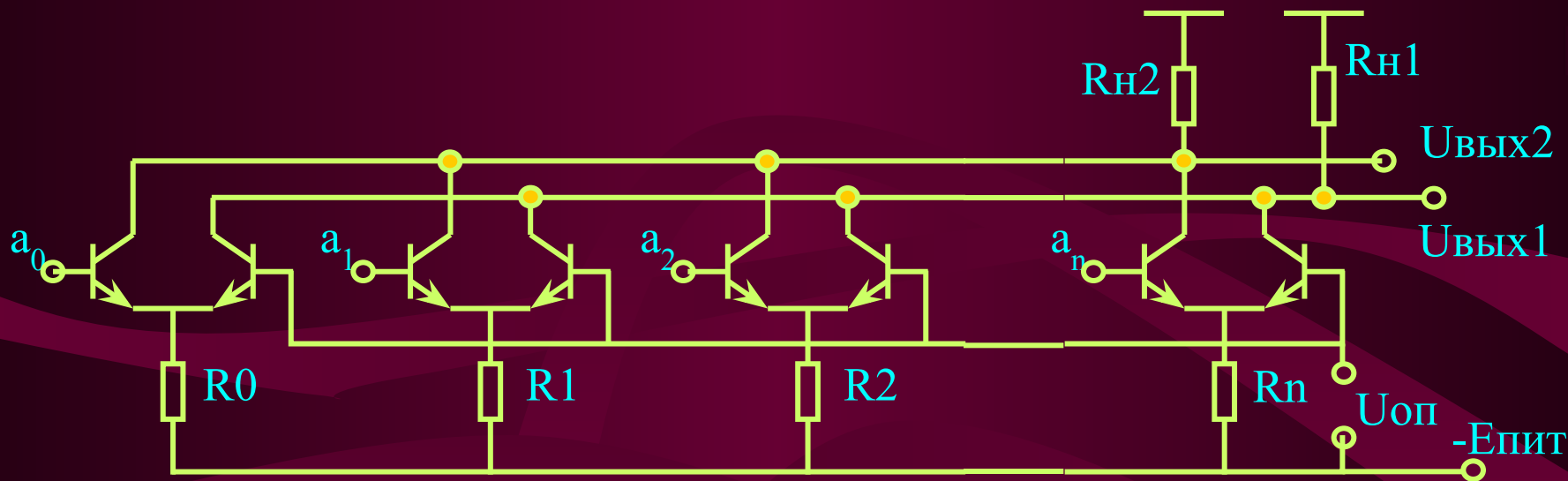
ЦАП с суммированием токов и резисторами $R-2R$

- Коммутация весовых резисторов осуществляется аналоговыми ключами на МОП структурах
- Изменяя номинал резистора R_{oc} , можно менять коэффициент преобразования.
- Если вместо опорного напряжения ($U_{оп}$) подать аналоговый сигнал, можно цифровым кодом регулировать коэффициент передачи, а следовательно, и уровень аналогового сигнала на выходе схемы.

Максимальным быстродействием обладает

ЦАП НА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯХ ТОКОВ

и суммированием весовых токов на выходных резисторах



Весовые токи задаются резисторами $R_0..R_{n-1}$ в цепях эмиттеров переключателей токов.

Выходные токи суммируются в цепях объединенных коллекторов и выделяются в виде выходного напряжения *на внешних резисторах R_{n1} или R_{n2} номиналом 50...75 Ом.*

ЦАП на переключателях токов позволяет получить на выходе **два** аналоговых сигнала: **прямой** сигнал и его **инверсию**

ПАРАМЕТРЫ ЦАП

Точность преобразования ЦАП зависит от:

- степени температурного согласования сопротивлений матриц;
- стабильности опорного напряжения;
- характеристик ОУ и
- внутреннего сопротивления МОП коммутаторов.

Погрешность переходного процесса, т.е. выбросы на фоне выходного сигнала обусловлены эффектами гонок в логических цепях, а также разными временами включения и выключения коммутаторов ЦАП.

Для устранения выбросов переходных процессов на выходе ЦАП обязательно устанавливается Фильтр Низких Частот (ФНЧ) с граничной частотой вдвое меньшей частоты дискретизации сигнала (с учетом соотношения Котельникова).

Основной характеристикой ЦАП является передаточная характеристика: $U=f(N)$, которая представляет собой ступенчатую линию. При этом реальная характеристика отличается от идеальной. Для оценки этих различий вводят статические и динамические параметры ЦАП.

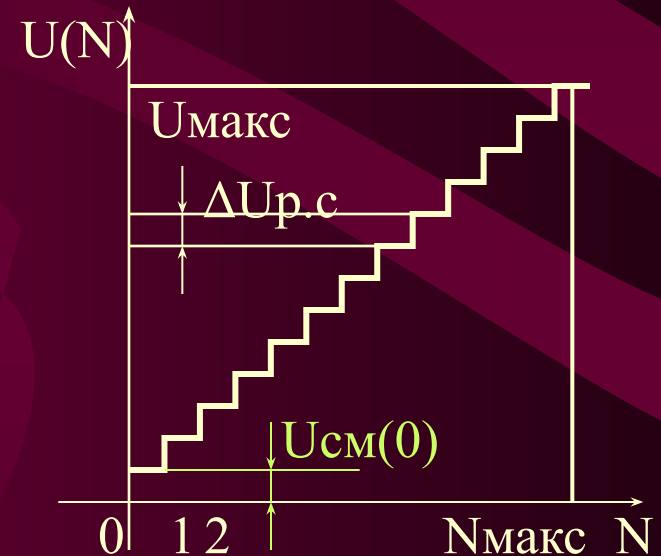
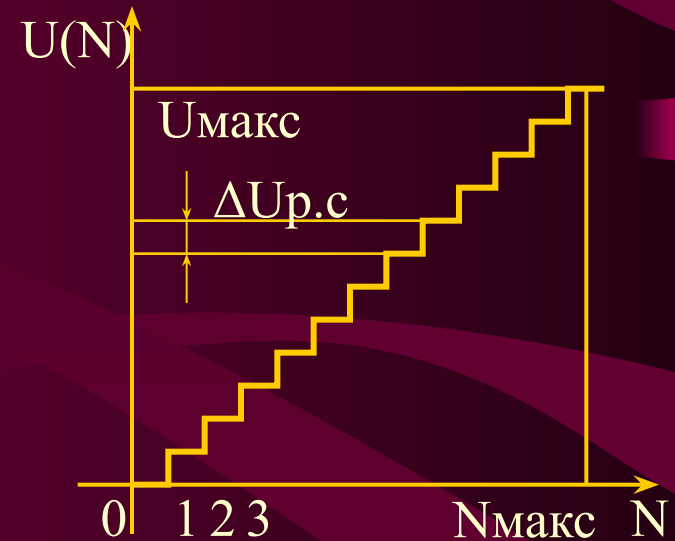
СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЦАП

□ □ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ или ШАГ КВАНТОВАНИЯ ($\Delta U_{p.c}$) - минимальное приращение выходного напряжения при преобразовании соседних кодов (эта величина равна е.м.р.).

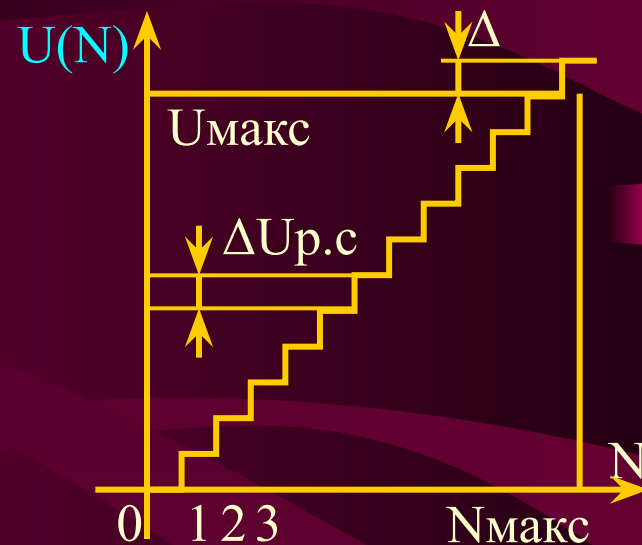
$$\Delta U_{p.c} = U_{\text{макс}}(N) / (2^n),$$

где: n - количество двоичных разрядов ЦАП.

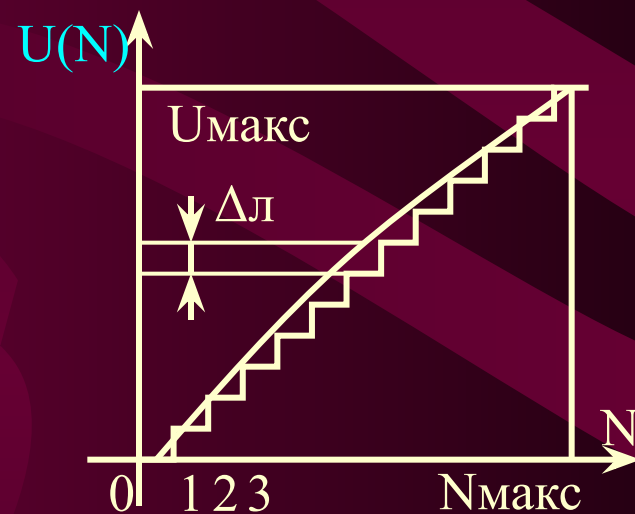
□ ПОГРЕШНОСТЬ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ - $U_{см}(0)$ - выходное напряжение при нулевом входном коде ($N=0$). Эта погрешность называется АДДИТИВНОЙ (она складывается с выходным напряжением).



□ **АБСОЛЮТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (Δ)** - отклонение выходного напряжения от номинального, соответствующего конечной точке преобразования. Измеряется " Δ " в единицах младшего разряда (е.м.р.). Эта погрешность называется **МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ**.



□ **НЕЛИНЕЙНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ($\Delta_{\text{л}}$)** - отклонение реальной передаточной характеристики от идеальной. Значение нелинейности не должно выходить за пределы \pm е.м.р.



ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЦАП

- **ВРЕМЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**
($t_{уст}$) – интервал времени от момента подачи кода N на вход ЦАП до момента, при котором напряжение окончательно войдет в зону шириной $\pm e.m.p.$ или другой оговоренной величины, симметрично расположенной относительно установившегося значения.
- **МАКСИМАЛЬНАЯ ЧАСТОТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ** -
наибольшая частота, при которой параметры ЦАП соответствуют заданным.

Одним из важных параметров ЦАП является - ШУМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ или ШУМ КВАНТОВАНИЯ. Уровень шума ($D_{ш}$) измеряется в относительных единицах, как отношение максимального выходного напряжения ЦАП к величине шага квантования. Обычно уровень шума измеряется в "дециБелах":

$$D_{ш} = 20 * \lg (U_{\max}(N) / \Delta U_{p.c}).$$

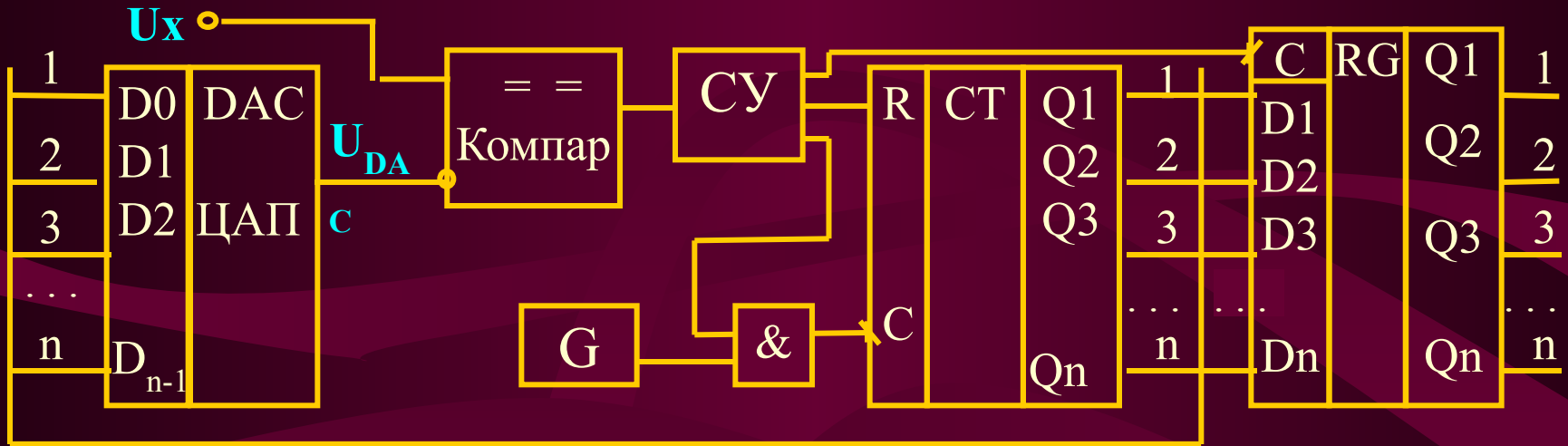
$$D_{ш} = 20 * \lg (N_{\max}) = 20 * \lg (2^n).$$

Уровни шумов квантования ЦАП

Разрядность ЦАП (бит)	6	7	8	10	12	14	16
Уровень шума (дБ)	36	42	48	60	72	84	96

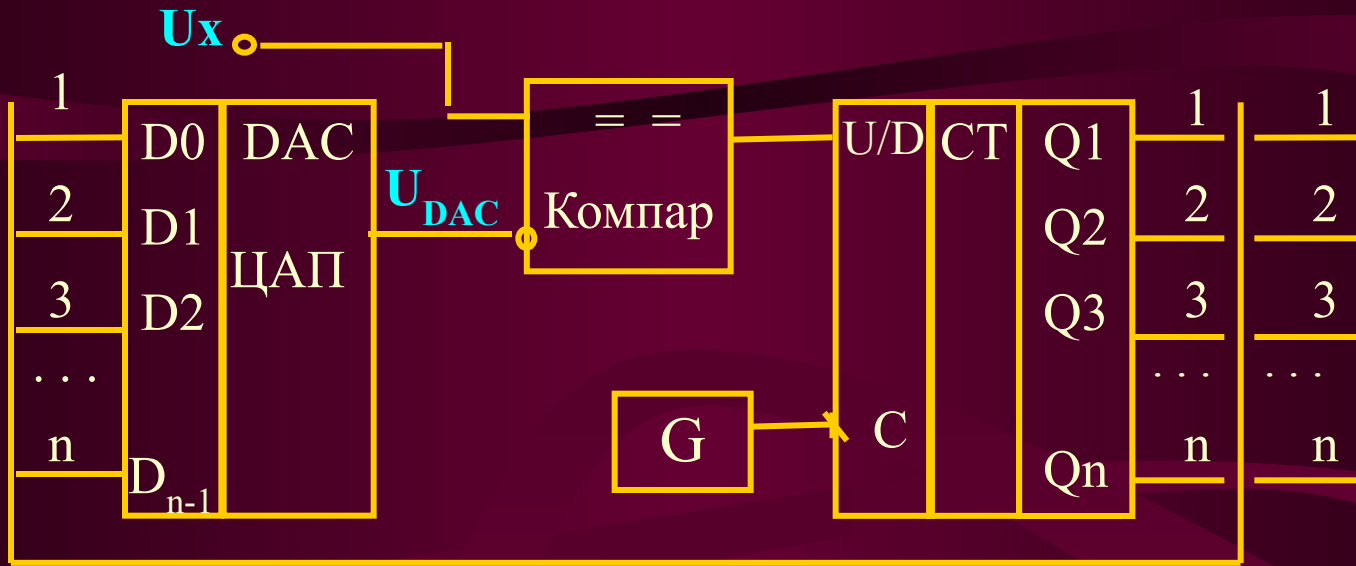
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (АЦП)

преобразовывают дискретные отсчеты аналогового сигнала в цифровой код.

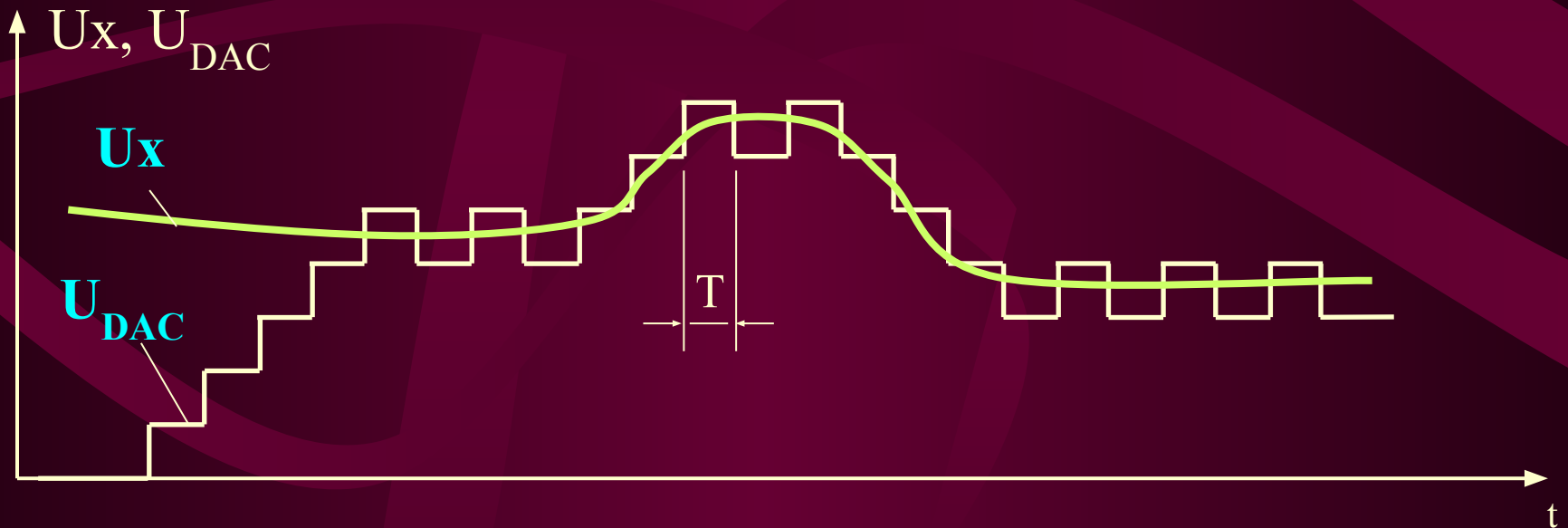


АЦП последовательного типа развешивающего уравнивания





АЦП последовательного типа следящего уравнивания



В АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА ПОРАЗРЯДНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ (АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ)

процесс уравнивания происходит с помощью программного устройства (ПУ) в направлении от старшего разряда с весом $2^{(n-1)}$ к младшим

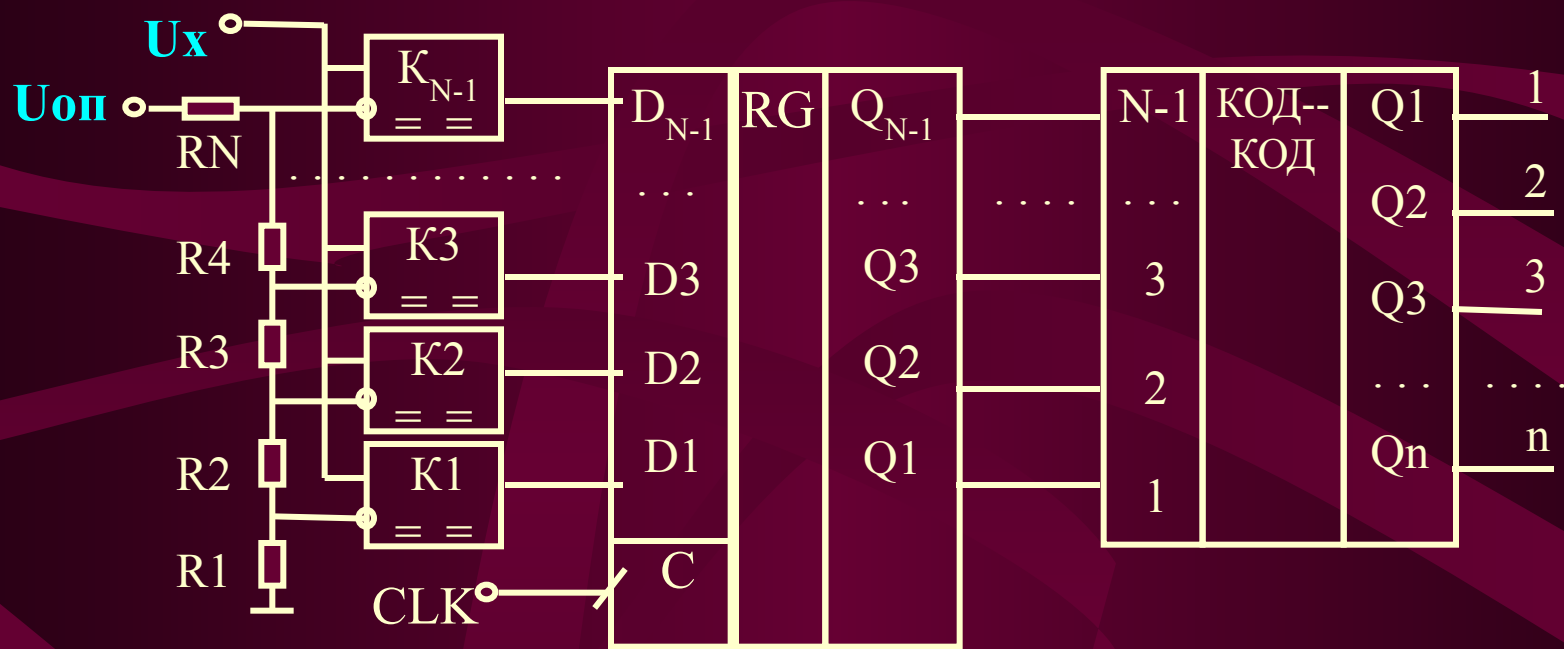


Время преобразования равно «n» тактов входной частоты.

Особенностью применения этого АЦП является необходимость запоминания аналогового входного сигнала U_x на время преобразования при помощи СХЕМЫ ВЫБОРКИ-ЗАПОМИНАНИЯ (СВХ).

АЦП ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА НЕПОСРЕДСТВЕННОГО СЧИТЫВАНИЯ

обладает максимальным быстродействием, т.к. выполняет одновременное квантование сигнала с помощью $N-1$ компараторов, подключенных параллельно к источнику измеряемого сигнала

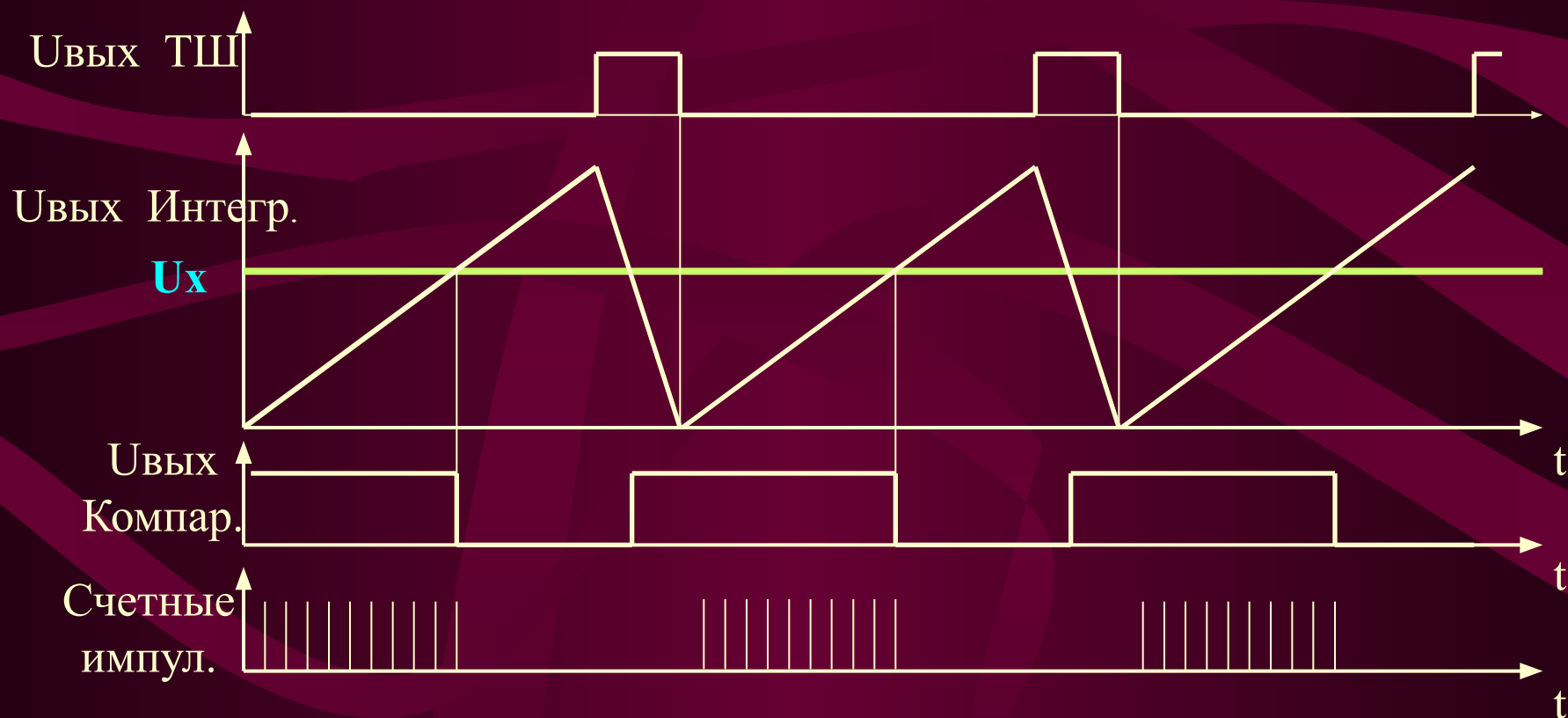


Пороговые уровни компараторов устанавливаются резистивным делителем с **одинаковыми** номиналами. Количество резисторов N и количество компараторов $N-1$ определяется разрядностью выходного кода:

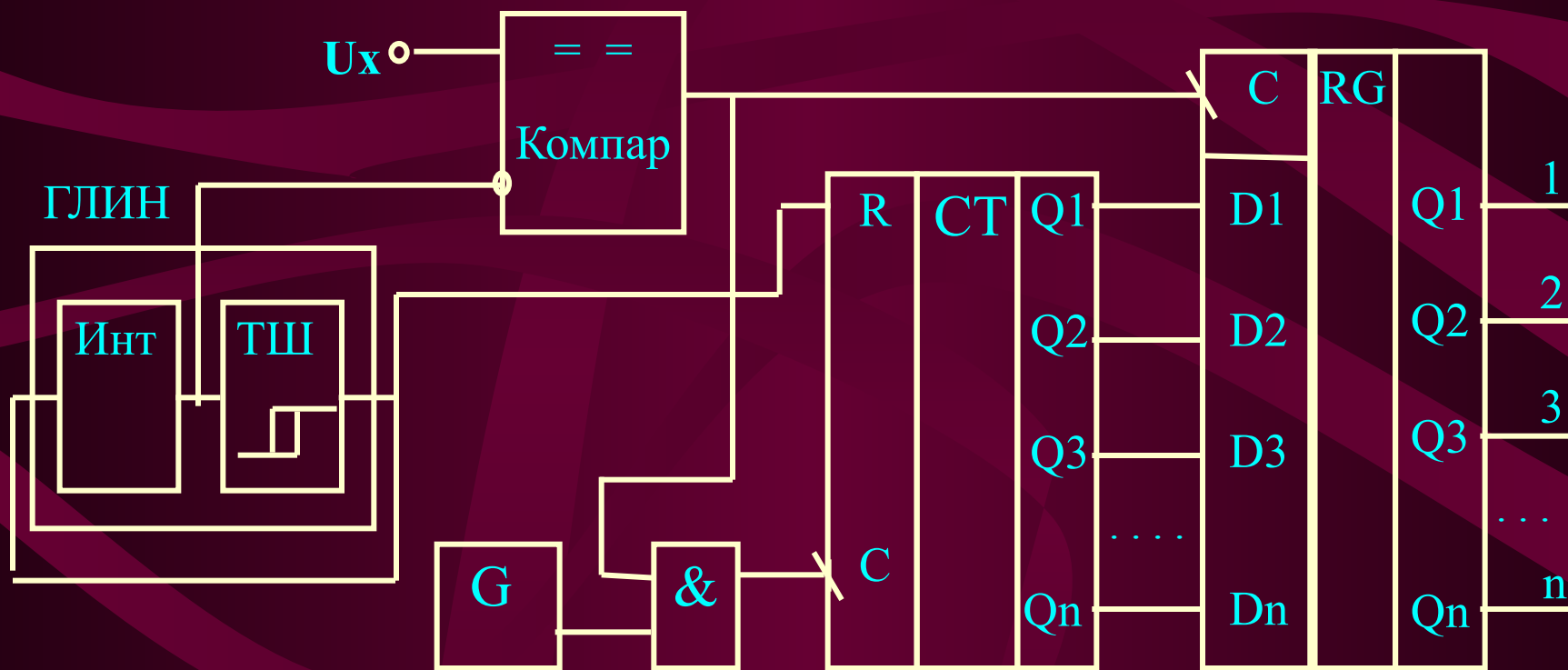
$$N = 2^n$$

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

осуществляется с помощью генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН)



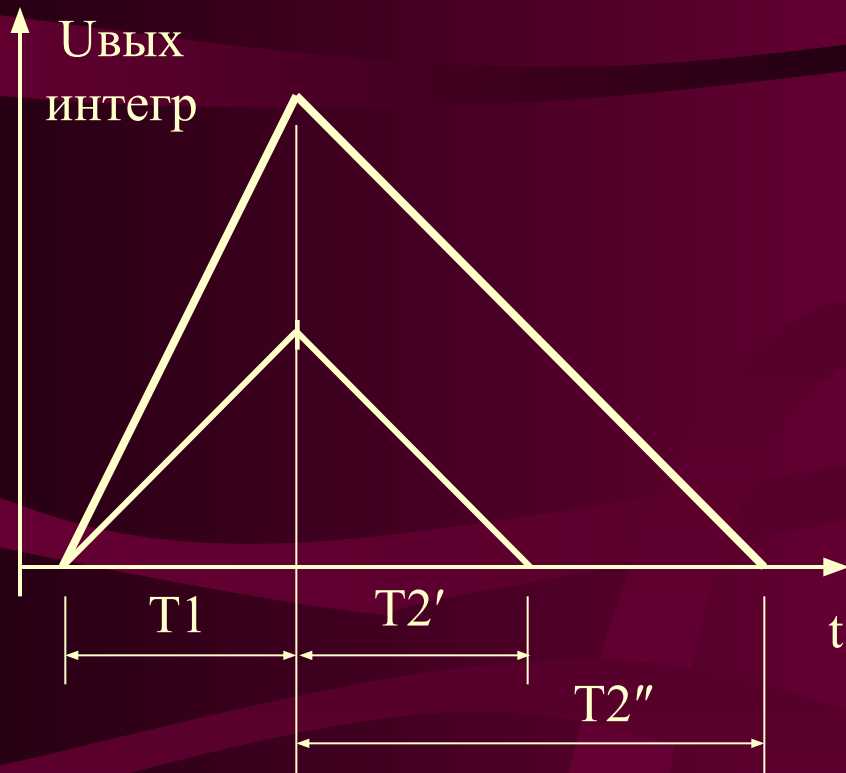
Временной интервал от начала счета до срабатывания компаратора пропорционален величине входного аналогового напряжения. Этот интервал заполняется калиброванными счетными импульсами (с выхода кварцевого генератора **G**), количество которых подсчитывается в счетчике.



Алгоритм работы этой схемы аналогичен АЦП последовательного типа развертывающего уравнивания. Поэтому оба преобразователя могут использоваться для преобразования аналогового напряжения во временной интервал.

Основным недостатком рассмотренных АЦП последовательного типа является их низкая помехоустойчивость от наводок питающей сети. Этот недостаток можно устранить, если в процессе преобразования использовать операцию интегрирования за фиксированный интервал времени, кратный периоду сетевого напряжения.

Такой алгоритм реализован в АЦП С ДВУХТАКТНЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ, в котором полный цикл работы состоит из двух тактов.



В первом такте с помощью аналогового интегратора на операци-онном усилителе интегри-руется входное напряжение за фиксированный интервал времени $T1$. При этом на интегрирующем конденсаторе C накапливается заряд:

$$q1 = \bar{U}_x * T1 / (R * C)$$

где: U_x - среднее входное напряжение за время $T1$.

Во втором такте происходит разряд конденсатора от источника опорного напряжения $U_{оп}$, который имеет полярность **противоположную** входному напряжению, и подключается на вход интегратора с помощью аналогового ключа (**АК**).

ПАРАМЕТРЫ АЦП

□ **ДИАПАЗОН ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН** - максимальное U_{\max} и минимальное U_{\min} для данного АЦП значения измеряемой величины.

□ **ПОГРЕШНОСТЬ КВАНТОВАНИЯ** (дискретности) $U_{кв}$ – методическая погрешность, вызываемая конечным значением шага квантования (единицей младшего разряда е.м.р.).

$$U_{кв} = (U_{\max} - U_{\min}) / (2^n).$$

□ **ПОГРЕШНОСТЬ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ** (аддитивная погрешность) $U_{см}$ - характеризует параллельный сдвиг всей передаточной характеристики реального АЦП по отношению к идеальному.

□ **ПОГРЕШНОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ** (мультипликативная погрешность) - величина, характеризующая отклонение крутизны усредненной передаточной характеристики АЦП от крутизны идеальной характеристики.

□ **НЕЛИНЕЙНОСТЬ** - отклонение передаточной характеристики АЦП во всем диапазоне изменения входного сигнала.

□ **ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ F_d** - частота, с которой происходит образование дискретных значений сигнала.

□ **ВРЕМЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ $T_{пр}$** - время, отсчитываемое от начала преобразования до появления на выходе кода, соответствующего данной выборке.

□ **ВРЕМЯ ВЫБОРКИ T_v** - время, в течение которого происходит образование одного выбранного значения.

Вопросы для экспресс-контроля

- 1. Зачем применяется преобразование **непрерывных** сигналов в **дискретные**?
- 2. Назовите основные соотношения **Котельникова-Найквиста** при дискретизации сигнала.
- 3. Назовите **точный метод** восстановления **непрерывного** сигнала из **дискретного**. Привести практические примеры восстановления непрерывных сигналов из дискретных с **меньшей точностью**.
- 4. Чем определяется выбор величины **шага квантования** непрерывных сигналов?
- 5. В чем отличие **абсолютной погрешности квантования** от **относительной погрешности**? Величины измерения **относительной погрешности**.

Вопросы для экспресс-контроля

- 6. Назначение ЦАП и АЦП.
- 7. Преимущества ЦАП с матрицей R-2R.
- 8. Какой ЦАП обладает максимальным быстродействием? Чем достигается максимальное быстродействие?
- 9. От чего зависит точность ЦАП?
- 10. Перечислите основные статические и динамические параметры ЦАП.
- 11. Что такое шум квантования? Как его уменьшить?

ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

СПАСИБО ЗА

ВНИМАНИЕ