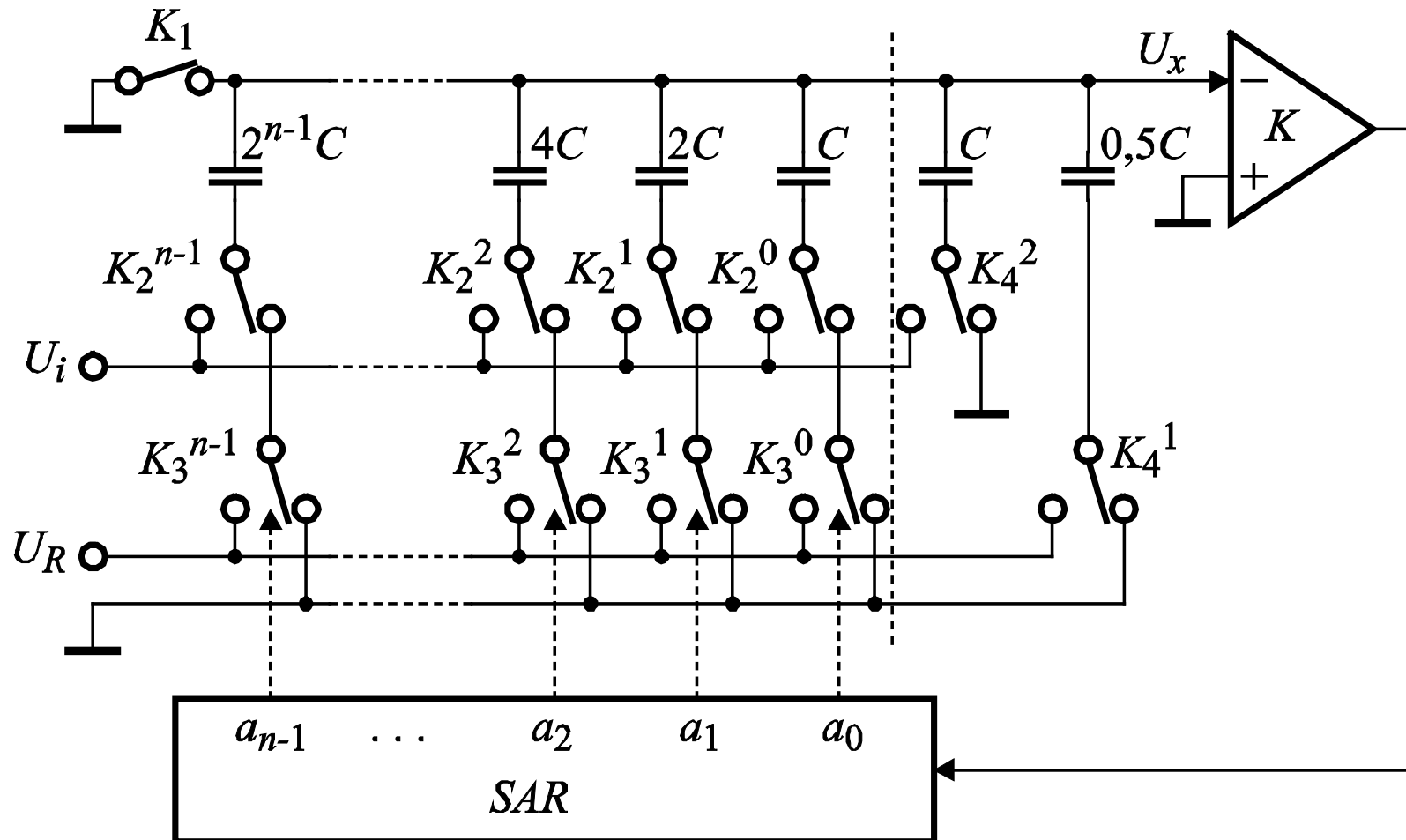


Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

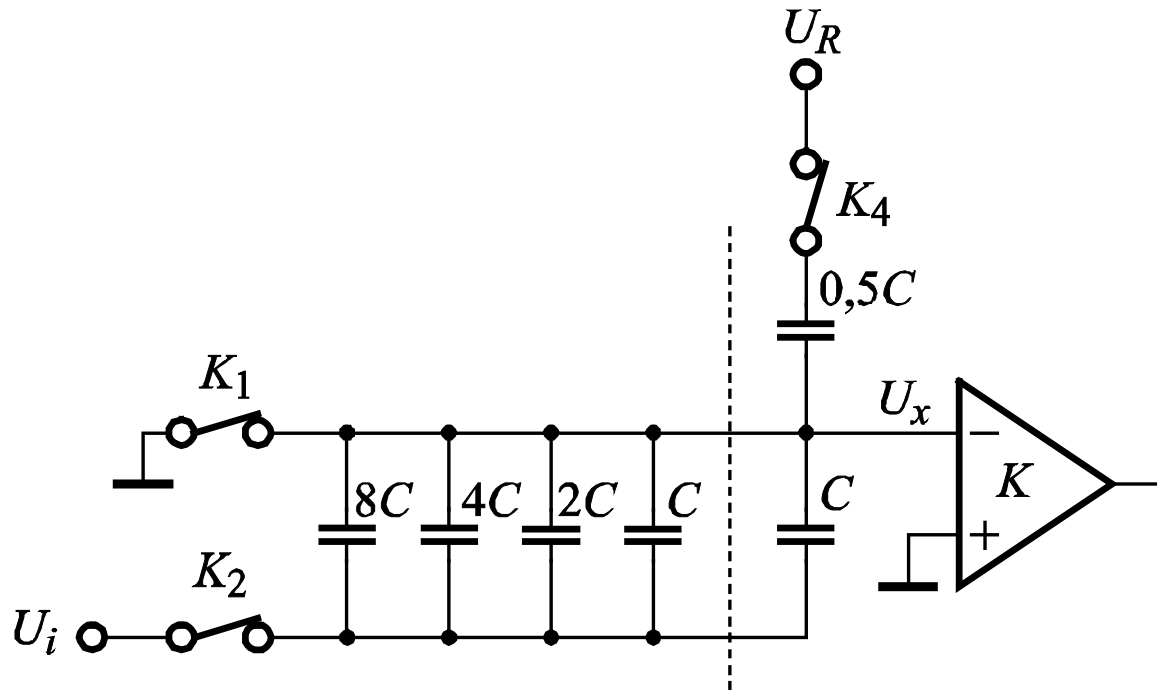
Поради начина на изграждането, АЦП със зарядно преразпределение не се нуждаят от външни схеми за запомняне на сигнала по време на преобразуването, тъй като самата капацитивна група извършва запомняне на аналоговото входно напрежение. Капацитивната група се състои от кондензатори, чиито капацитети се отнасят помежду си както разрядите на преобразувателя (за двоично преобразуване – както степените на 2). Допълнително са включени още два капацитета със стойност C и $0,5C$.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП



Термоуловен аналогово-цифров преобразувател със зарядно преразпределение

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

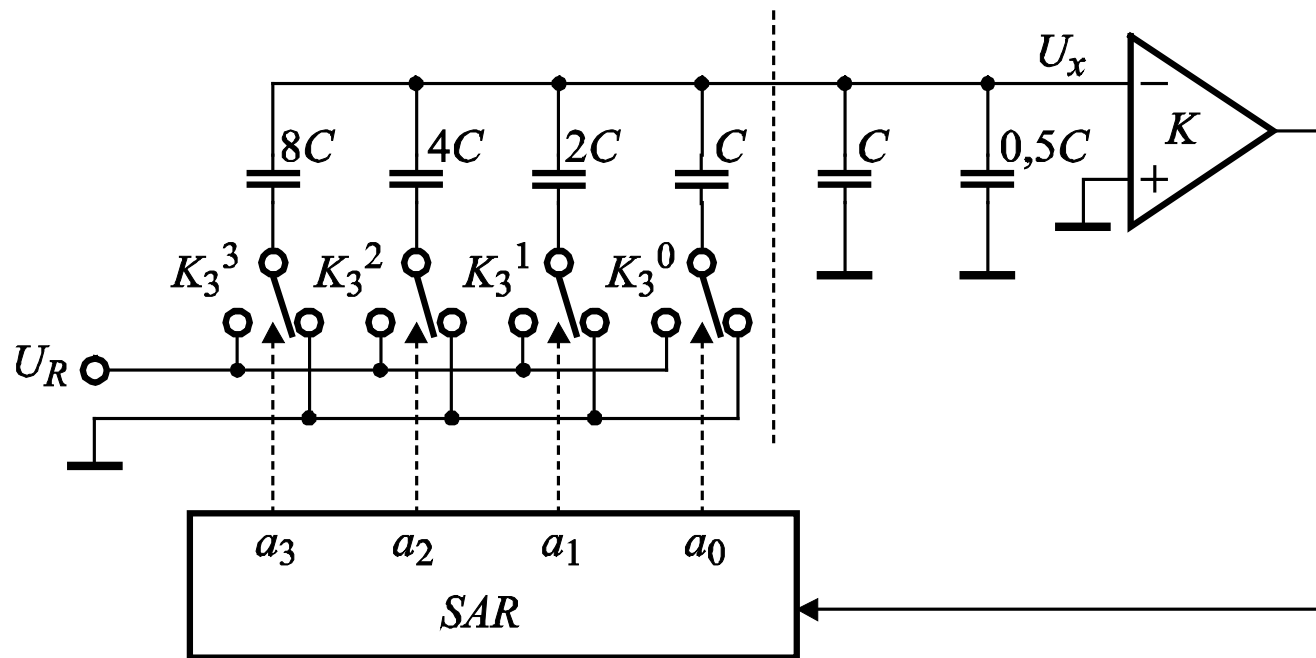


4-разряден АЦП със зарядно преразпределение в режим на следене на входното напрежение

Състоянията, в които се намира един АЦП със зарядно преразпределение, са две. Едното е състояние на следене на входната величина. Всички кондензатори, с изключение на този със стойност $0,5C$, са свързани успоредно и на тях се подава входното напрежение U_i . Кондензаторът $0,5C$ се свързва към опорното напрежение U_R .

В случая натрупаният заряд върху капацитивната група е $Q_i = U_i 16C + U_R 0,5C$.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП



4-разреден АЦП със зарядно преразпределение в режим на запомняне и преобразуване на входното напрежение

Според състоянието на битовете в SAR съответстващите им кондензатори се превключват към опорното напрежение U_R (ако битът е 1) или към маса.

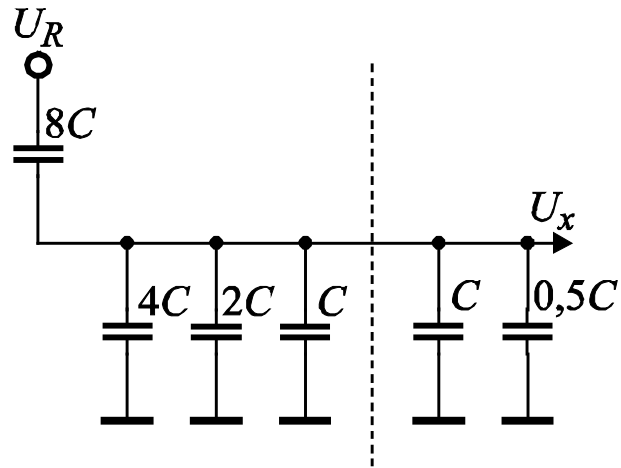
Вторият режим е режим на запомняне и претегляне на входното напрежение. Напрежението U_x в общата точка на групата се следи от компаратора, който управлява регистъра за последователно приближение.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

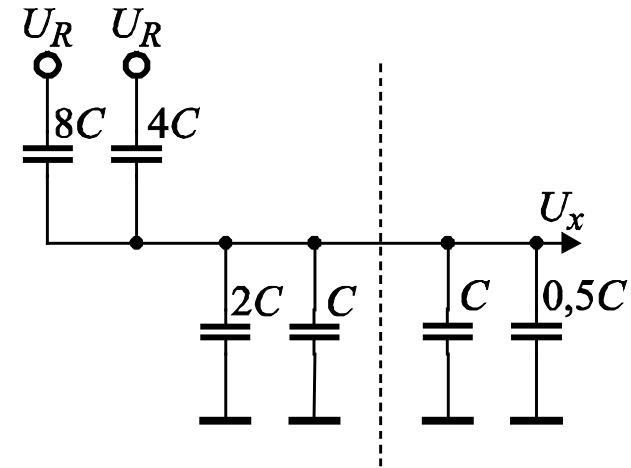
Превключването започва от най-старшия бит. След всяко превключване състоянието на изхода на компаратора определя дали управляваният бит в SAR ще остане в 1, или ще се върне в 0.

Разглежда се примера, че е подадено входно напрежение $U_i = 9U_{LSB}$. Опорното напрежение определя диапазона на преобразуване. За 4-разряден АЦП $U_{LSB} = U_R/16$, откъдето $U_i = 9U_R/16$. Внесеният в капацитивната група заряд ще бъде $Q_i = 9U_R16C/16 + U_R0,5C$ или $Q_i = U_R9,5C$. При първата стъпка от претеглянето капацитетът $8C$ се свързва към U_R , а останалите към маса.

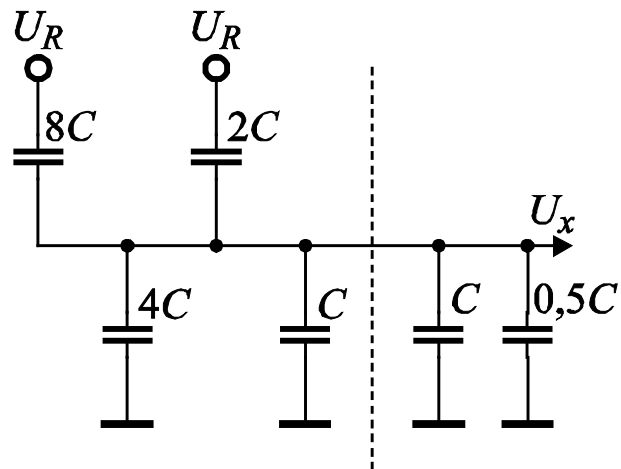
Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП



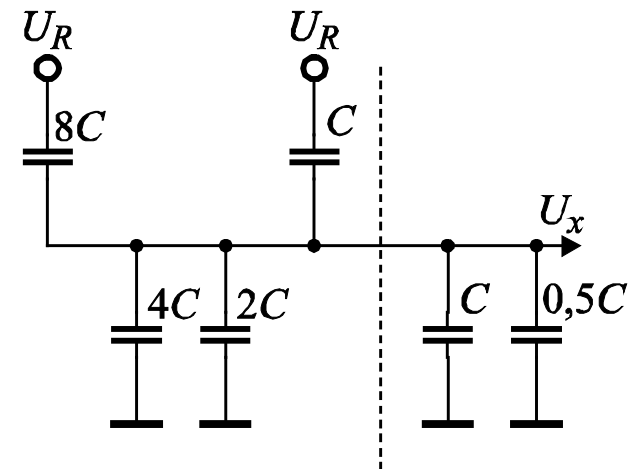
a)



б)



в)



г)

Последователно пресвързване на капацитивната матрица на 4-разряден АЦП при преобразуване на входно напрежение със стойност $U_i = 9U_{LSB}$

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Уравнението на заряда в капацитивната група ще бъде $Q = (U_R - U_x)8C + (0 - U_x)8,5C$. При новото свързване на капацитетите настъпва преразпределение на заряда, но неговото количество остава постоянна величина. Приравнява се $Q = Q_i$, т.е. $U_R 8C - U_x 8C - U_x 8,5C = U_R 9,5C$, откъдето $U_x = -1,5U_R/16,5$. Получава се отрицателна стойност, следователно $a_3 = 1$, а капацитетът $8C$ трябва да остане свързан към U_R .

При втората стъпка капацитетът $4C$ се свързва към U_R . Зарядното уравнение става $Q = (U_R - U_x)12C + (0 - U_x)4,5C$. Приравнява се отново $Q = Q_i$, т.е. $U_R 12C - U_x 12C - U_x 4,5C = U_R 9,5C$, откъдето $U_x = 2,5U_R/16,5$. Стойността е положителна, следователно $a_2 = 0$, а капацитетът $4C$ се свързва към маса.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

При третата стъпка от претеглянето кондензаторът $2C$ се свързва към U_R . Зарядното уравнение придобива следния вид: $Q = (U_R - U_x)10C + (0 - U_x)6,5C$. Приравнява се $Q = Q_i$ и се получава $U_R10C - U_x10C - U_x6,5C = U_R9,5C$, откъдето $U_x = 0,5U_R/16,5$. Получената стойност е положителна, следователно $a_1 = 0$, а кондензаторът $2C$ трябва да се свърже към маса.

Четвъртата стъпка от претеглянето е кондензаторът C да се свърже към U_R . Сега зарядното уравнение придобива следния вид: $Q = (U_R - U_x)9C + (0 - U_x)7,5C$. Отново се приравнява $Q = Q_i$, като се получава $U_R9C - U_x9C - U_x7,5C = U_R9,5C$, откъдето $U_x = -0,5U_R/16,5$. Получената стойност е отрицателна, следователно $a_0 = 1$.

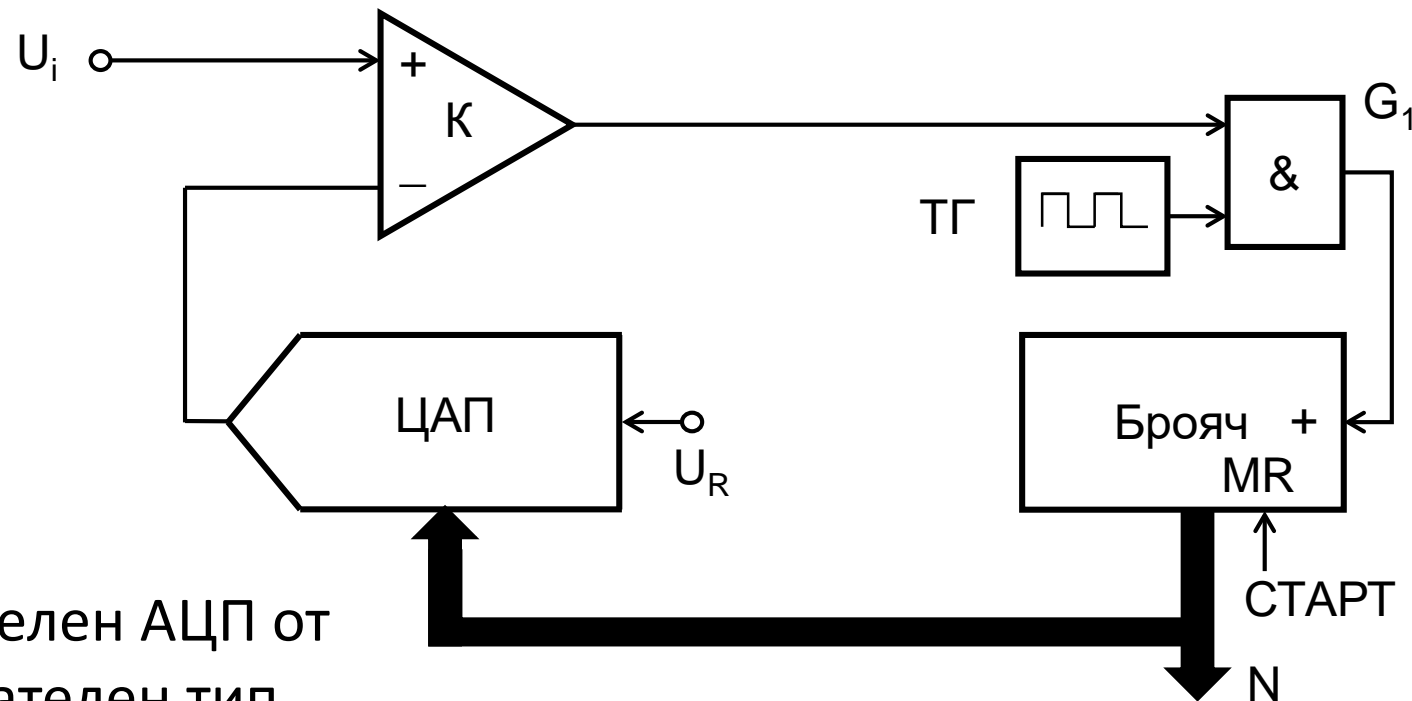
Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

След претеглянето на последния разряд се получава цифрова стойност $N = 1001$, което съответства на подаденото входно напрежение в примера.

АЦП със зарядно преразпределение намират голямо приложение като вградени АЦП в съвременните CMOS едночипови микроконтролери. Необходимо е да се отбележи, че капацитивната група вместо от кондензатори, чиито капацитети се отнасят помежду си както разрядите на преобразувателя, може да се изгради и чрез C-2C матрица (за двоично преобразуване), както и да се използва комбинация от двата подхода.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Аналогово-цифровите преобразуватели, работещи по **преброятелен метод**, използват прости средства и достигат висока точност. Времето на преобразуване обаче е значително. Тяхното разнообразие е голямо.



Преброятелен АЦП от последователен тип

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

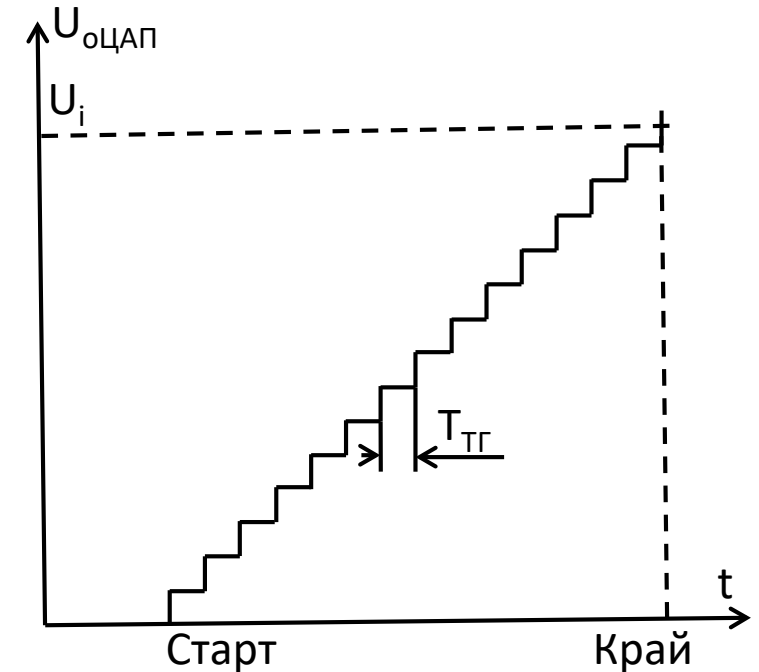
Преброителният АЦП с последователно (развиващо) уравнивяване съдържа ЦАП, компаратор (К), логическа схема И (G_1), двоичен брояч и тактов генератор (ТГ). Сигналят СТАРТ за начало на преобразуването се подава на входа за асинхронно нулиране и броячът се установява веднага в състояние нула. Изходите на брояча са свързани с входовете на ЦАП и в момента неговото изходно напрежение става равно на 0. Компараторът сравнява това напрежение с входното напрежение U_i и при наличие на такова изходът му ще се установи във високо ниво.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

По този начин схемата И се разрешава по единия вход и пропуска импулсите от тактовия генератор от другия вход да преминават към входа на брояча. Двоичното число в брояча нараства, пропорционално нараства и изходното напрежение на ЦАП. При изравняването му с входното напрежение U_i изходът на компаратора се установява в ниско ниво и спира постъпването на импулси към тактовия вход на брояча. Двоичното число, съдържащо се в него представлява кода N на входното напрежение защото този код чрез ЦАП е формирал същото по стойност напрежение.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

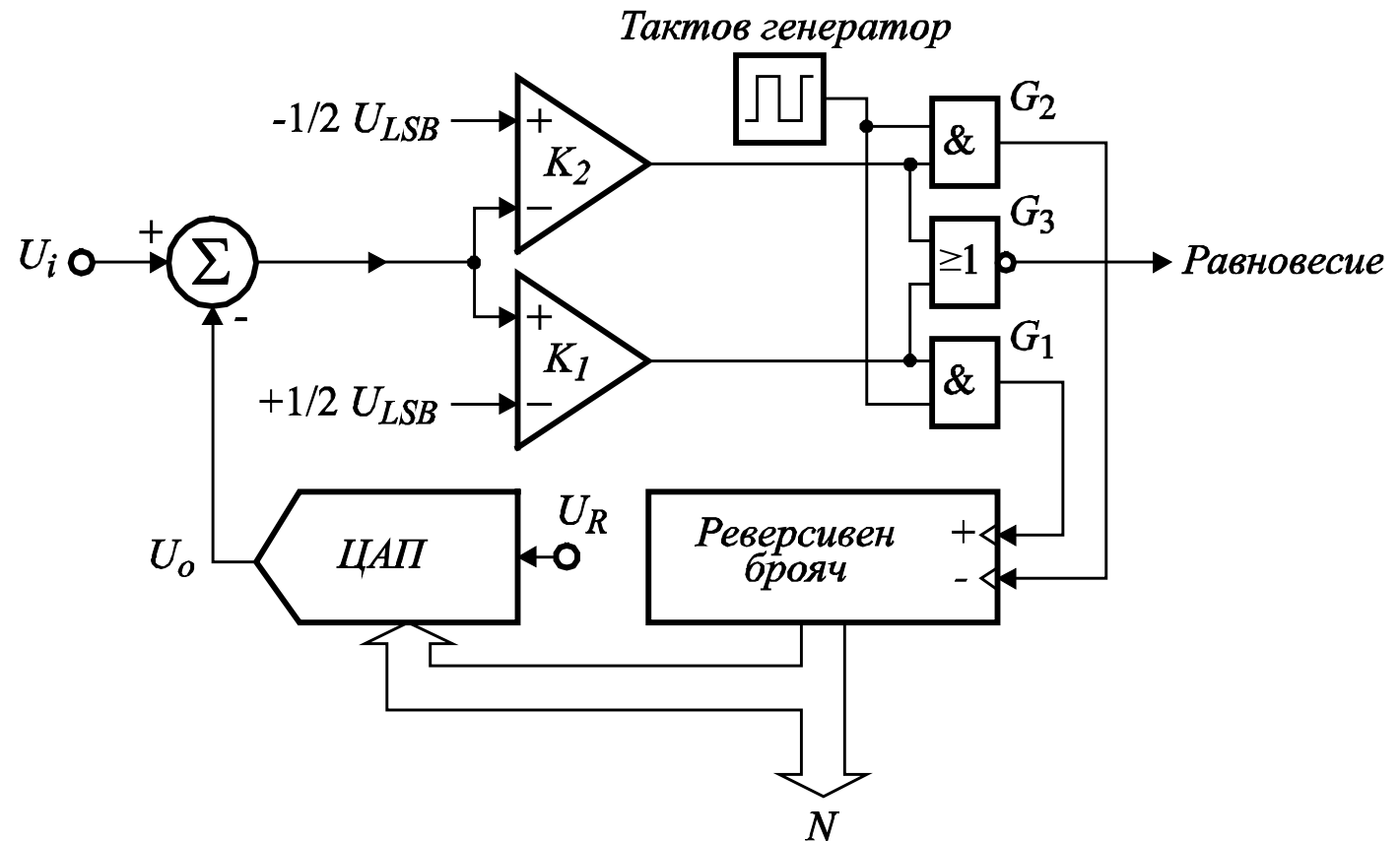
Недостатък на метода и на тази схема е неизвестното предварително време за преобразуване. То зависи от стойността на входното напрежение – колкото входното напрежение е по-високо, толкова по голямо е времето за преобразуване. Времето за преобразуване е равно на $N T_{ТГ}$, където N е кодът на входното напрежение, а $T_{ТГ}$ е периодът на импулсите на тактовия генератор.



Времедиаграма на действието на преброителен АЦП от последователен тип

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Друг преброителен АЦП е т.нар. следящ аналогово-цифров преобразувател от групата на компенсационните преобразуватели.



Преброителен АЦП от компенсационен тип - 1

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

От входното напрежение U_i се изважда компенсиращото напрежение U_o , изработено в изхода на ЦАП. Получената разлика се подава към компараторите K_1 и K_2 , с опорни напрежения съответно $+0,5U_{LSB}$ и $-0,5U_{LSB}$.

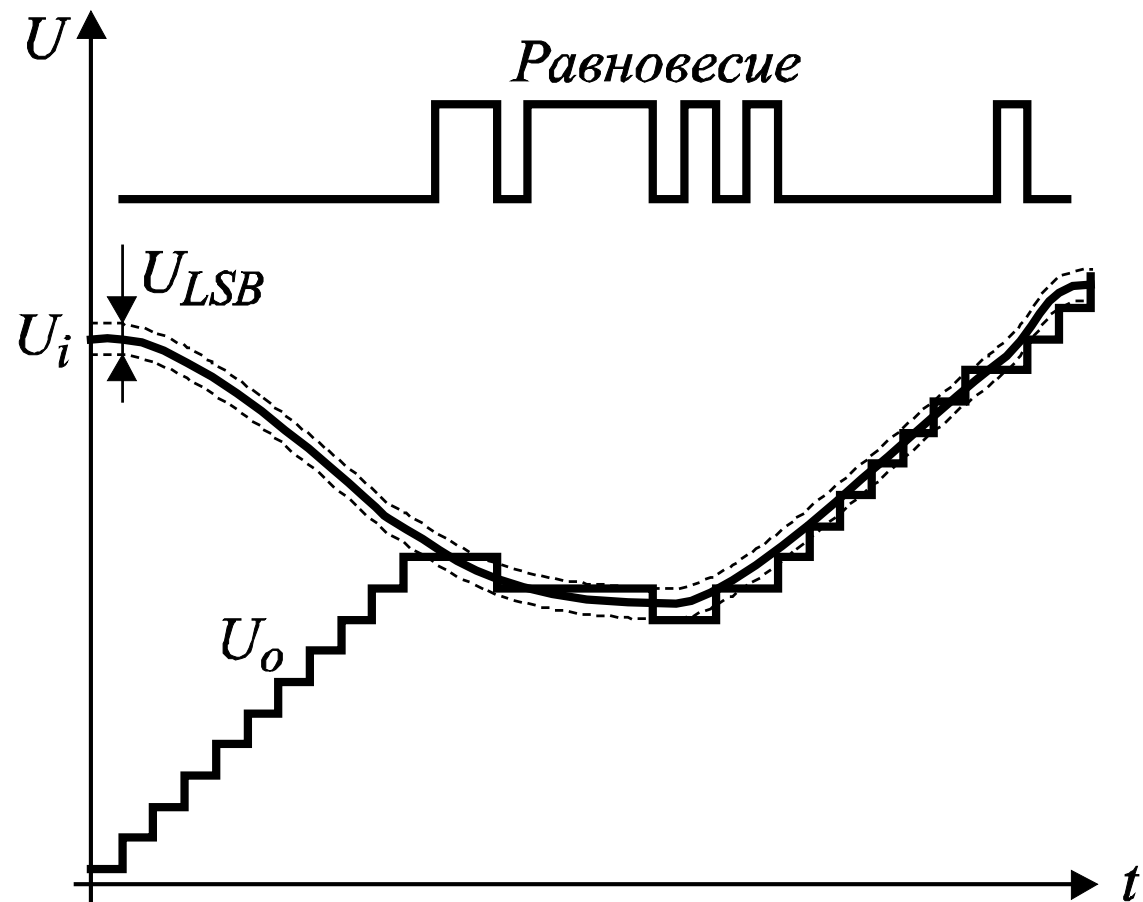
Ако разликата е по-голяма от $+0,5U_{LSB}$, сработва компараторът K_1 и разрешава електронната врата G_1 , пропускаща импулсите от тактовия генератор към сумиращия вход на реверсивния брояч. Той увеличава съдържанието си и изходното напрежение на ЦАП догонва входното. Ако разликата е по-малка от $-0,5U_{LSB}$, сработва компараторът K_2 и през електронната врата G_2 се пропускат импулсите към изваждащия вход на брояча.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Така чрез нарастваща или намаляваща промяна на подавания към ЦАП цифров код неговото напрежение следи непрекъснато промяната на входното напрежение.

Ако разликата между входното напрежение и напрежението в изхода на ЦАП е в границите на $\pm 0,5U_{LSB}$, към брояча няма да бъдат пропускани тактови импулси нито за сумиране, нито за изваждане. Това е установеният режим, при който ЦАП е достигнал входната величина и подаденият му цифров код съответства на нея. Изходите и на двата компаратора тогава стоят в '0'. Логическият елемент G_3 детектира това състояние и изработва сигнал за достигнато равновесие.

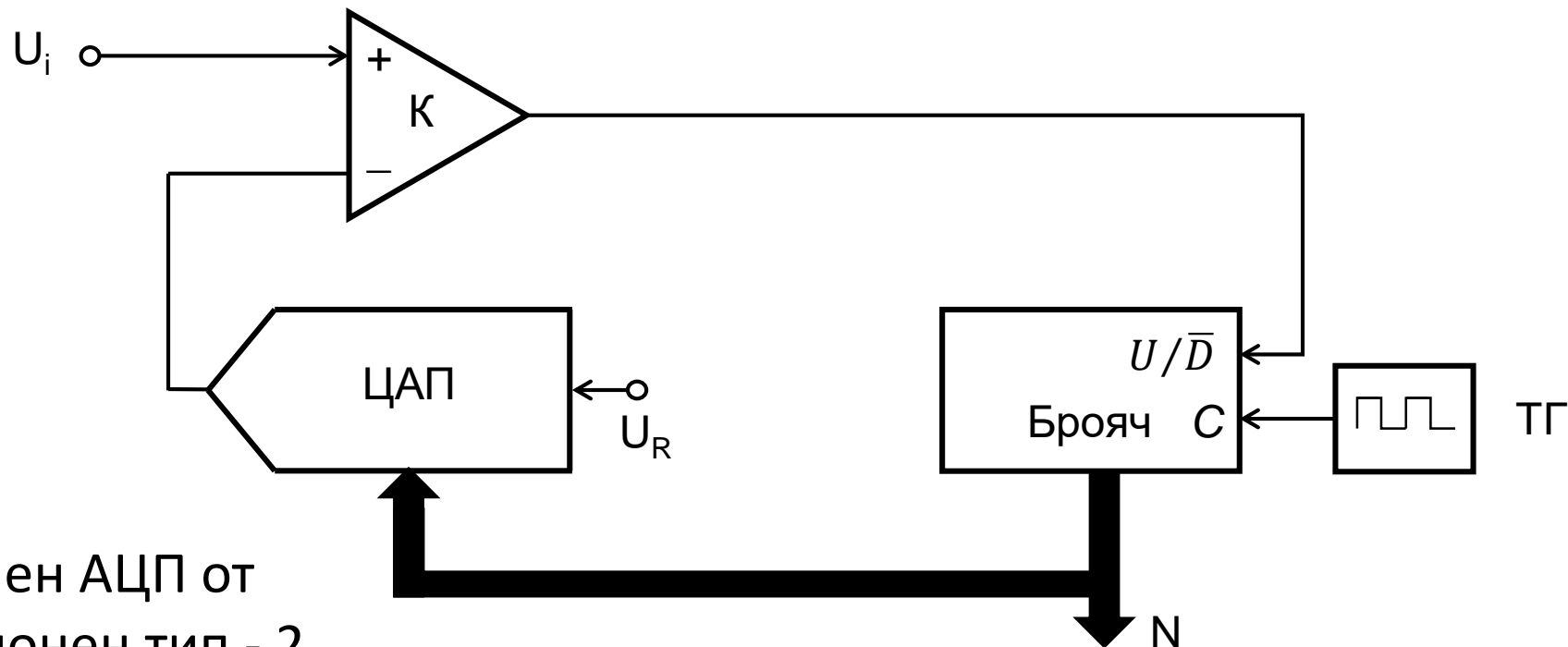
Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП



Процес на следене на входното напрежение при преброителен АЦП от компенсационен тип

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Представената схема също е на преброителен АЦП от компенсационен тип и има аналогично действие, но липсва детектирането на установения режим. Разликата с предходната схема е в типа на брояча.



Преброителен АЦП от компенсационен тип - 2

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

В първата схема се използва реверсивен брояч с два тактови входа. Във втората схема броячът също е реверсивен, но с един тактов вход и вход за управление на режима на броене U/\bar{D} .

Когато входното напрежение U_i е по-голямо от изходното напрежение U_o на ЦАП, изходът на компаратора е във високо ниво и броячът работи в режим на сумиране. Изходното напрежение U_o на ЦАП нараства до достигане на входното. При входно напрежение U_i по-малко от изходното напрежение U_o на ЦАП, изходът на компаратора е в ниско ниво и броячът работи в режим на изваждане. Изходното напрежение U_o на ЦАП намалява до изравняване с входното.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Съществува голямо разнообразие от АЦП (числящи се към преброителния метод), използващи интегратор за определяне на отношението на входната величина към еталонната. Това са **интегриращите** аналогово-цифрови преобразуватели, работещи с уравнивяване на заряда. Един от най-популярните от тях е АЦП с двутактно интегриране. Функционирането му се състои в следното:

– за точно определено време Δt_1 (време на право интегриране) се извършва интегриране на входното напрежение U_i с аналогов интегратор. След изтичане на времето Δt_1 в изхода на интегратора се получава напрежение $U_i(t_1)$:

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

$$U_I(t_1) = -\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_1} U_i dt = -\frac{1}{\tau} U_{i(mid)} \Delta t_1 ,$$

където $U_{i(mid)}$ е средната стойност на входното напрежение за времето на правото интегриране;

– след изтичане на времето на правото интегриране към входа на интегратора се включва опорно напрежение U_R , което е с обратна полярност от тази на входното. Извършва се интегриране на опорното напрежение, като се отчита времето Δt_2 (времето на обратното интегриране), за което изходът на интегратора достига нулевата линия.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

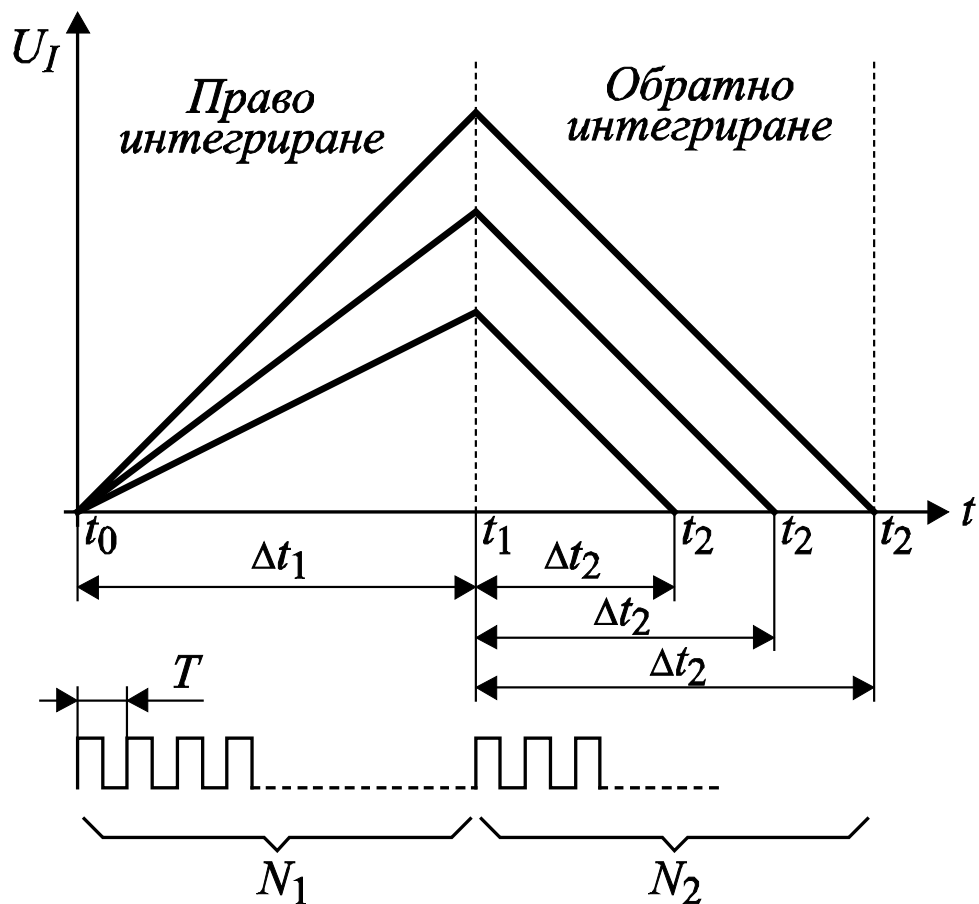
Това е моментът на уравнивяване на заряда в кондензатора. След изтичане на времето Δt_2 за напрежението в изхода на интегратора $U_I(t_2)$ може да се напише:

$$U_I(t_2) = U_I(t_1) - \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} U_R dt.$$

След приравняване на $U_I(t_2) = 0$ и $-\frac{1}{\tau} U_{i(mid)} \Delta t_1 - \frac{1}{\tau} U_R \Delta t_2 = 0$ следва

$$U_{i(mid)} = -U_R \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}.$$

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП



Времедиаграми на процеса на преобразуване при АЦП с двутактно интегриране

Времената Δt_1 и Δt_2 се задават и измерват със съответен брой N_1 и N_2 елементарни мерни периоди T , т.е. $\Delta t_1 = N_1 T$ и $\Delta t_2 = N_2 T$.
Тогава
$$U_{i(mid)} = -U_R \frac{N_2}{N_1}.$$

От получената формула следва, че отличителна особеност на метода на двойното интегриране е, че нито мерната единица T , нито времеконстантата $\tau = RC$ влияят на резултата.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

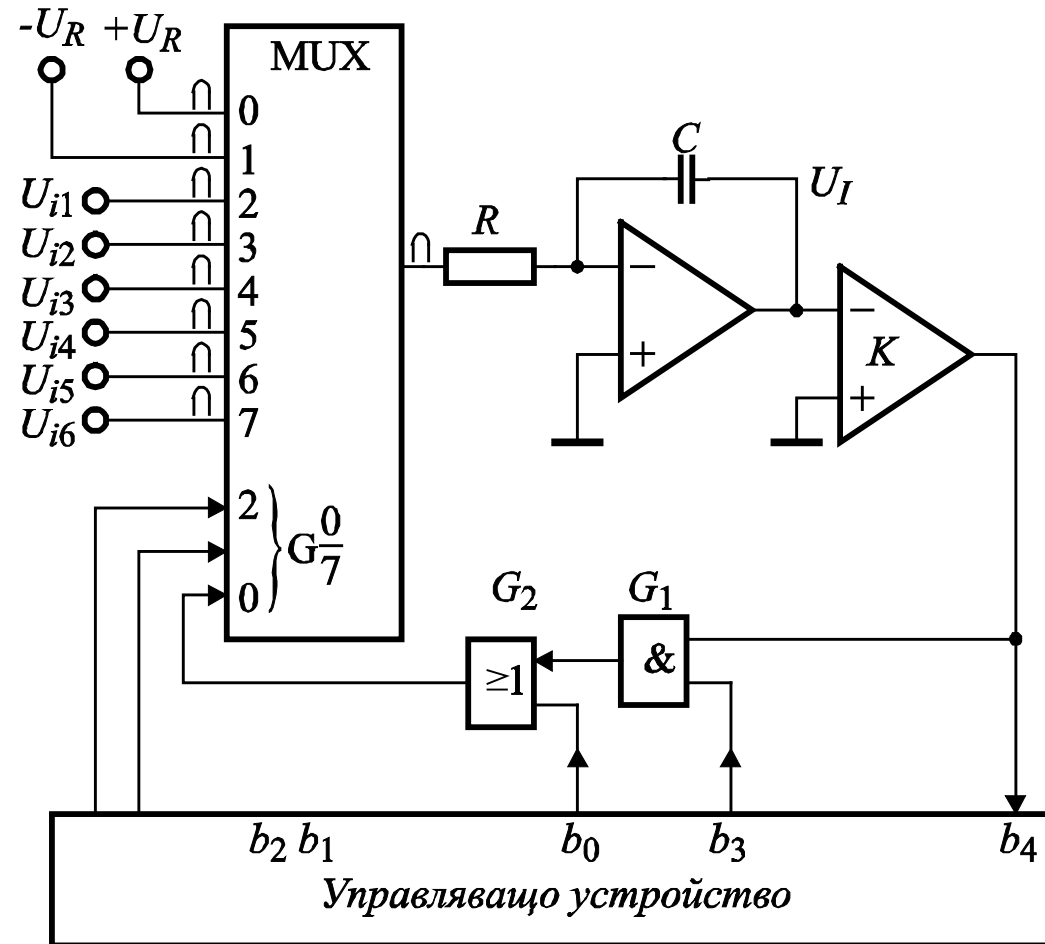
Достатъчно е те само да остават непроменени в рамките на едно измерване (за времето $\Delta t_1 + \Delta t_2$). Затова с метода на двойното интегриране може лесно да се достигне точност до 0,01 %.

При избора на компоненти за схемата е необходимо да се ползват висококачествени кондензатори с минимална остатъчна поляризация на диелектрика (ефект на „памет“) – полипропиленови или тефлонови. Макар че тези кондензатори са неполярни, външното им фолио трябва да се включи към нискоомна точка (изхода на интегриращия операционен усилвател). За да се минимизира грешката от интегратора и компаратора, е необходимо да се използва целият аналогов диапазон на интегратора.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Друга особеност на метода е, че, прилагайки интегриране, като резултат се получава цифровата стойност на осреднената входна величина за времето t_1 . Затова проникнало във входа променливо напрежение ще отслабва толкова по-силно, колкото по-висока е неговата честота. Променливо напрежение, честотата на което е целочислено кратна на $1/t_1$, се потиска напълно. Затова е целесъобразно времето на правото интегриране да бъде избрано кратно на периода на доминиращо в устройството смущение – например мрежовата честота. По този начин могат да се потиснат всички мрежови смущения.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП



6-канален аналогово-цифров преобразувател,
работещ по метода на двутактното интегриране

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Превключването на входните и опорните напрежения към интегратора се извършва от аналогов мултиплексор. Изходът на интегратора се следи от компаратор, който подава сигнал към управляващото устройство. Двете опорни напрежения $+U_R$ и $-U_R$ са еднакви по големина, но противоположни по полярност и алтернативно се използват в зависимост от полярността на измерваното входно напрежение. В схемата е включена и верига за поддържане на нулево напрежение в изхода на интегратора в паузата между измерванията. Тя се състои от логическите елементи G_1 и G_2 и се управлява от изход b_3 на управляващото устройство.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Измерването на входното напрежение протича по следния начин. Управляващото устройство забранява веригата за поддържане на нулата ($b_3 = 0$) и чрез изходите си b_0 , b_1 и b_2 задава на аналоговия мултиплексор кой канал да бъде пропуснат за правото интегриране. След това управляващото устройство започва отмерването на времето за правото интегриране t_1 . Когато изтече t_1 , по състоянието на изхода на компаратора, който се следи от входа b_4 , може да се разбере полярността на измервания канал. Ако $b_4 = 0$, полярността е отрицателна, а ако $b_4 = 1$, тя е положителна. Управляващото устройство указва с изходите си b_0 , b_1 и b_2 на аналоговия мултиплексор да пропусне за обратното интегриране онова

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

опорно напрежение, което е с противоположна полярност на измерваното. От този момент управляващото устройство измерва времето за обратното интегриране t_2 докато компараторът се преобърне.

Автоматичното поддържане на нулата в изхода на интегратора в паузата между измерванията се извършва, като управляващото устройство нулира изходите си b_0 , b_1 и b_2 , а изхода си b_3 поставя в 1. По този начин се разрешават логическите врати G_1 и G_2 и изходът на компаратора достига до младшия адресен вход A_0 на аналоговия мултиплексор.

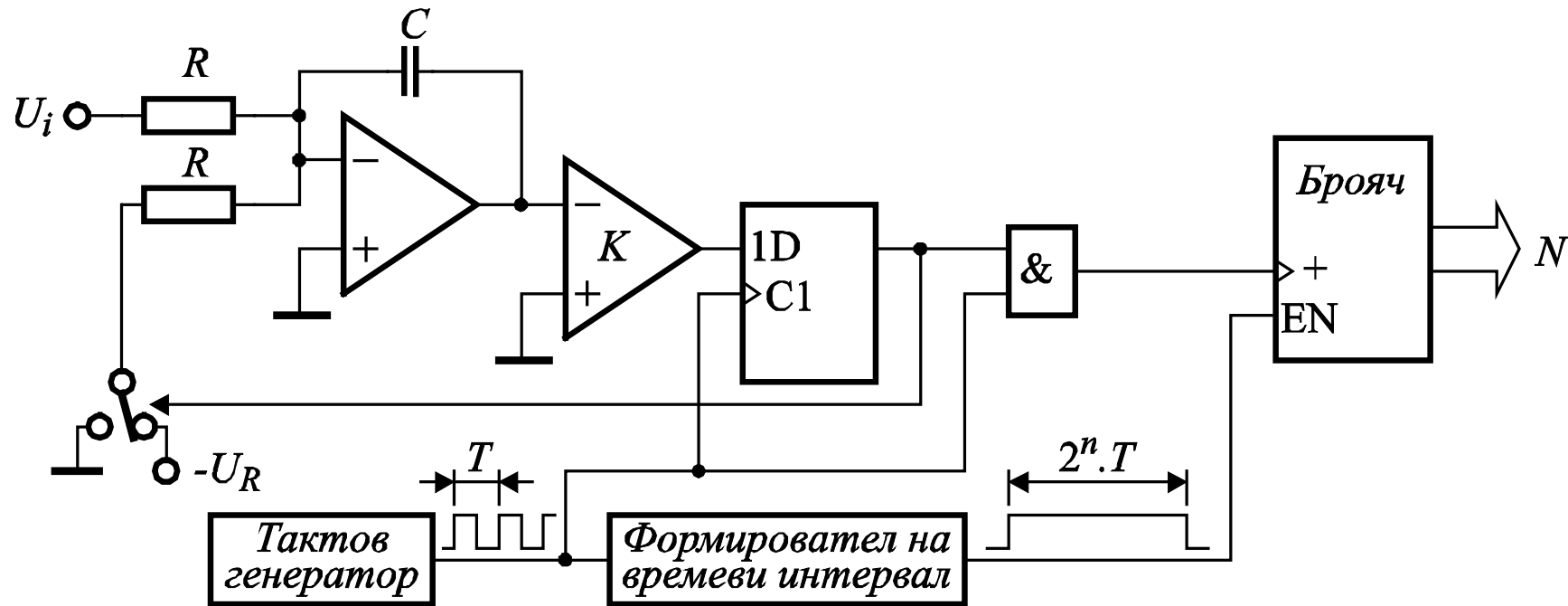
Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Същевременно адресните входове A_1 и A_2 са в 0. Така компараторът директно управлява превключването само на опорните напрежения към входа на интегратора. Ако изходът на интегратора се „отклони“ от нулевата линия, компараторът превключва към входа му опорно напрежение с такава полярност, която ще противодейства на отклонението.

Двойното интегриране намира широко приложение в цифровите универсални измервателни уреди, а също и в преобразувателни модули с разрешаваща способност от 10 до 18 разряда. Този метод осигурява много добра точност при ниска цена и притежава висока шумоустойчивост. Приложим е когато не е необходимо високо бързодействие.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Друг представител на преброителния метод е т.нар. делта-сигма АЦП ($\Delta\Sigma$ -ADC), основаващ се на компенсиране на входната величина с еталонна величина в интегратор.



Опростена структурна схема на $\Delta\Sigma$ -АЦП

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Входното напрежение се подава на интегратор, изходният сигнал на който се сравнява с фиксирано напрежение (например маса). Напрежителни импулси с фиксирана продължителност T (задавана от тактовия генератор) се включват или изключват към интегратора (в зависимост от състоянието на компаратора). В сумирация вход на интегратора се поддържа нулев среден ток, т.е преобразуването се осъществява на базата на уравнивяване на заряда. Броячът преброява количеството импулси, които постъпват на сумиращата точка за време на измерване $2^n T$.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Времето за измерване се определя от формирателя на времеви интервал чрез преброяване на 2^n периода T на тактовия генератор, като n представлява разрядността на преобразуването. Числото, получено в брояча за времето на измерване, е пропорционално на средната стойност на входното напрежение и представлява изходен код от преобразуването.

Токът за интегратора, формиран от измерваното напрежение U_i/R , протича през цялото време на измерване $2^n T$. Компенсиращият ток от източника на опорно напрежение $-U_R/R$ протича само за времето NT .

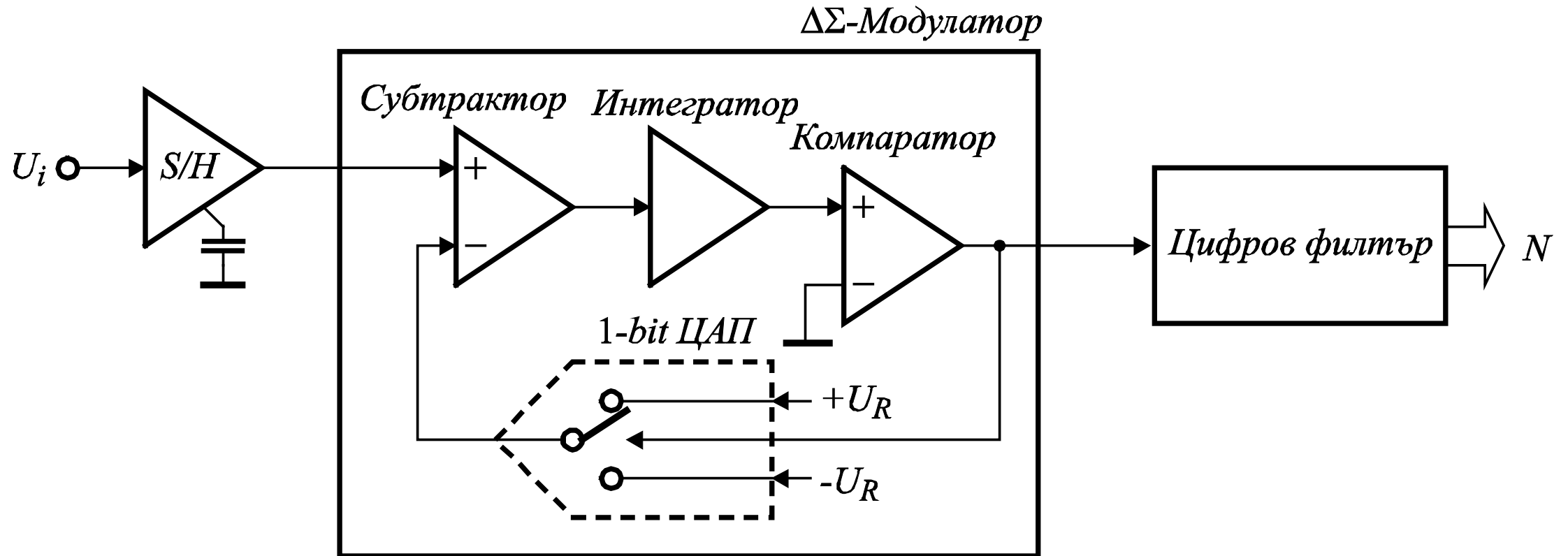
Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

От условието за поддържане на нулев среден ток във входа на интегратора следва $\frac{U_i}{R} 2^n T - \frac{U_R}{R} NT = 0$. Следователно $U_i = \frac{U_R}{2^n} N$ а,

$$\frac{U_R}{2^n} = U_{LSB}$$

Понастоящем, в непосредствена връзка с усъвършенстването на цифровите методи за обработка на сигнали, $\Delta\Sigma$ -АЦП добиха ново развитие както в технологично, така и в схемотехнично отношение. Не без значение е и новата структурна и теоретична интерпретация на $\Delta\Sigma$ -АЦП, тъй като съвременното $\Delta\Sigma$ -преобразуване значително се отличава от първообраза.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП



Структурна схема на съвременен $\Delta\Sigma$ -АЦП

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Структурната схема на съвременен $\Delta\Sigma$ -АЦП и съдържа следните основни елементи:

- аналогова памет (схема S/H);
- диференциален усилвател за извършване на изваждане (субтрактор);
- интегратор (аналогов нискочестотен филтър);
- компаратор (еднобитов АЦП);
- превключваем източник на опорно напрежение (еднобитов ЦАП);
- цифров нискочестотен филтър.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

От входното напрежение, запомнено в аналоговата памет, се изважда изходното напрежение на еднобитовия ЦАП. Последният превключва изхода си между $+U_R$ и $-U_R$ за реализиране на двуполярен диапазон на преобразуване. Филтрираната в интегратора разлика постъпва към входа на компаратора, който извършва еднобитово аналогово-цифрово преобразуване. То се извършва за един период T на задаващия генератор (не е показан на схемата), а честотата му е многократно по-висока от ефективната честота на дискретизация на входния сигнал. Всъщност, дотук разгледаният $\Delta\Sigma$ -АЦП извършва еднобитово преобразуване, но с многократно по-висока честота (предискретизация - oversampling).

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Предискретизацията е основа на работата на $\Delta\Sigma$ -АЦП. Отношението сигнал/шум SNR на еднобитов АЦП е 7,8 dB. При предискретизация, т.е. ако вместо с честота f_s дискретизацията се извърши с честота kf_s , големият шум от квантоване се разпределя в широка честотна област, далеч извън полезната честотна област $f_s/2$. Шумът от квантоване, който е извън полезната честотна област на входния сигнал, може да бъде филтриран.

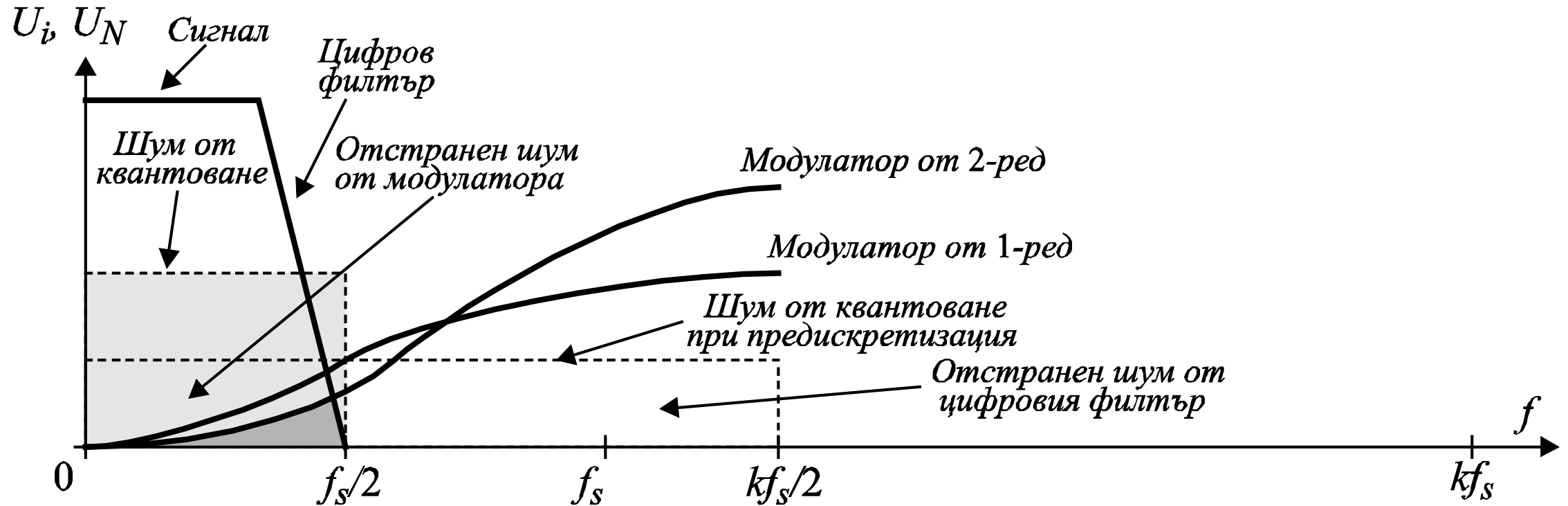
На първо място филтрирането се извършва от аналоговия нискочестотен филтър (интегратора). Диференциалният усилвател, интеграторът, компараторът и еднобитовият ЦАП формират т.нар. $\Delta\Sigma$ -модулятор.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Когато интеграторът е един, $\Delta\Sigma$ -модуляторът е от първи ред. Броят на интеграторите определя реда на $\Delta\Sigma$ -модулатора. Модулятор от по-висок ред потиска повече шума и позволява да се увеличи разрешаващата способност на АЦП. На практика поради затруднено осигуряване на стабилността на модулатора (която е една затворена верига) не се прилагат $\Delta\Sigma$ -модулатори с по-висок от 5 ред.

Допълнително отстраняване на шума и повишаване на разрешаващата способност на АЦП се извършва с цифровия нискочестотен филтър. Прилагането на цифрови филтри от 4 или 5 ред в $\Delta\Sigma$ -АЦП позволява да се достигне 24-разрядно аналогово-цифрово преобразуване.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

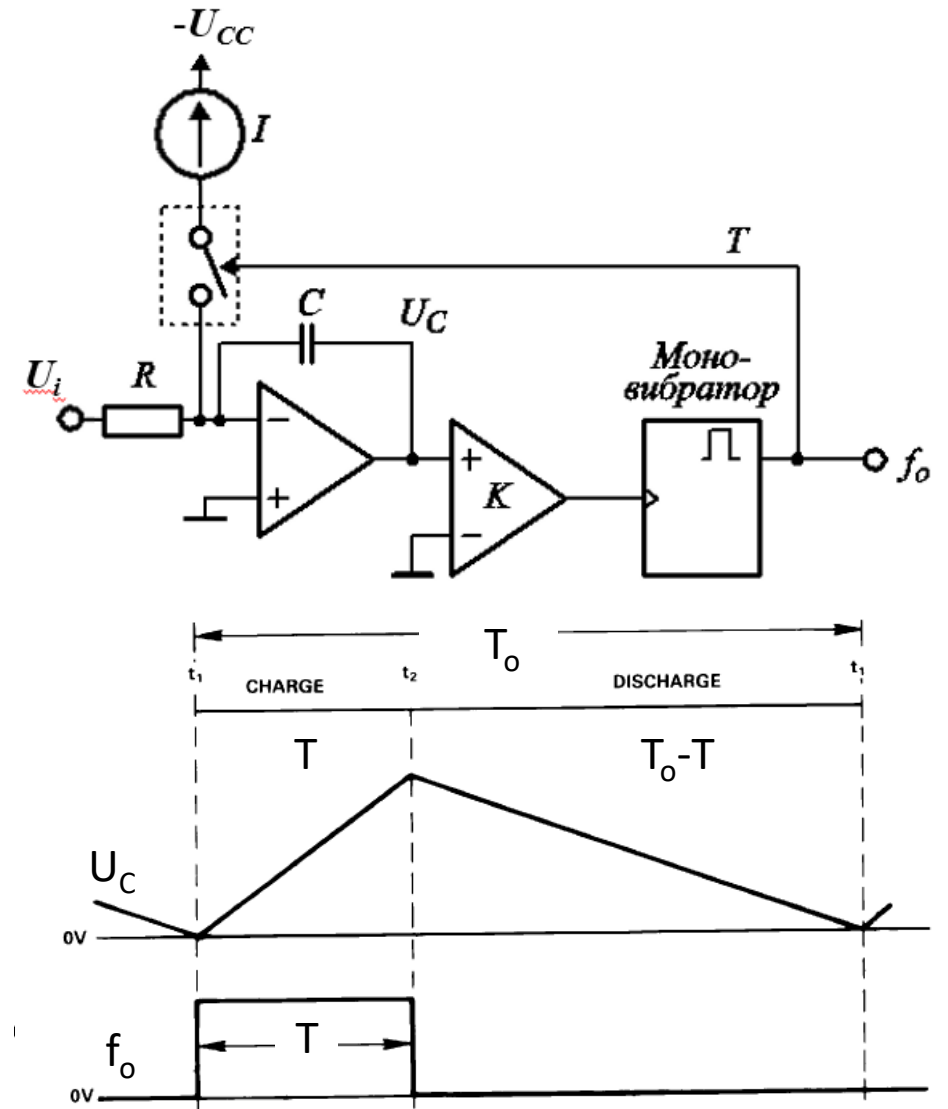


Отстраняване на шум от квантоване при $\Delta\Sigma$ -АЦП

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

От групата аналогово-цифрови преобразуватели, които извършват междинно преобразуване на входната аналогова величина в друга и след това измерват междинната величина най-често се среща междинно преобразуване на напрежение в честота.

Макар че съществуват много начини за преобразуване на напрежение в честота, най-голямо разпространение е получил начинът с уравнивяване на заряда.



Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Представител на този тип преобразуватели е ADVFC32 (Analog Devices). Входното напрежение постъпва в интегратор, чийто изходен сигнал се сравнява с нулата от компаратор. Ако изходът на компаратора е в '1', се пуска моновибратор, изработващ импулс с калибрирана продължителност T . Сигналят от моновибратора затваря ключ, свързващ източник на ток I към инвертиращия вход на интегратора за времето на импулса T . При това се внася заряд: $Q = (I_i - I) \cdot T$.

След края на импулса интегриращият кондензатор се разрежда от входното напрежение и изходът на интегратора тръгва към нулата. Когато тя се достигне, моновибраторът се запуска отново.

Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Входното напрежение е „изнесло“ заряд: $Q_i = I_i(T_o - T)$

Приравнявайки внесения с изнесения заряд, т.е. $Q = Q_i$, за изходната честота се получава:

$$f_o = \frac{1}{T_o} = U_i \frac{1}{RTI}$$

Тъй като R , T и I са константи, изходната честота f_o е пропорционална на U_i . Необходимо е да се отбележи, че продължителността на импулсите в изходния сигнал остава постоянна, а напрежението U_i изменя честотата на повторението им и респективно коефициентът на запълване.

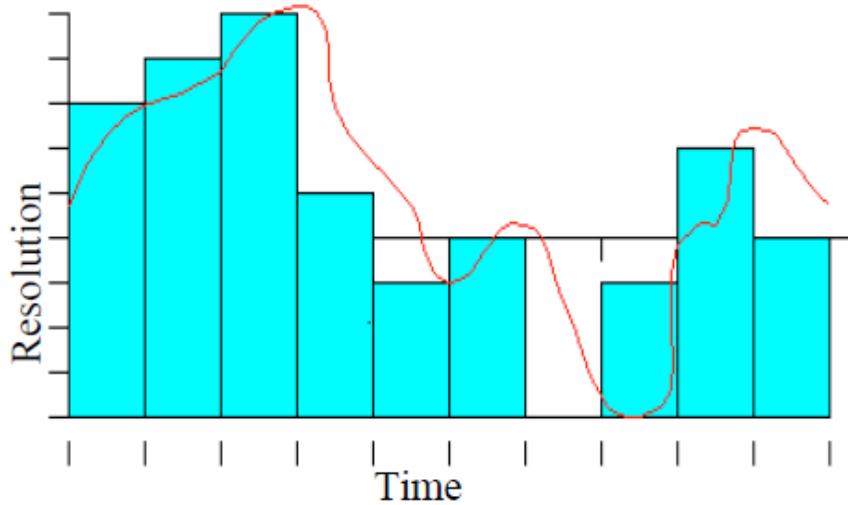
Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

В предавателното уравнение не присъства капацитетът C – той е предназначен само да интегрира зарядния и разрядния ток, но неговата стойност трябва да се подбира такава, че за целия диапазон на U_i интеграторът да не влиза в насищане.

Получената от преобразуването честота може да се преобразува в цифров код чрез използването на цифров честотомер. Този начин на аналогово-цифрово преобразуване се прилага предимно в случаите, когато е необходимо галванично разделяне на аналоговите от цифровите вериги. Получената честота лесно се прехвърля между двете изолирани части чрез оптрон или високочестотен трансформатор.

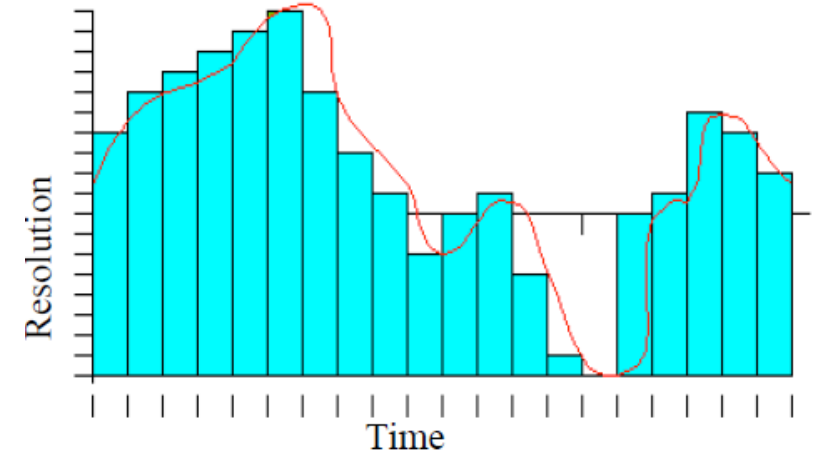
Аналогово-цифрови преобразуватели - АЦП

Начини за подобряване на точността



$$N = \frac{U_i}{U_{LSB}}$$

$$U_i = NU_{LSB} = \frac{NU_R}{2^n}$$



1) Увеличаване на разрешаващата способност, което подобрява точността при измерване на амплитудата на аналоговия сигнал.

2) Увеличаване на честотата на дискретизация, което увеличава максималната честота на входния сигнал, който може да бъде преобразуван.