

5. A/D Převodníky

01 Charakteristika, použití, přesnost a princip převodu

02 Analogový vs. Digitální signál

03 Popis a funkce převodníků

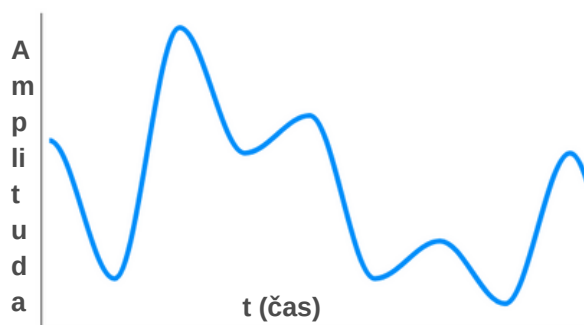
- a)** Paralelní
- b)** Přírůstkový
- c)** Sledovací s vratným čítačem
- d)** S postupnou aproximací
- e)** S dvojitou integrací
- f)** Sigma-delta

5. A/D Převodníky

Charakteristika

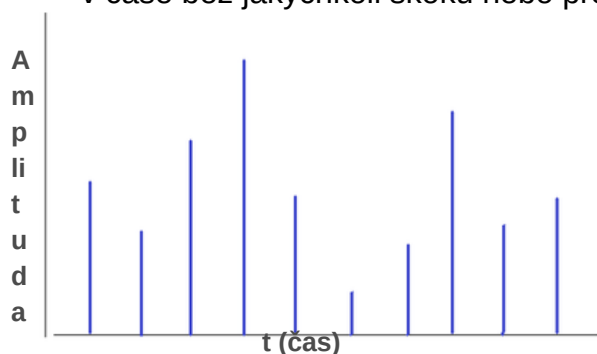
- Analogově-digitální převodník (ADC) je **elektronická součástka sloužící k převodu analogového** (*spojitého*) signálu na **digitální** (*diskrétní*) signál.
- **Důvod převodu:** Umožňuje **zpracování analogových signálů** (např. *napětí, proud, zvuk*) na **číslicovou podobu**, a dále zpracovány *mikroprocesory, počítači nebo mikrokontroléry*.
- **ADC** je nezbytný pro aplikace, kde je potřeba měřit fyzikální veličiny, jako jsou *teplota, tlak, zvuk nebo světlo*, které mají obvykle **analogovou povahu**.
- Převodník se využívá ve spojení s *mikroprocesory v měřicích, regulačních a automatizačních systémech* (nutnost měření analogové veličiny)
- **Analogové signály** lze po převodu na **digitální signál** přenášet a zpracovávat s **menším zkreslením a vyšší odolností vůči rušení**.
- Převodníky se liší svým **principem činnosti, přesností, rychlostí převodu a nároky na spotřebu energie**.
- Přesnost převodu závisí na:
 - **Rozlišení (počet bitů)** – určuje **počet možných diskrétních úrovní** (např. 8bitový převodník rozlišuje 256 úrovní, 10bitový 1024 úrovní).
 - **Chybách převodu** – zahrnuje chybu *kvantizace, linearity, offsetu a šumu*.
- Opakem ADC je **DA převodník (DAC)**, který **převádí digitální signál zpět na analogový**.

Druhy signálů



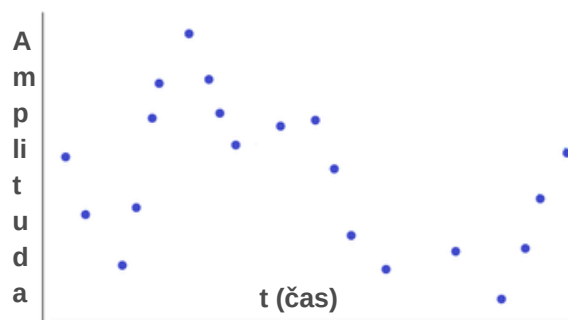
Analogový signál

- Spojitý v čase i amplitudě
- Hodnoty signálu (amplitudy) se mění plynule v čase bez jakýchkoli skoků nebo přerušení.



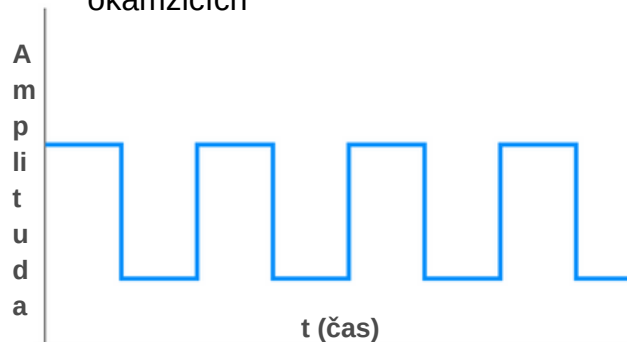
Kvantizovaný signál

- Spojitý v amplitudě, nespojitý v čase
- Hodnoty amplitudy jsou zaokrouhleny (kvantizovány).



Vzorkovaný signál

- Spojitý v čase, ale nespojitý v amplitudě
Signál je vzorkován jen v určitých časových okamžicích



Digitální signál

- Nespojitý v čase ani v amplitudě
- Signál je vzorkován pouze v určitých časových okamžicích

5. A/D Převodníky

Analogový signál

- Obsahuje **hodně informací** (*Při přiblížení křivky - vždy nějaká hodnota, bez mezer*)
- Hodnota se mění v **libovolném čase** (*nekonečný počet možných stavů*)
- **Horší uchování a přenášení**
- Fyzické **opotřebení** (*šum a zkreslení*)
- Lze uchovat na **VHS kazetě, magnetofonových páskách, gramofonových deskách**
- Vznik šumu, kopie v horší kvalitě (*degradace média*)
- Reprezentace **reálných fyzikálních veličin** (*proud, napětí, zvukové vlny*)

Digitální signál

- Výhoda kopírování, kódování - **obsah méně dat**. Data mohou být **komprimována**.
- Je **tvořen posloupnosti vzorků**, které mohou nabývat **pouze omezeného počtu hodnot**
- Nevýhoda **ztráty kvality a vznik šumu při kódování**
- Kódování v binární formě (*0 a 1*) - náhlý **přechod mezi hodnotami**, nemá nekonečný počet stavů
- **Chyby při ztrátě dat lze opravit pomocí kódování**
- Lze uchovat na **Flash discích, CD, disketách, HDD, SSD**

Převod analogového signálu na digitální



Převod analogového signálu na digitální probíhá ve třech hlavních krocích:

- **Vzorkování**: Spojitý analogový signál je odebírán v pravidelných časových intervalech (vzorkovací frekvence).
- **Kvantování**: Hodnoty jednotlivých vzorků jsou převedeny na nejbližší hodnotu z předem definovaných úrovní (diskrétní amplitudy).
- **Kódování**: Kvantizované hodnoty jsou převedeny do binární (digitální) podoby, která je čitelná pro číslicové systémy.

5. A/D Převodníky

Konkrétnější popis převodu analog -> digital

1. **Vzorkování:** Analogový signál je rozdělen do **svislých vzorkovacích úrovní**, podle kterých na ose x určíme přesné místo daného vzorku.

Tam, kde je **signál protnutý s vzorkovací úrovní bude jeden vzorek**. Hodnota se pošle do **kondenzátoru**.

Vzdálenost vzorků se bude lišit **vzorkovací frekvencí**, čím je větší, tím více vzorků a kvalitnější převedený signál.



2. **Kvantování:** Analogový signál je dále rozdělen **pomocí horizontálních kvantizačních a rozhodovacích úrovní**. Nyní určujeme zda se vzorek nachází **nad nebo pod rozhodovací úrovní** aby proběhlo zaokrouhlení na určitou **kvantizační úroveň (kvantizace)** - vznik šumu.

Kvantizační šum:

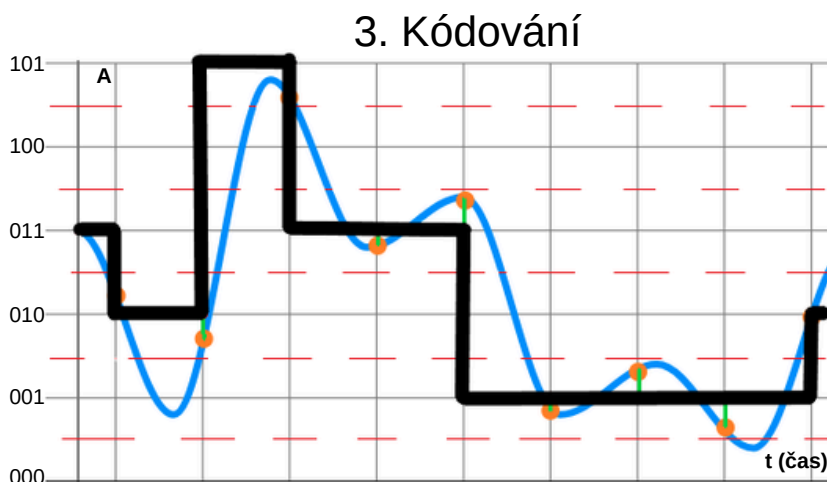
Při kvantování se vzorky rozdělují do jednotlivých **kvantizačních úrovní**, čímž může vzniknout **kvantizační šum**, který zapříčiní právě ztrátu kvality digitálního signálu a **výsledek se může od analogového lišit**.

3. Kódování:

Jednotlivé vzorky se nachází na určité kvantizační a vzorkovací úrovni a nyní lze z nich **vytvořit digitální signál v binární podobě**.

První číslo zleva je **MSB = bit s největší vahou**.

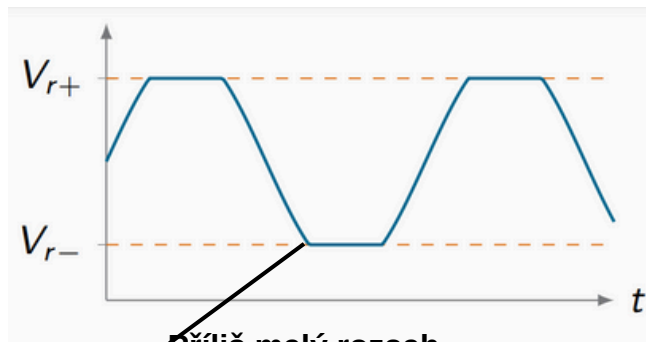
Poslední číslo je **LSB = bit s nejmenší vahou**



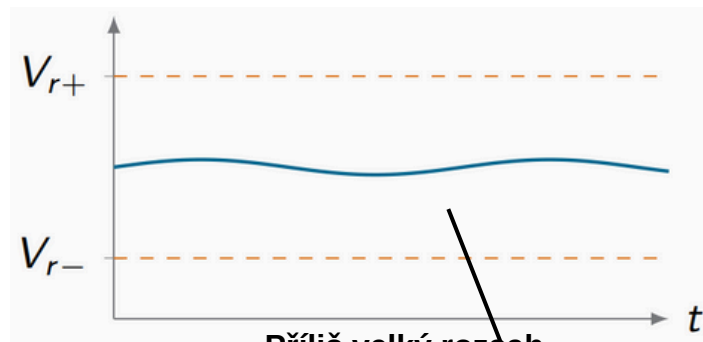
5. A/D Převodníky

Rozsah (rozlišení) převodníku

- Má vždy **pevný počet bitů**, které dokáže zakódovat (např. 8 bitové převodníky)
- Určuje rozpětí, které je schopný převodník **opsat na daný počet hodnot**
- Každá jedna hodnota určuje **zlomek celé škály** (teploměr - jeden část/dílek: **VZOREK**)
- Je třeba řešit, jaké rozlišení převodníku použijeme, protože může být menší a signál přesahuje přes danou mez - **Clipping** (typické u audia - zvuku).



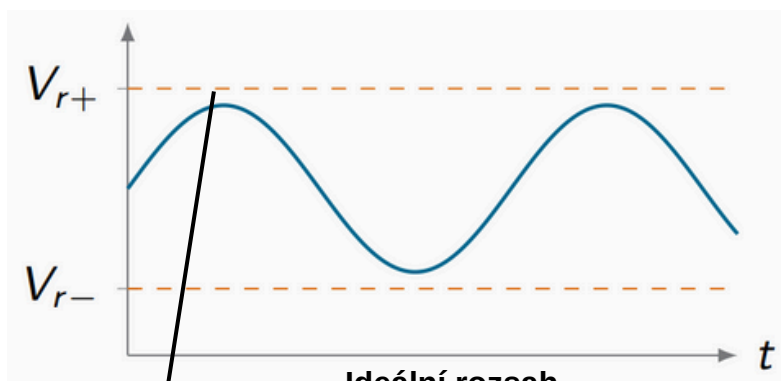
Příliš malý rozsah



Příliš velký rozsah

Distortion:

Signál by pokračoval níže, ale převodník není schopen hodnotu vytvořit. Ztrácíme část informací. Pokud to je žádané.



Ideální rozsah

Využití co největšího rozsahu s menší rezervou, která zajistí jistotu při neobvyklých situacích, kdy signál nepřekročí rozsah.

Chceme určit malé změny signálu, ale máme převodník, který určuje obrovské změny signálu - bude vypadat že se nemění.

Granualita převodníku

- **Míra jemnosti** kvantizace a určuje **přesnost**, s jakou převodník měří analogové napětí
- Granularita **udává nejmenší rozdíl napětí**, které AD převodník ještě rozpozná.
- Přímou souvisí s jeho rozlišením
- Převodník s 8 bit rozlišením: $(2)^8 = 256$ **diskrétních úrovní**. V případě rozsahu měřeného napětí **0-5V** by granualita byla:

$$\text{GRANUALITA} = (\text{Rozsah napětí}) / (\text{Počet úrovní}) = 5 / 256 = 0.0195 \text{ V}$$

=> Převodník dokáže rozlišit rozdíly v napětí přibližně **0.0195 V**

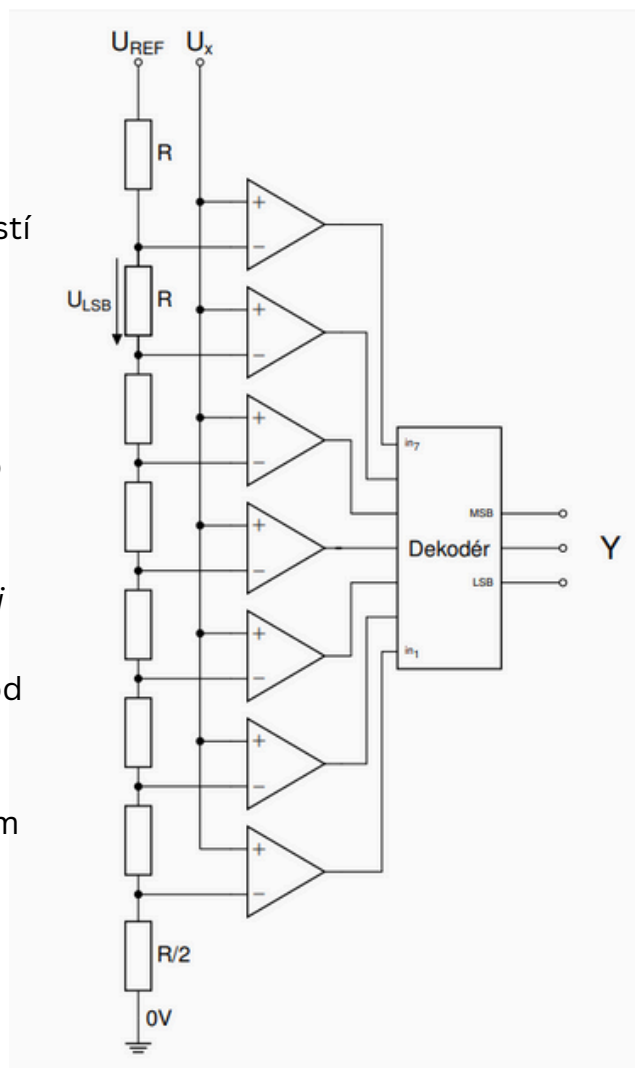
- Má také vliv na **kvantizační chybu** (rozdíl mezi skutečnou hodnotou analogového signálu a nejbližší hodnotou, kterou přiřadí AD převodník).
- **Jemnější granualita** (vyšší rozlišení převodníku) = menší kvantizační chyba a vyšší přesnost převodu analogového signálu na digitální

5. A/D Převodníky

Architektury AD Převodníků

Paralelní (Flash) AD převodník

- Nazýván také jako **přímý, komparační**
- Jedná se o **nejrychlejší typ AD převodníku**, s rychlostí převodu řádově v **nanosekundách (ns)**
- **Komparátory:** Flash ADC využívá velké množství komparátorů, které **porovnávají vstupní napětí U_x s referenčními napětími**.
- **Napěťový dělič:** Referenční napětí **Uref** je rozděleno napěťovým děličem na **stejně velké dílky**.
- **Teploměřový kód:** Výstupy komparátorů vytvářejí **teploměřový kód** (*sérii jedniček a nul podle velikosti vstupního napětí*)
- **Dekodér:** Teploměřový kód se převede na binární kód pomocí dekodéru, který zpracuje výstupy komparátorů.
- Rychlost je dána **rychlostí komparátorů** s dekodérem (*převod je řádově v ns*)
- **Počet komparátorů:** Pro n-bitový převodník je potřeba **$2^n - 1$ komparátorů** (*např. pro 8bitový převodník je to 255 komparátorů*)
- **Rychlost:** Rychlost převodu je dána rychlostí komparátorů a dekodéru. Typicky **víc než 100 MHz**
- **Rozlišení: Běžně** se vyrábí převodníky s rozlišením **4 až 8 bitů**. Vyšší rozlišení (např. 10 bitů) je méně obvyklé kvůli náročnosti na počet komparátorů.
- **Přesnost:** Omezená přesnost



$U_x = 0 \text{ V}$	Logická 0 (všude)
$U_x = U_{ref}$	Logická 1 (odpovídající úroveň)

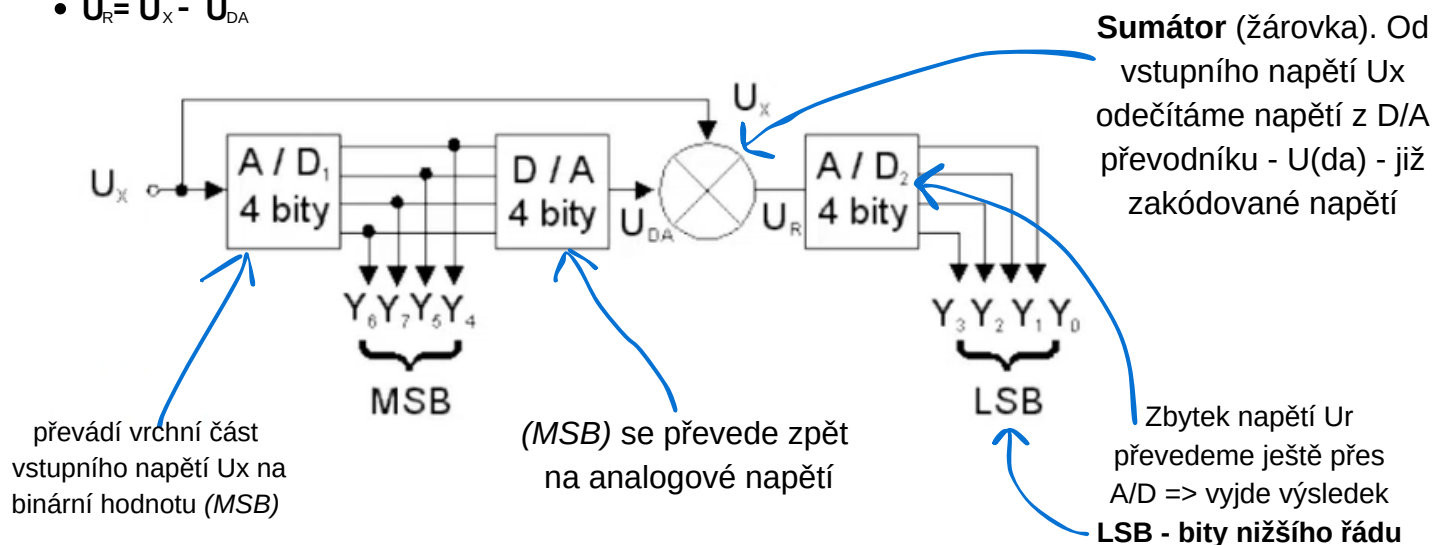
Zobrazení teploměrového kódu - tabulka stavů

[illegible]

5. A/D Převodníky

Paralelní AD převodník - Kaskáda (pipeline nebo linkové zapojení)

- Vylepšení flash převodníku kvůli velkému počtu komparátorů
- $U_R = U_X - U_{DA}$



- Díky převodu jsme **snížili počet převodníků, které potřebujeme**. Výroba 4bitového převodníku není tak náročné a není potřeba tolik komparátorů
- Celkový počet komparátorů je nyní **30** (*ušetřeno přes 200 komparátorů a odporů*)
- Doba převodu je **delší**, ale je možnost dosáhnout **přesnějšího a většího rozlišení**

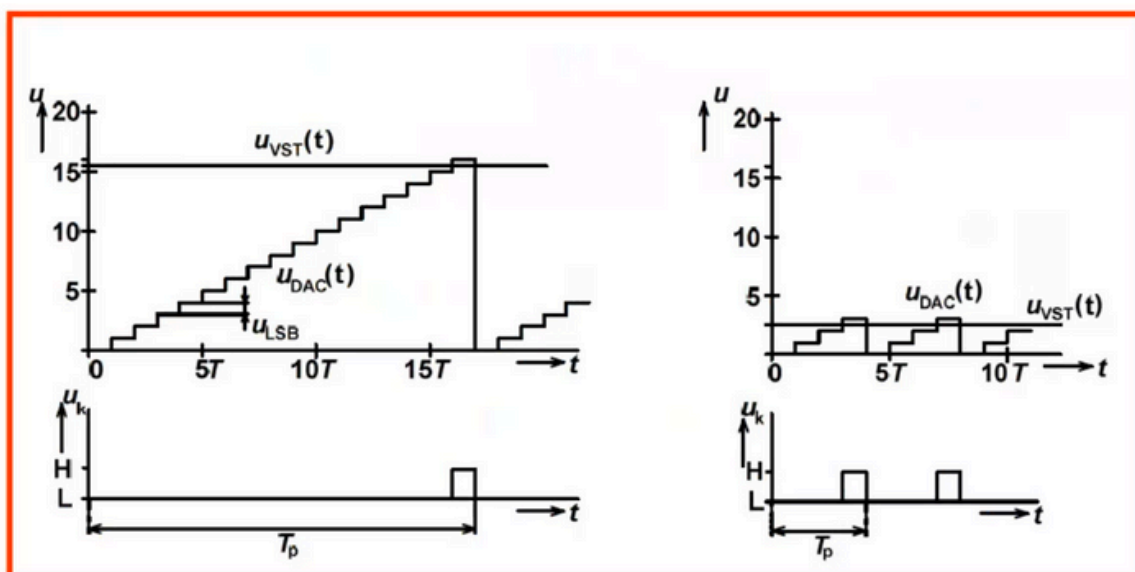
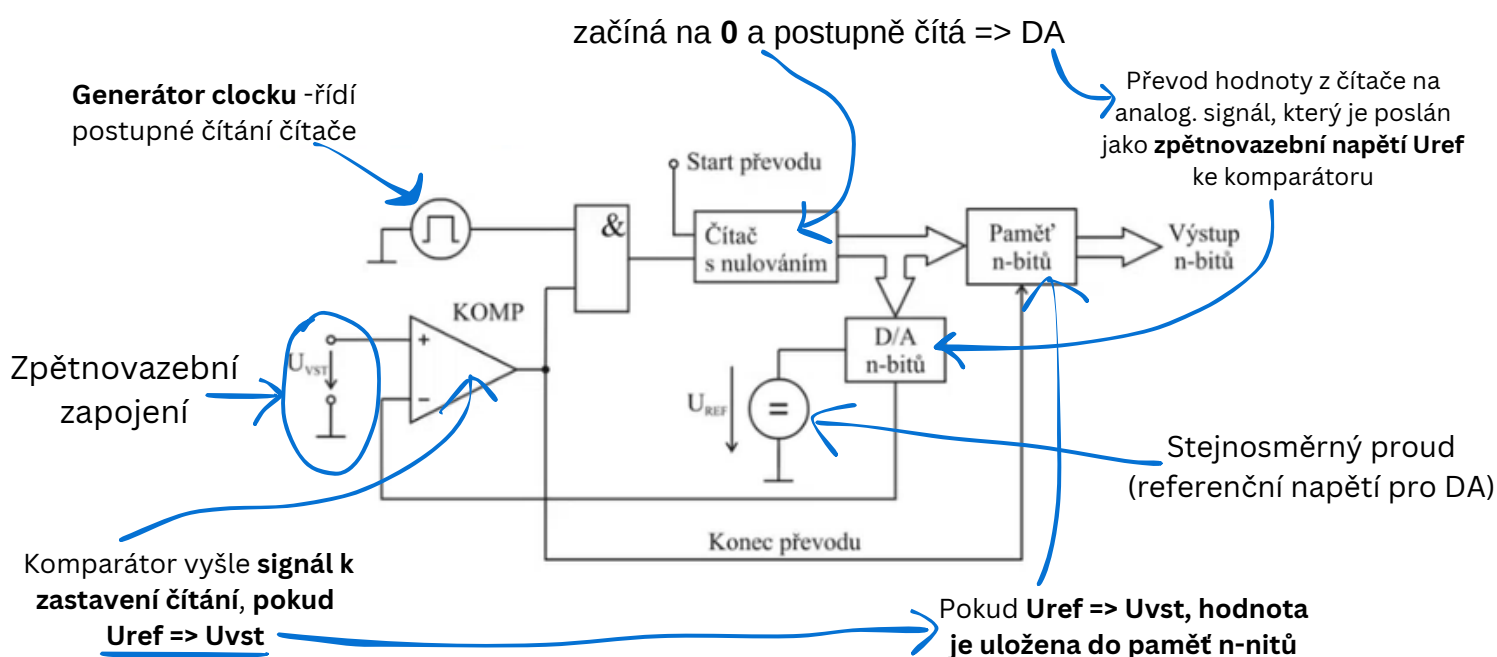
Kompenzační AD převodníky (automatické kompenzátory napětí)

- Jedná se o **typ kompenzační AD převodníků**, které se nesnaží přímo převádět analogové napětí, ale místo toho **generují digitální hodnotu**, která odpovídá co **nejbližšímu napětí**.
- Postupně generujeme **zpětnovazební napětí pomocí D/A převodníku**, které se **porovnává se vstupním analogovým napětím**.
- Proces probíhá **iterativně** (*postupným přibližováním*), dokud **zpětnovazební napětí co nejpřesněji neodpovídá vstupnímu napětí**.
- **Komparátor** určuje, zda je zpětnovazební napětí menší nebo větší než vstupní, a podle toho se **digitální hodnota upraví**.
- Budeme potřebovat **1 komparátor a další pomocné obvody**.
- *Jsou nejvíce používané, jednoduché na výrobu, rychlé*
- **Porovnávají vstupní napětí se zpětnovazebním napětím** (*získaný z D/A převodníku*)
- Čítací, sledovací, s postupnou aproximací

5. A/D Převodníky

Kompenzační čítací AD převodník - přírustkový

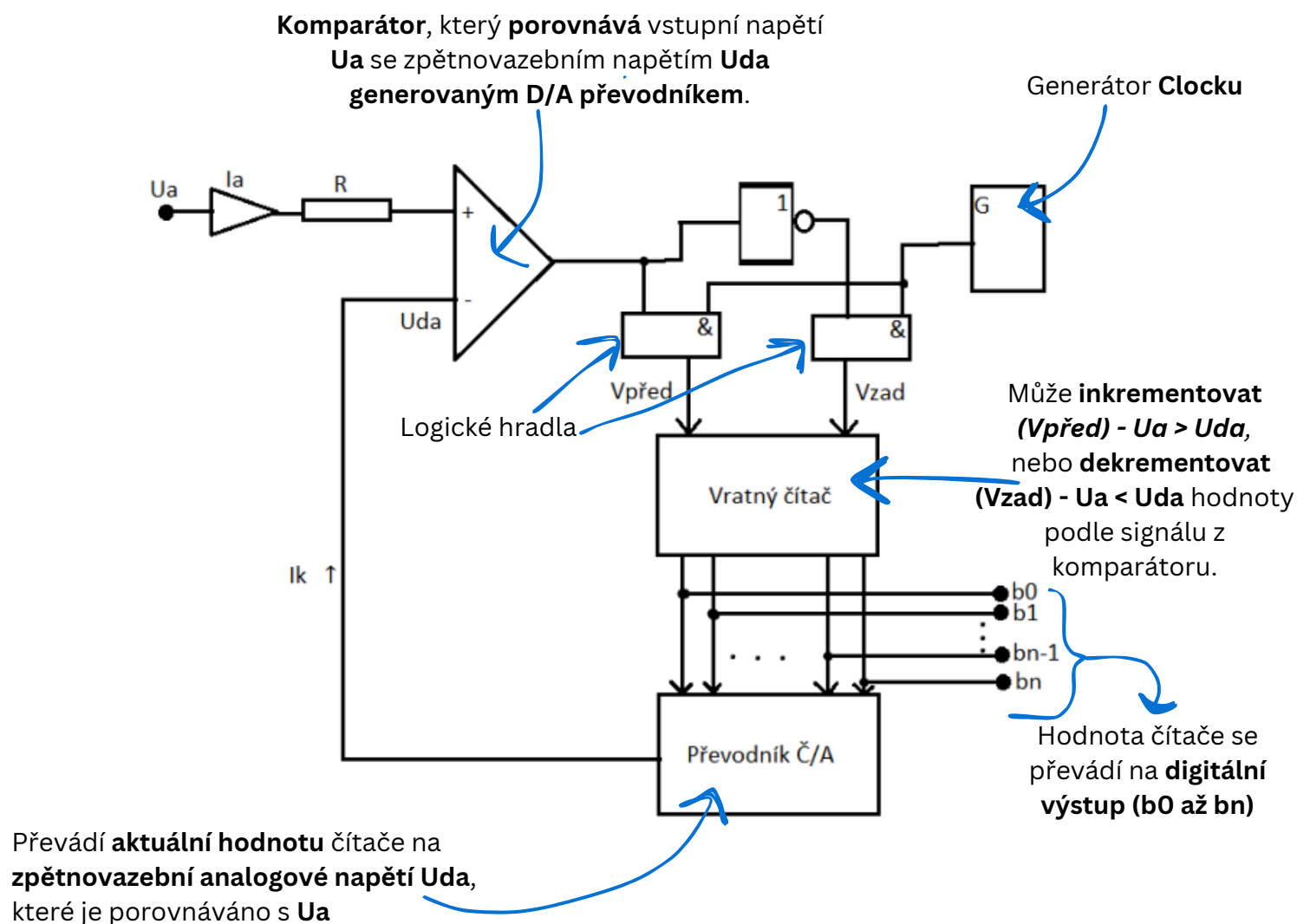
- Generuje **signál připomínající "schody"**, dokud komparátor neurčí, že **napětí je stejné nebo větší**.
- Vstupní napětí U_{VST} přivedeme na jednu ze svorek **operačního zesilovače ve funkci komparátoru** => **generování hodinového signálu**
- Napětí hned ze začátku nebude stejné, čítač s nulováním bude postupně čítat **jedno číslo za druhým**, které bude převedeno **přes D/A převodník na analogové napětí**, které bude **porovnáváno s tím komparátorem**.
- Když to dosáhne výsledné hodnoty, kdy ten D/A převodník vygeneruje napětí, které je stejné nebo vyšší než je samotné to napětí na vstupu => zastavení převodu => Procesor může z paměti vyčíst výslednou hodnotu, která řekne, které napětí to vlastně je.



5. A/D Převodníky

Sledovací převodník (s vratným čítačem)

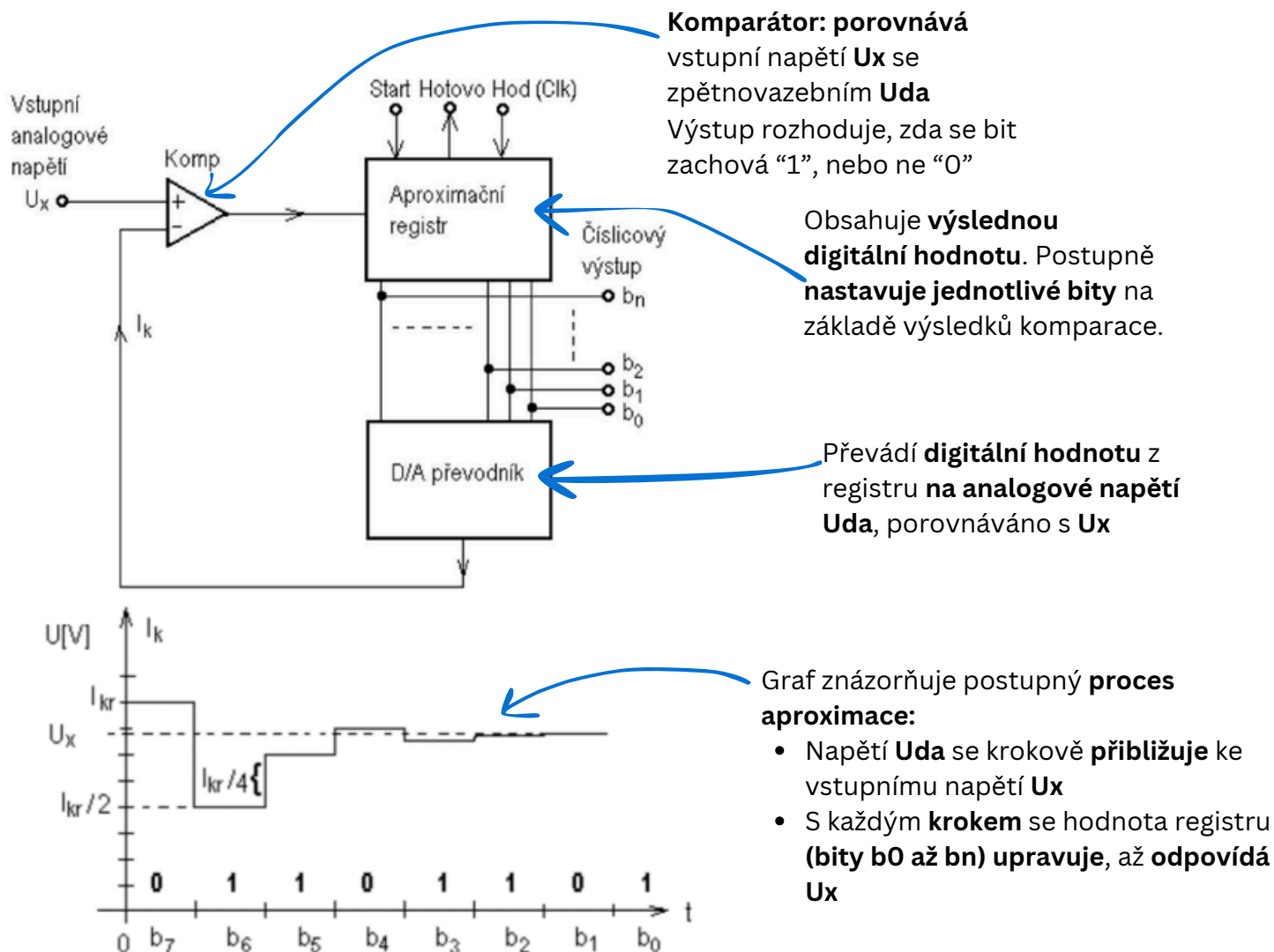
- Používá **obousměrný čítač**, který může čítat jak směrem **vpřed** (*inkrementovat*), tak směrem **vzad** (*dekrementovat*)
- **Směr čítání** je řízen **výstupem z komparátoru**:
 - Pokud je vstupní napětí **U_a větší** než zpětnovazební napětí **U_{da}** , čítač počítá **vpřed**
 - Pokud je vstupní napětí **U_a menší** než **U_{da}** , čítač počítá **vzad**
- **Napětí U_{da}** je generováno pomocí **převodníku Č/A** (*číslicově-analogového převodníku*) na základě **hodnoty čítače**.
- **Komparátor** neustále porovnává **vstupní napětí U_a s U_{da}** a určuje směr čítání
- Tento mechanismus umožňuje **sledovat změny vstupního napětí téměř okamžitě**.
- **Výhoda**: Rychlá odezva na pomalé změny napětí, okamžitá dostupnost hodnoty U_x
- **Nevýhoda**: Špatně reaguje na rychlé změny signálu, protože čítač nestíhá dostatečně rychle měnit hodnoty.
- Často používaný převodník díky jednoduchosti a efektivnosti při sledování pomalejších signálů.



5. A/D Převodníky

Převodník s postupnou aproximací

- Postupně porovnává vstupní analogové napětí U_x s generovaným zpětnovazebním napětím U_{da} (pomocí D/A převodníku)
- **Bity výstupního registru** se nastavují od **nejvýznamnějšího (MSB)** po **nejméně významný (LSB)** na základě výsledku **porovnání** z komparátoru.
- **Postup aproximace:**
 - Na začátku převodu je **registr vynulován**.
 - Nejvýznamnější bit (MSB) je **nastaven** na hodnotu „1“
 - D/A převodník vytvoří **napětí $U_{da} = U_{ref} / 2$**
 - Komparátor **porovná U_{da} s U_x** :
 - Pokud $U_{da} < U_x$: Bit **zůstane „1“**
 - Pokud $U_{da} > U_x$: Bit **se nastaví na „0“**
 - Tento proces se opakuje postupně pro všechny bity registru, až se dosáhne finální hodnoty.
- Má **pevnou dobu převodu**, která je **dána počtem bitů (n)**, protože probíhá vždy **n kroků**.
- Je **velmi přesný** a využívá se v zařízeních, jako jsou **voltmetry a digitální osciloskopy**.
- Při převodu **vyžaduje stabilní vstupní napětí**, aby nedošlo k **chybám**.
 - **Výhody:** Vysoká **přesnost, rychlost, pevná doba převodu**.
 - **Nevýhody:** Změna vstupního napětí během převodu způsobuje **chybu**, proto se často používá **vzorkovací obvod**.

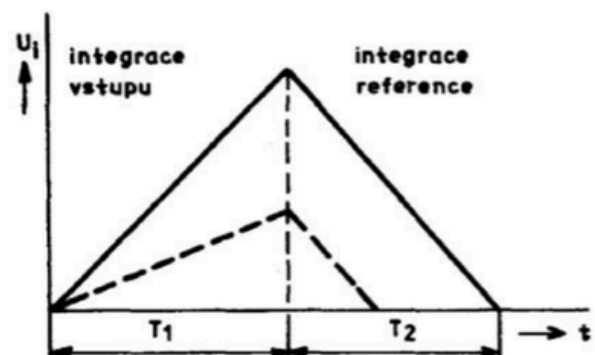
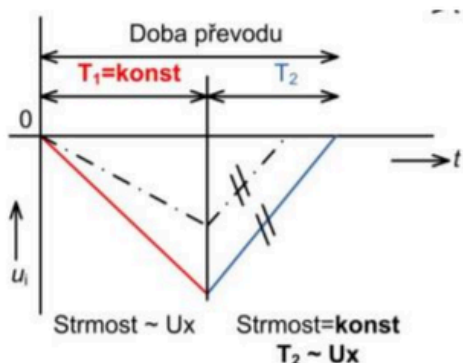
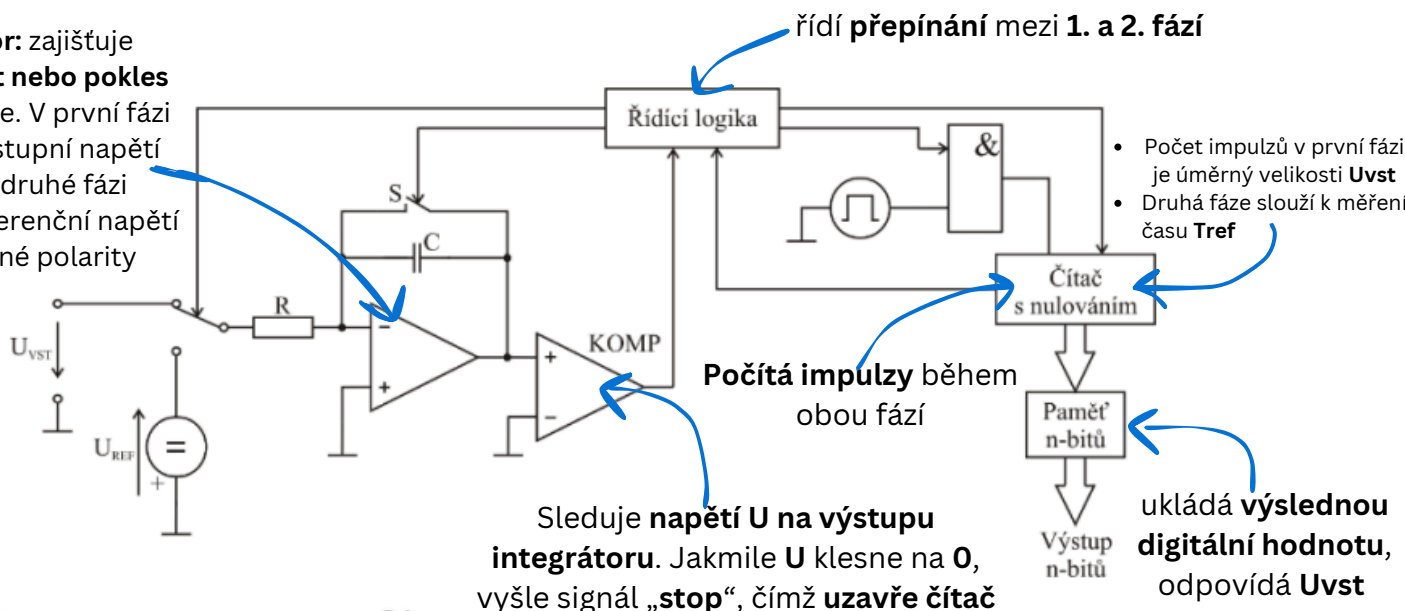


5. A/D Převodníky

Převodník s dvojitou integrací

- Analogový signál U_{VST} je převeden na časový interval T_{ref} , který je úměrný velikosti U_{VST}
- Proces převodu probíhá ve dvou fázích:
 - 1. Fáze (Integrace vstupního napětí):
 - Signálem „start“ se otevře hradlo a čítač se začne plnit impulsy
 - Integrátor lineárně zvyšuje své napětí U rychlostí úměrnou U_{VST} , zatímco čítač počítá impulsy
 - Jakmile dosáhne kondenzátor určité hodnoty, proces se přepne na druhou fázi.
 - 2. Fáze (Integrace referenčního napětí):
 - Přepínač přepne na referenční napětí U_{ref} opačné polarity, čímž začne kondenzátor vybíjet
 - Čítač pokračuje v počítání impulsů, dokud U neklesne na nulu (integrace skončí)
 - Obsah čítače v této fázi odpovídá vstupnímu napětí U_{VST}
- Pomalý převod: Doba převodu závisí na velikosti U_{VST} , což činí převodník méně vhodný pro rychle se měnící signály
- Vysoká přesnost: Odolnost vůči šumu a brumu (např. z transformátorů) díky použití integrace
- Odolnost vůči rušení: Analogový signál je převeden na časový interval, což minimalizuje vliv rušení
- Využití především v multimetrech a dalších přesných přístrojích
 - Výhody: Velmi přesný, odolný proti rušení, stabilní výsledky.
 - Nevýhody: Pomalý, nevhodný pro dynamické signály.

Integrátor: zajišťuje lineární růst nebo pokles napětí v čase. V první fázi integruje vstupní napětí U_{VST} . Ve druhé fázi integruje referenční napětí U_{ref} opačné polarity



5. A/D Převodníky

Sigma-delta převodník

- Vstupní analogový signál je **převzorkován velmi vysokou frekvencí (oversampling)**, což zajišťuje **vysokou přesnost**.
- Pomocí **$\Delta\Sigma$ modulační (delta-sigma modulační)** je kvantizační šum **přesunut do vyšších frekvencí** mimo užitečné pásmo signálu.
- Následně je signál **filtrován a decimován (snížení vzorkovací frekvence)**, čímž vznikne **digitální výstup** s vysokým rozlišením a **požadovanou vzorkovací frekvencí**.
 - **Analogová část:**
 - Obsahuje základní prvky, jako jsou **integrátor, komparátor, zdroj referenčního napětí (U_{ref})** a další obvody pro **zpracování** analogových signálů.
 - **Jednoduchá, pomalejší**, využívá **spojité zpracování** signálu.
 - **Digitální část:**
 - Zahrnuje **číslicovou filtraci a decimaci** vzorkovaného signálu.
 - **Složitější a rychlejší** než analogová část.
- **Oversampling:**
 - Vzorkovací frekvence (f_{vzf}) je mnohonásobně vyšší než maximální frekvence vstupního signálu (f_{max}).
 - $f_{vzf} = n \cdot f_{max}$, kde n je **faktor převzorkování**
 - Umožňuje **lepší potlačení šumu a přesnější rekonstruování signálu**.
- **Decimace:**
 - Po oversamplingu následuje proces **decimace**, kdy jsou **odstraněny nepotřebné vzorky** a signál je převeden na **požadovanou vzorkovací frekvenci**.
 - Cílem je **snížit množství dat bez ztráty informace**.
- **Číslicové filtry:**
 - Potlačují šum způsobený kvantizací a zajišťují čistotu výstupního signálu.
- **Výstupní parametry:** vysoké rozlišení (24/32 bitů, nízká spotřeba energie, vzorkovací kmitočty)
- **Výhody:** vysoké **rozlišení (32 bitů)**, **nízká spotřeba** energie, efektivní **potlačení šumu**, jednoduchá **analogová část**
- **Nevýhody:** **nevhodný pro rychlé změny** signálu, **komplexní digitální část (vyžaduje větší výpočetní výkon)**

