

## Digitální zpracování naměřených signálů

Ing. Vlček

*Doplněk k publikaci Moderní elektronika - kapitoly Měření a Číslicová technika*

Převod analogové měřené veličiny na digitální signál se používá nejen v digitálních multimetrech. Stále častěji se převádějí na čísla **okamžité hodnoty** časově proměnné měřené veličiny, které se potom digitálně zpracovávají např. formou číslicové filtrace nebo rychlou Furierovou transformací. Můžeme tak v reálném čase určovat **spektrum** signálu, můžeme z něj vybírat jeho některé složky.

Digitalizace spočívá ve **vzorkování v čase, kvantování v úrovni a kódování** (vyjádření čísel v určitém kódu). Provádí se kromě oblasti měření při digitalizaci zvukového a obrazového signálu. Při digitalizaci vzniká kvantizační chyba (kvantizační šum).

Typickým příkladem moderních měřicích přístrojů využívajících číslicové zpracování signálu jsou signálové a spektrální analyzátoři nebo tzn. analyzátoři výkonu. Tímto způsobem se také u nejmodernějších číslicových multimetrů počítá efektivní hodnota střídavého napětí. (Běžné voltmetry měří střední hodnotu, jejich údaj se automaticky převádí na efektivní  $U_{ef} = 1,11 U_{stř.}$ . Tento vztah platí pouze pro sinusový signál u jiných průběhů nastává chyba.

### A/D převodníky

Výstup z A/D převodníku je **číselný kód** (zpravidla n-bitový binární nebo BCD). Ukládá se do **paměti** a dále se zpracovává buď v grafické podobě (číslivý osciloskop), případně se před zobrazením zpracovává (spektrální analyzátor, analyzátor výkonu). Nebo se na displeji měřicího přístroje zobrazuje v **dekadické soustavě** a je mu přiřazena desetinná tečka odpovídající použitému rozsahu. Výstupní kód z A/D převodníku nabývá pouze konečného počtu hodnot, které odpovídají většinou rovnoměrně rozloženým úrovním přes celé pásmo vstupních napětí. U **unipolárního** převodníku je to od 0 do  $U_{1max}$ , u **bipolárního** převodníku od  $-U_{1max}$  do  $+U_{1max}$ . Vzdálenost sousedních napětíových úrovní se nazývá **kvantovací krok** odpovídající nejméně významnému bitu A/D převodníku (LSB-least significant bit). **Převodní charakteristika** ideálního A/D převodníku je tedy **schodovitá funkce** (obr. 1d).

**Chyby** A/D převodníků dělíme na **statické** a **dynamické** (s rostoucí frekvencí může klesat rozlišitelnost).

Statické chyby dělíme na **chybu zesílení, chybu nuly a chybu linearity**.

**Kvantovací chyba** přibližně odpovídá jedničce na posledním místě displeje.

Na přesnost A/D převodníku má vliv také **stabilita referenčního zdroje napětí**. Jeho hodnota musí být dlouhodobě stabilní a nesmí se měnit s teplotou. Tento zdroj musí být u **teplotně kompenzovaný**, nesmí z něj být napájeny další obvody s proměnným odběrem proudu.

U A/D převodníků je důležitá jejich **přesnost a rychlost**. V publikaci Moderní elektronika je popsán A/D převodník s **dvou integrací**, který se vyznačuje vysokou přesností a malou rychlostí a který se používá ve většině digitálních multimetrů. Doba převodu je řádově stovky milisekund. Zde jsou uvedeny další typy A/D převodníků, které se vyznačují větší rychlostí.

### A/D převodníky s postupnou aproximací (obr. 1b)

Jedná se o **kompenzační** A/D převodník, který pracuje jako kompenzátor napětí. **Vstupní analogové napětí** v něm řídicí obvod (ŘO) **srovnává se zpětnovazebním kompenzačním napětím na výstupu D/A převodníku**, které se mění tak dlouho, dokud rozdíl obou napětí není menší než kvantovací krok. Převod probíhá v n taktech. Na začátku měření jsou všechny rezistory přes přepínače  $S_1$  až  $S_n$  připojeny k nulovému napětí. V prvním kroku se určí hodnota nejvýznamnějšího bitu (MSB). Přepínač  $S_1$  přepne rezistor R k referenčnímu zdroji napětí  $U_{ref}$ . Na výstupu D/A převodníku bude  $U_{ref}/2$ . Pokud  $U_x$  bude větší než tato hodnota, překloupí se komparátor K. Řídicí obvod ponechá přepínač  $S_1$  v této poloze, jinak jej přepne zpátky.

V dalším kroku se k  $U_{ref}$  připojí rezistor  $2R$  a  $U_x$  se porovná s třemi čtvrtinami (nebo s jednou čtvrtinou  $U_{ref}$ ). Tak se pokračuje až k nejméně významnému bitu (LSB).

Potom se na výstupu převodníku objeví kombinace nul a jedniček odpovídající polohám spínačů. Tyto převodníky se vyrábějí jako 8 až 16 bitové s rozlišením 0,4 až 0,0018 %. **Doba převodu** je řádově **10  $\mu$ s**.

## Paralelní (komparační) A/D převodníky (obr.1c)

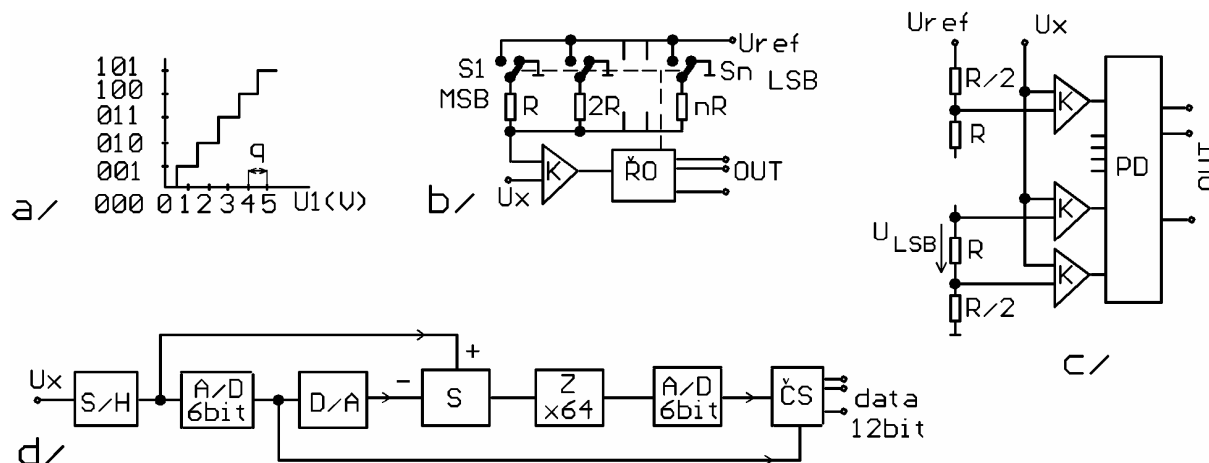
**Vstupní napětí** je v n-bitovém převodníku porovnáváno s  $2^n - 1$  úrovněmi napětí, které jsou vytvořeny odporovým děličem z referenčního napětí  $U_r$ . K tomu je potřeba  $2^n - 1$  komparátorů K. Výstupy všech komparátorů jsou přivedeny do prioritního dekodéru PD. Pořadového čísla nejvyššího komparátoru, který změnil polaritu po připojení napětí, je v prioritním dekodéru převedeno na výstupní binární kód.

**Doba převodu** je dána rychlostí komparátorů a hradel a pohybuje se od **0,5 do 100 ns**. Jejich nevýhodou je velký počet komparátorů. Pro 8bitový převodník je to 255 komparátorů.

Vyššího rozlišení za cenu určitého snížení rychlosti převodu dosáhneme **vicestupňovým převodem** (obr 1d).

Dvoustupňový paralelní 12bitový A/D převodník je složen ze vzorkovače napětí s pamětí (S/H), dvou paralelních 6bitových A/D převodníků, 6bitového D/A převodníku (s chybou odpovídající 12bitovému D/A převodníku), součtového obvodu S, zesilovače Z a číslicové sčítačky (ČS).

Vstupní signál je vzorkován a převeden 6bitovým A/D převodníkem na číslicový signál (získáme tak prvních 6 významnějších bitů). Potom je opět převeden na analogový přesným D/A převodníkem. Jeho výstupní napětí je odečteno součtovým obvodem od výstupu vzorkovače. Rozdíl obou napětí (chyba kvantizace 6bitového převodníku) zesílí zesilovač Z koeficientem  $2^6 = 64$ . Pak jej převádí na číslo druhý 6bitový A/D převodník. Obě 6bitová čísla se sečtou ve sčítačce ČS. Tím se získá 12bitový výsledek.



Obrázek č.1

a/ Převodní charakteristika A/D převodníku (1bit = 1 V, q – kvantovací krok)

b/ Princip A/D převodníku s postupnou aproximací

c/ Princip paralelního A/D převodníku

d/ Dvoustupňový A/D převodník

## D/A převodníky

Skládají se ze zdroje **referenčního napětí**, **sady přesných rezistorů** a **sady spínačů** ovládaných číslicovou logikou. Výstupní veličinou je většinou napětí, ale může jím být taky proud.

Pro výstupní napětí platí vztah:

$$U_0 = c U_r D,$$

Kde D je vstupní číslo v binárním nebo BCD kódu,  $U_r$  je referenční napětí určující napěťový rozsah, c je konstanta úměrnosti.

Pro N bitový D/A převodník platí:

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} z_i 2^i, z_i = 0 \text{ nebo } 1$$

## D/A převodníky s rezistorovou váhovou sítí (obr.2a)

V tomto převodníku se pomocí sčítacího zesilovače (sumátoru) **sčítají binárně vážené proudy vzniklé připojením binárně vážených odporů k referenčnímu napětí  $U_r$** . Elektronické přepínače připojují tyto proudy buď do sčítacího bodu zesilovače nebo na zem.

Pro 4bitový D/A převodník uvedený na obrázku platí:

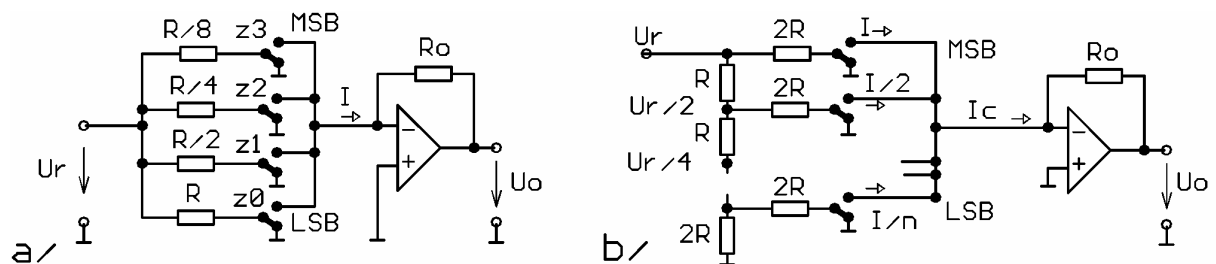
$$U_0 = - (R_0/R) U_r(z_0 + 2 z_1 + 4 z_2 + 8 z_3), \text{ kde } z = 0 \text{ nebo } 1.$$

Pro získání N bitového převodníku potřebujeme rezistory s hodnotami 1 až  $2^N$ . Pro 12bitový převodník je toto pásmo příliš široké (1:4096). Takové rozpětí je nevhodné pro realizaci jako integrovaný obvod. Požadavky na přesnost rezistorů jsou velmi vysoké. Rezistor pro nejvýznamnější bit (MSB) musí mít chybu menší než polovina hodnoty nejméně významného bitu (LSB). To pro 12bitový převodník znamená chybu menší než 0,0125 %.

Tento typ D/A převodníku lze snadno modifikovat pro vstupní číslo v BCD kódu. V takovém případě je každá desítková číslice kódována pomocí 4 rezistorů. Pro číslici o 1 řád vyšší je hodnota odporu R zaměněna hodnotou 0,1 R.

### D/A převodníky s žebříčkovou rezistorovou sítí R-2R (obr.2b)

Binárně váhované proudy ( $I$ ,  $I/2$ ,  $I/4$ , atd) sčítané sumátorem můžeme také získat pomocí stejných rezistorů připojených na binárně váhovaná referenční napětí. Referenční napětí dělíme na polovinu, čtvrtinu, atd. Další funkce je stejná jako u předchozího zapojení.



Obrázek č.2

a/ D/A převodník s binární rezistorovou sítí

b/ D/A převodník s žebříčkovou rezistorovou sítí R-2R

**Literatura:** Elektrická měření, Vladimír Haasz, Vydavatelství ČVUT, Praha 2003