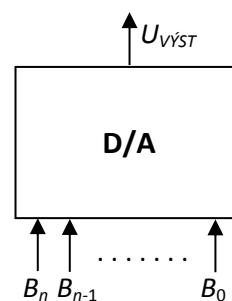


## 2. A/D a D/A prevodníky

Analógovo-číslkové (ďalej len A/D) a číslkovo-analógové (ďalej len D/A) prevodníky (tiež ADC a DAC; C - Converter) nachádzajú uplatnenie všade tam, kde je treba analógový signál číslkovo spracovať alebo analógový signál z číslkového vytvoriť. Treba si uvedomiť, že väčšina veličín má analógový charakter (teplota, tlak, pohyb, ľudský hlas a pod.). Na druhej strane má však číslkové spracovanie analógových signálov rad výhod, ktoré sú podporené ešte relatívnou dostupnosťou a nízkou cenou technického vybavenia pre spravovanie číslkových signálov, ako logických kombinačných a sekvenčných obvodov, mikroprocesorov, pamäti a iných. Oba druhy prevodníkov môžu byť realizované buď výhradne technickými, alebo kombináciou technických a programových prostriedkov.

### 2.1. Vlastnosti D/A prevodníkov

D/A prevodníky zabezpečujú prevod vstupnej číslkovej informácie (údajového slova  $B_n, B_{n-1}, \dots, B_1, B_0$ ) na výstupný analógový signál, obvykle na zodpovedajúcu hodnotu elektrického napätia  $U_{VÝST}$  (menej často elektrického prúdu), Obr. 1. Na výstupe prevodníka však nemôžeme nastaviť ľubovoľnú hodnotu analógového signálu, výstupný signál je schodovitý, jeho hodnoty môžu nadobúdať iba diskkrétne hodnoty. Chyba spôsobená diskrétnymi úrovňami výstupného signálu sa nazýva **kvantizačná chyba**. Maximálna nepresnosť, teda rozdiel medzi požadovanou a nastavenou hodnotou výstupného signálu je daný polovicou prírastku výstupného signálu, zodpovedajúcemu najnižšiemu bitu vstupného údajového slova (LSB –  $B_0$ ).



Obr. 1 Bloková schéma D/A prevodníka

Ďalším dôležitým parametrom je **rozišovací schopnosť (kvantizačný krok)  $Q$** . Je vyjadrovaný počtom diskrétnych stupňov výstupného analógového signálu a je v priamej súvislosti s počtom bitov vstupného údajového slova  $n$ :

$$Q = \frac{1}{2^{n-1}} \quad (1)$$

Ak je na vstupe prevodníka nulové údajové slovo, signál na výstupe prevodníka si označme  $S_{min}$ , pri najväčšom  $n$ -bitovom údajovom slove označme výstupný signál  $S_{max}$ . Definujme si **výstupný rozsah prevodníka** ako rozdiel medzi minimálnym a maximálnym signálom (maximálny rozkmit). Tento rozsah je úmerný referenčnému zdroju  $S_{ref}$  na D/A prevodníku a môžeme ho meniť. Rozsahy prevodníkov sú buď súmerné – bipolárne (napr.  $\pm 10$  V) alebo nesúmerné - unipolárne ( $S_{min}$  je obvykle nulové – napr. rozsah  $0 \div 10$  V). Ak poznáme rozsah  $n$ -bitového prevodníka a jeho vstupné údajové slovo  $N$  (dosadzujeme v desiatkovej sústave), potom môžeme vypočítať výstupný analógový signál:

$$S_{VÝST} = N \frac{S_{max} - S_{min}}{2^{n-1}} + S_{min} \quad (2)$$

#### Príklad 1:

Aké je výstupné analógové napätie osembitového D/A prevodníka, ak je jeho rozsah  $\pm 5$  V a na jeho vstupe je binárne číslo  $(10010011)_B$ ?

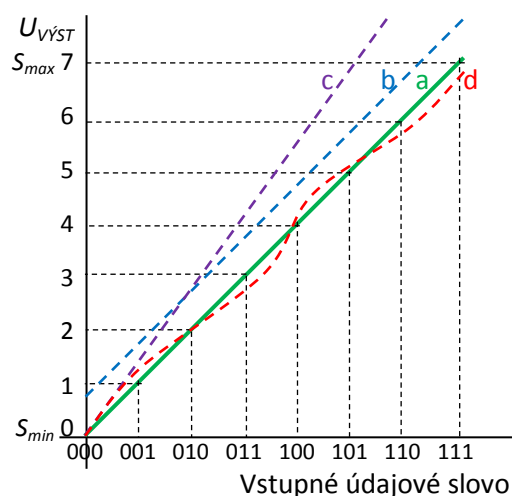
Prv ako dosadíme do predošlého vzťahu, prevedieme si vstupné slovo do desiatkovej sústavy – získame číslo 147.

$$U_{VÝST} = 147 \frac{5 - (-5)}{2^8 - 1} + (-5) \cong 0,76 \text{ V}$$

Ďalším dôležitým parametrom je **presnosť prevodu** vstupného údajového slova na výstupný analógový signál. Príklad ideálnej prevodovej charakteristiky (udávajúcej závislosť medzi vstupným údajovým slovom a výstupnou analógovou veličinou), pre jednoduchosť iba 3-bitového D/A prevodníka, je uvedený na Obr. 2 spolu s možnými chybami prevodu.

## ANALÓGOVÉ VSTUPY A VÝSTUPY – A/D, D/A prevodníky

Predpokladaný 3-bitový prevodník má osem kódovaných vstupných úrovní, daných údajovými slovami  $(000)_B$  až  $(111)_B$ , z ktorých získame sedem  $(2^n - 1)$  úrovní normalizovaného výstupného signálu (vzťahnutého k referenčnému signálu  $S_{ref}$ , v príklade charakteristiky je 8 V) v rozsahu  $S_{min}$  až  $S_{max}$ . V praxi sa reálna prevodová charakteristika líši od ideálnej (a) vplyvom napäťového posunu - označované tiež chyba nuly či ofset (b), zmenou zisku - označované tiež chyba rozsahu či drift, ktorý môže spôsobovať zmena ofsetu a ďalších chýb v čase a s teplotou (c) alebo nelinearitou prevodníka (d) prípadne šumu. Celková presnosť prevodníka je pochopiteľne tiež podstatne závislá na stabilite zdroja referenčného napätia. **Nestabilita zdroja referenčného napätia** ovplyvňuje presnosť prevodu, nemá však vplyv na rozlišovaciu schopnosť prevodníka a na jeho linearitu.



Obr. 2 Prevodová charakteristika D/A prevodníka

Významným parametrom je **maximálna rýchlosť prevodu**, ktorá je určená počtom vstupných údajových slov, ktoré sú prevodníkom prevedené na výstupnú analógovú veličinu za jednotku času. Niekedy sa tiež uvádza **doba prevodu** ako prevrátená hodnota rýchlosti prevodu. Je to časový interval medzi privedením vstupného údajového slova na vstup prevodníka a okamžikom dosiahnutia ustálenej hodnoty výstupného analógového signálu.

Základnou aplikáciou D/A prevodníkov v spojení s mikroprocesorom, resp. počítačom je generovanie rôznych hodnôt, prípadne rôznych priebehov výstupného napätia. Toto napätie môže byť buď priamo použité pre riadenie pripojených akčných členov alebo môže slúžiť ako vstupné napätie pre pripojený prevodník napätia na inú elektrickú alebo neelektrickú veličinu.

## 2.2. Typy D/A prevodníkov

Typy D/A prevodníkov najčastejšie delíme na **priame** a **nepriame**. V priamych prevodníkoch je vstupné údajové slovo priamo prevedené na výstupné napätie, prípadne prúd. Tieto prevodníky sú najčastejšie riešené pomocou **priečkovej** alebo **váhovej** štruktúry odporovej siete. Základnou charakteristikou nepriamych D/A prevodníkov je rozdelenie prevodu na dve časti – v prvej časti je číslcová veličina prevedená na pomocný diskretný signál (na šírku impulzu alebo počet impulzov za jednotku času), ktorý je v druhej časti prevedený na výstupný analógový signál.

Princíp **D/A prevodníka s váhovou štruktúrou odporovej siete** je znázornený na Obr. 3. Riadiacou veličinou je vstupné údajové slovo, prenášané prostredníctvom údajovej zbernice. Jednotlivé bity vstupného slova  $B_7, B_6, \dots, B_0$  s váhou  $2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^n$  ovládajú jednotlivé elektrické prepínače (riadené spínače), ktoré majú v sérii odpory s takými hodnotami, že každá ďalšia hodnota je vždy dvojnásobkom predchádzajúcej. V prípade Obr. 3, kde je zobrazená realizácia 8-bitového D/A prevodníka, majú spomínané odpory hodnoty  $128R, \dots, 4R, 2R, R$  (počínajúc prepínačom s najnižšou váhou (zodpovedajúcou bitu  $B_0$ )). Pri spínaní jednotlivých prepínačov sa mení celkový prenos výstupného zosilňovača (princíp súčtového zosilňovača).

Z vlastností ideálneho operačného zosilňovača, pre zapojenie podľa Obr. 3, vyplýva:

$$I_{VYST} = I_F = I_7 B_7 + I_6 B_6 + I_5 B_5 + I_4 B_4 + I_3 B_3 + I_2 B_2 + I_1 B_1 + I_0 B_0 = - \frac{U_{VYST}}{R_F}$$

kde  $I_7 = \frac{U_{REF}}{2^0 R}; I_6 = \frac{U_{REF}}{2^1 R}; \dots \dots I_0 = \frac{U_{REF}}{2^7 R};$  všeobecne  $I_i = \frac{U_{REF}}{2^{(n-1)-i} R}$

**ANALÓGOVÉ VSTUPY A VÝSTUPY – A/D, D/A prevodníky**

kde  $n$  je počet bitov údajového slova a  $B_i$  nadobúda hodnoty 0 alebo 1 podľa stavu príslušného spínača.

Z toho

$$U_{VÝST} = -R_F(I_7B_7 + I_6B_6 + \dots + I_0B_0) = -U_{REF} \frac{R_F}{R} \left( \frac{B_7}{1} + \frac{B_6}{2} + \frac{B_5}{4} + \frac{B_4}{8} + \frac{B_3}{16} + \frac{B_2}{32} + \frac{B_1}{64} + \frac{B_0}{128} \right)$$

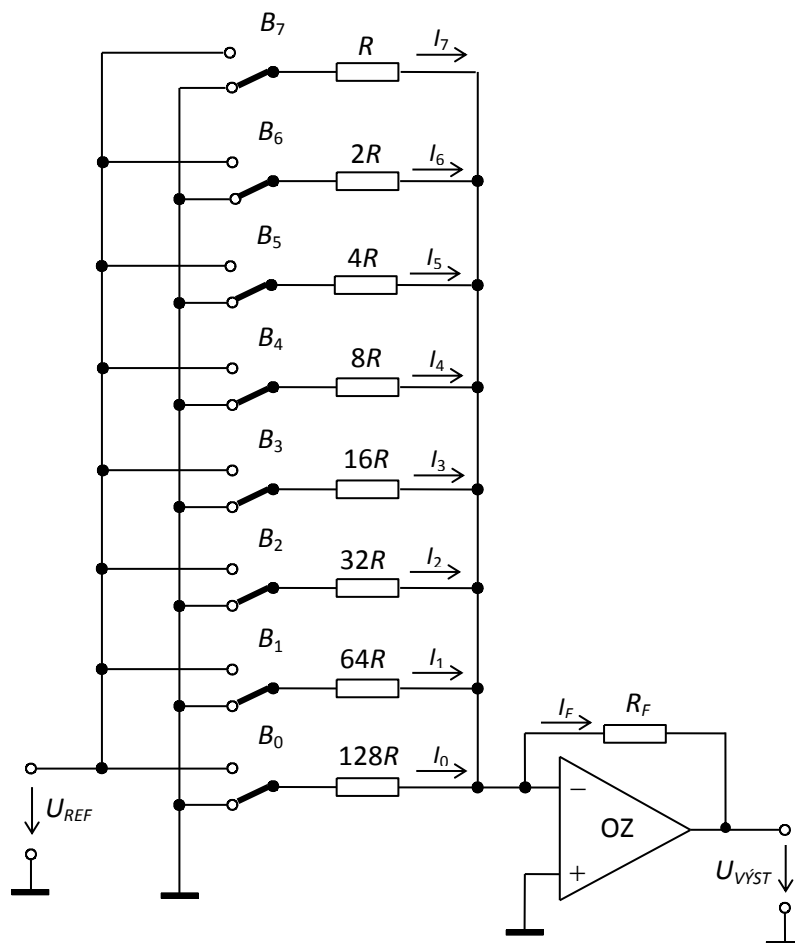
Pre napätie na výstupe prevodníka môžeme zovšeobecnene zapísať vzťah:

$$U_{VÝST} = -U_{REF} \frac{R_F}{R} \sum_{i=0}^{2^n-1} \frac{B_i}{2^{(n-1)-i}} \quad (3)$$

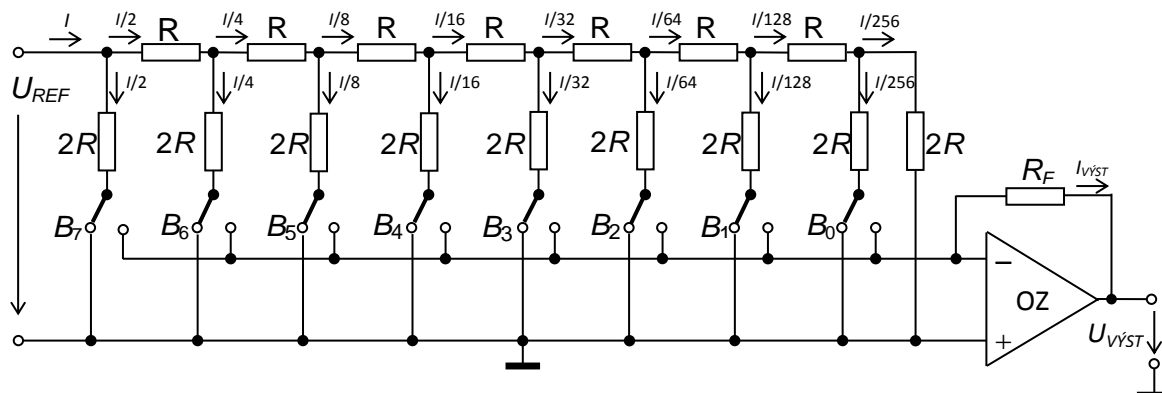
Takýto D/A prevodník je rýchly, ale menej presný. Odporová sieť má veľmi rozdielne hodnoty odporov a presnosť týchto odporov v jednotlivých bitoch údajového slova sa prejavuje rôzne na výslednej presnosti.

**D/A prevodník s priečkovou štruktúrou odporovej siete** na Obr. 4, v tomto prípade s odporovou sieťou  $R - 2R$ . Vstupný prúd z referenčného zdroja napätia sa delí v každom uzle a zodpovedá dvojkovej váhe. Keďže odpory majú rovnakú, resp. porovnateľnú hodnotu, môžu byť vyrobené rovnakou technológiou, čím dosiahneme ľahšie ich rovnakú toleranciu a teplotnú závislosť. Štruktúra odporovej siete je usporiadaná tak, že príspevok každého nasledujúceho bitu naľavo

od každého uzla je  $R$ . V dôsledku toho príspevok nasledujúceho bitu na výstupné analógové napätie sa vždy znižuje o násobok 0,5. Pomocou princípu superpozície dostaneme rovnaký



Obr. 3 Zapojenie váhového 8 bitového D/A prevodníka



Obr. 4 Zapojenie 8 bitového priečkového D/A prevodníka R-2R

**ANALÓGOVÉ VSTUPY A VÝSTUPY – A/D, D/A prevodníky**

vzťah (3) pre výstupné analógové napätie ako v prípade predošlého prevodníka.

Pre výstupný prúd vyplýva zo schémy na Obr. 4:

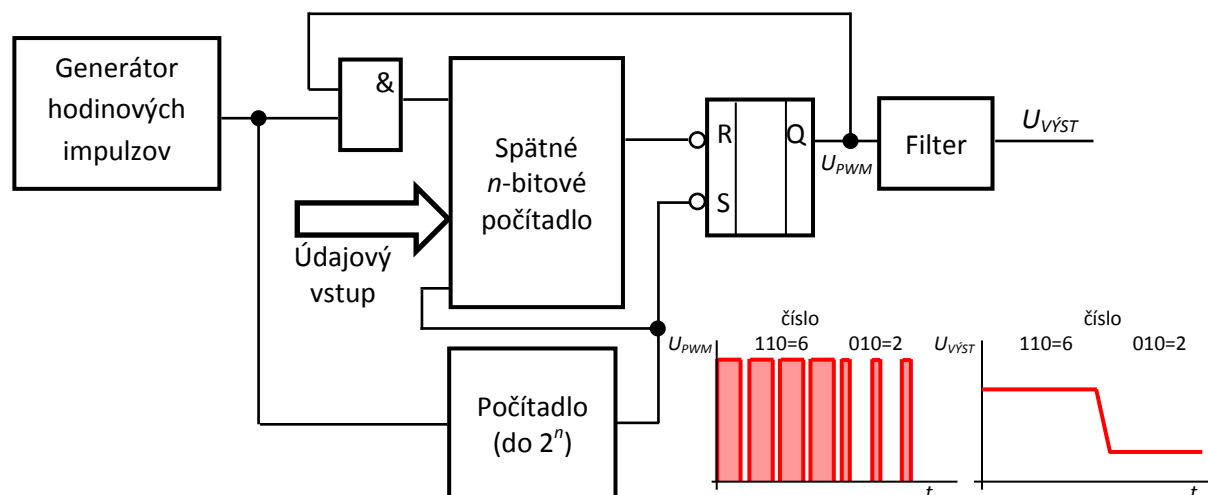
$$I_{VYST} = \frac{I}{2}B_7 + \frac{I}{4}B_6 + \frac{I}{8}B_5 + \dots + \frac{I}{256}B_0 = \frac{I}{2} \sum_{i=0}^{2^n-1} \frac{B_i}{2^{(n-1)-i}}; \text{ kde } I = I_{REF}$$

Pre výstupné napätie potom platí:

$$U_{VYST} = -U_{REF} \frac{R_F}{R} \sum_{i=0}^{2^n-1} \frac{B_i}{2^{(n-1)-i}}$$

V nepriamych D/A prevodníkoch má pomocný signál buď tvar impulzu, mieronosnou veličinou je šírka impulzu s konštantnou amplitúdou, prípadne pomer šírky impulzu k dobe prevodu (strieda) – prevodníky s pulzne šírkovou moduláciou (PWM – Pulse Width Modulation) alebo je pomocný signál tvorený skupinou impulzov, mieronosnou veličinou je počet impulzov konštantnej šírky a amplitúdy počas doby prevodu – prevodníky s moduláciou hustotou pulzov (PDM – Pulse Density Modulation).

Popíšme si jedno z možných principiálnych zapojení **D/A prevodníka s PWM** na Obr. 5. Vstupné údajové slovo, pre jednoduchosť trojbitové, slúži ako predvoľba spätného počítadla, taktovaného generátorom hodinových impulzov. Pri priechode tohto počítadla nulou preklapí preklápací obvod RS do nulového stavu, čím sa zastaví odčítanie spätného počítadla. Po uplynutí doby prevodu, určenej druhým  $n$ -bitovým počítadlom, je preklápací



Obr. 5 Bloková schéma D/A prevodníka s PWM a priebeh výstupného signálu

obvod RS preklapený do jednotkového stavu a prevod sa opakuje. Impulzy sú potom prevedené na analógový signál pomocou filtra; filtrovanie môže byť realizované tiež napr. zotrvačnosťou pripojeného akčného člena (kúrenie, motor).

Takéto prevodníky sú vhodné iba pre pomaly sa meniace výstupné napätie (max. stovky Hz)

**Príklad 2:**

Navrhnite D/A prevodník s váhovou štruktúrou odporovej siete tak, aby prevádzal dvojciferné dekadické kladné číslo kódované v BCD kóde na analógové napätie v rozsahu 0 až 10 V s rozlišovacou schopnosťou 100 mV. Referenčné napätie je dané  $U_{REF}=10$  V.

**Riešenie:**

Kód v ktorom pracuje D/A prevodník určujú hodnoty vstupných odporov. Keďže prevodník má pracovať v kóde BCD (v dekadickom vyjadrení má prevádzať čísla 0 až 99) pôjde o osembitový prevodník. Každá štvorica bitov kóduje jednu dekádu ( $B_7 - B_4$  vyšší rád a  $B_3 - B_0$  nižší rád). Váhy (hodnoty) vstupných odporov určíme vo vzťahu k hodnote

## ANALÓGOVÉ VSTUPY A VÝSTUPY – A/D, D/A prevodníky

spätnoväzbového odporu  $R_F$  a  $U_{REF}$ .

Vyjdeme z rozlišovacej schopnosti prevodníka: Prenos ( $A_{U0}$ ) vo vetve bitu LSB nižšieho rádu, teda bitu  $B_0$  musí byť taký, aby  $U_{REF} = 10\text{ V}$  na vstupe spôsobilo na výstupe zmenu napätia  $100\text{ mV}$ . Pre prenos OZ v danej vetve platí

$$A_{U0} = \frac{R_F}{R_{VST0}} = \frac{U_{VYST}}{U_{VST}} = \frac{0,1}{10} = 0,01; \quad U_{VST} = U_{REF}$$

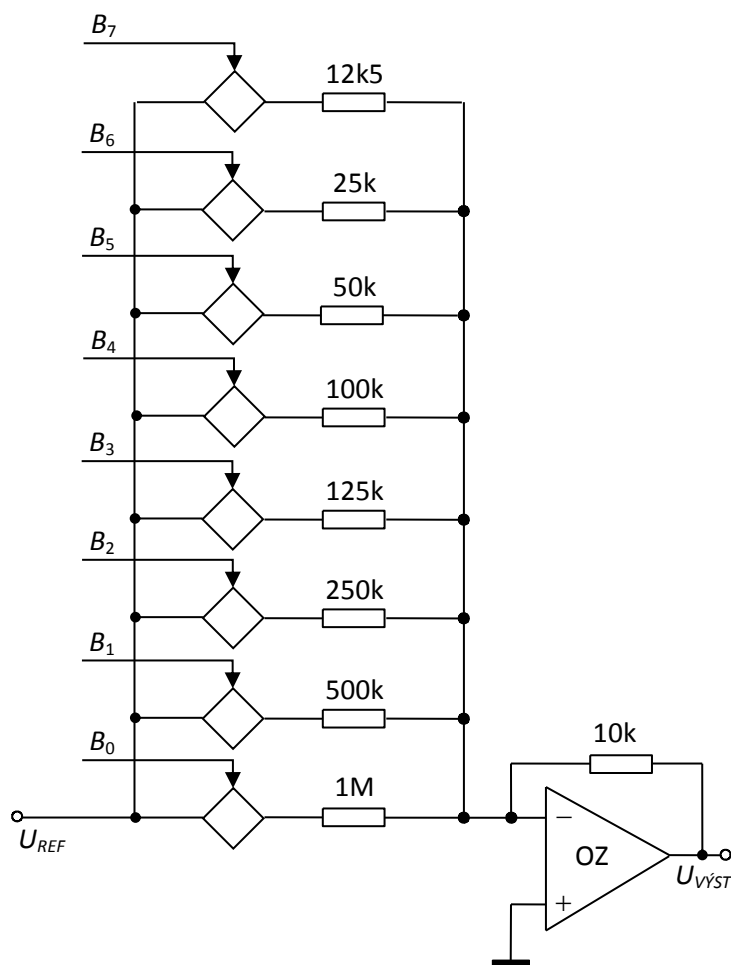
Spätnoväzbový odpor si vhodne zvolíme, napr.  $R_F = 10000\ \Omega = 10\text{ k}$  potom

$$R_{VST0} = \frac{R_F}{A_{U0}} = \frac{10000}{0,01} = 1\text{ M}$$

Obdobne by sme vypočítali aj ostatné hodnoty odporov pre vstupy s váhami  $0,02$  ( $B_1$ );  $0,04$  ( $B_2$ );  $0,08$  ( $B_3$ );  $0,1$  ( $B_4$ );  $0,2$  ( $B_5$ );  $0,4$  ( $B_6$ );  $0,8$  ( $B_7$ ). Schému zapojenia predstavuje Obr. 6

Ako príklad konkrétneho prevodu predpokladajme, že na vstupe je číslo  $(56)_D$

5				6			
0	1	0	1	0	1	1	0
$B_7$	$B_6$	$B_5$	$B_4$	$B_3$	$B_2$	$B_1$	$B_0$
	4		1		0,4	0,2	
$U_{VYST} = 4 + 1 + 0,4 + 0,2 = 5,6\text{ V}$							



Obr. 6 D/A prevodník pracujúci v kóde BCD

Na záver tejto kapitoly o D/A prevodníkoch si uvedme ich niektoré súčasné reálne katalógové hodnoty. Najdôležitejším parametrom býva počet bitov (rozlíšenie), ktorý sa pohybuje od 8 do 16. Významným kritériom pre výber D/A prevodníka je doba prevodu, ktorá býva prevažne od  $0,01$  do  $25\ \mu\text{s}$ . Ďalej je dôležité, v akej forme do prevodníka

vstupuje údajové slovo – buďto paralelne, alebo sériovo (najčastejšie dvojvodičovým rozhraním I<sup>2</sup>C alebo trojvodičovým rozhraním SPI). Napájacie napätie prevodníkov je buď jednoduché (napr.  $+3,3\text{ V}$ ;  $+12\text{ V}$ ) alebo súmerné (napr.  $\pm 15\text{ V}$ ), referenčné napätie býva nižšie než napájacie (max.  $0,9 U_{CC}$ ), napr.  $2,5$  alebo  $5\text{ V}$ .