

## 6. DA a AD převodníky, galvanické oddělení

určeno pro předmět Elektronika, FS, návazující studium

obsah:

- 1) Základy teorie DA a AD převodu
- 2) Digitálně analogové DA (ČA) převodníky
- 3) Analogově digitální AD (AČ) převodníky
- 4) Galvanické oddělení signálu

Katedra obecné elektrotechniky

Ing. Václav Kolář

září 2004

(poslední změna prosinec 2008)

*poznámka: Některé komplikovanější obrázky, nebo statě, které nejsou pro výklad látky nezbytně nutné, jsou do textu v elektronické podobě vloženy jako odkazy na externí soubory. Tyto soubory mají být umístěny v podadresáři dodatky, pokud to tak není, nezobrazí se vám. Pokud je chcete vytisknout, musíte je vytisknout samostatně.*

### 6.1. Základy teorie DA a AD převodu

Zkratka DA převod znamená digitálně analogový převod, tedy převod číselné hodnoty na analogovou hodnotu napětí nebo proudu. Někdy se též používá zkratka ČA - číslicově analogový.

Zkratka AD převod znamená analogově digitální převod, převod hodnoty napětí nebo proudu na číselnou hodnotu, někdy se též používá zkratka AČ - analogově číslicový.

Elektronický obvod, který realizuje tyto převody se nazývá převodník (anglicky converter).

AD a DA převodníky se využívají v měřicí a regulační technice, při číslicovém záznamu obrazu a zvuku a podobně.

Základní problémy, se kterými se při AD a DA převodech setkáváme si vysvětlíme na AD převodu.

#### Chyba kvantování

Při AD převodu jde o to, že analogovou veličinu, např. napětí které je spojitou veličinou, nahrazujeme číselnou hodnotou - celým, nebo racionálním číslem. Proto výsledek převodu nemůže přesně odpovídat vstupnímu napětí. AD převodníky většinou podávají výsledek převodu ve dvojkové soustavě. Čím má převodník více bitů, tím může být převod přesnější.

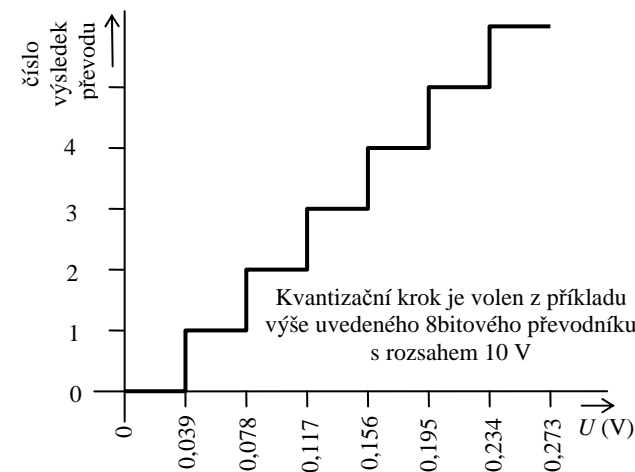
Máme-li například převodník se vstupním rozsahem 0 až 10 V a je 8bitový, můžeme určit kvantizační krok tohoto převodníku (nejvyšší teoreticky dosažitelnou přesnost) následovně. Převodník může rozlišovat  $2^8 = 256$  úrovní, potom kvantizační krok =  $10 / (256 - 1) = 0,039$  V.

Převodník se stejným rozsahem 0 až 10 V, ale 16bitový, rozlišoval by  $2^{16} = 65536$  úrovní. Potom by byl kvantizační krok =  $10 / 65536 - 1 = 0,00015$  V.

Převodník nemůže nikdy převést hodnotu napětí s větší přesností než je hodnota kvantizačního kroku, ve skutečnosti bude nepřesnost ještě vyšší, protože převod je zatížen dalšími chybami.

Hodnota kvantizačního kroku se někdy také označuje LSB (last significant bit - nejméně významný bit). Zvyšováním počtu bitů převodníku lze velikost kvantizačního kroku zmenšit, ale převodník je pak složitější, dražší a často také pomalejší. Počet bitů nelze tudíž zvyšovat neomezeně, prakticky se používají převodníky 8 až 16 bitové, výjimečně vícebitové.

Na obrázku 1. je naznačeno kvantování při převodu AD převodníkem a vznik kvantizační chyby.



Obr. 1. Kvantování AD převodníku, vznik kvantizační chyby

## Chyba vzorkování

Vzniká tehdy, jestliže převodníkem převádíme signál (např. napětí), které se v čase mění a chceme zaznamenat jeho změny. Potom ze signálu který se v čase mění spojitě odeberáme pouze vzorky v určitých časových intervalech. Rychlost vzorkování musí být podstatně vyšší, než rychlost změny měřeného signálu. Na obrázku 2 je naznačena správně a nesprávně zvolená vzorkovací rychlost a také to, jak se bude jevit získaný číslicový záznam signálu. Vzorkovací rychlost se udává v SpS (sample per secede vzorků za sekundu). (Správně označení je vzorkovací rychlost, nesprávně se často používá výraz vzorkovací frekvence).

V prvním případě je rychlost vzorkování zvolena dostatečně vysoká, aby se ze vzorků dal alespoň přibližně rekonstruovat průběh měřeného signálu. Pro přesnou rekonstrukci by bylo vhodné zvolit ještě vyšší vzorkovací rychlost.

Ve druhém případě je vzorkovací rychlost příliš malá a záznam průběhu je zcela špatný. Rekonstrukci vzorků dostaneme úplně jiný průběh, než původní.

Podle matematické teorie je možné libovolný periodický průběh rozložit na Fourierovu řadu, což je součet harmonických průběhů jejichž kmitočet je celistvým násobkem kmitočtu původního průběhu. Platí takzvaný Šanonm Kotělníkův teoren (též Nyquistův), podle kterého pro zaznamenání periodického průběhu musíme vzorkovat nejméně s dvojnásobnou frekvencí, než je frekvence nejvyšší harmonické složky vzorkovaného průběhu. Praktické zkušenosti ukazují, že dvojnásobek je málo, lépe je použít vzorkovací frekvenci 3 až 4 násobnou než je nejvyšší harmonická složka měřeného průběhu.

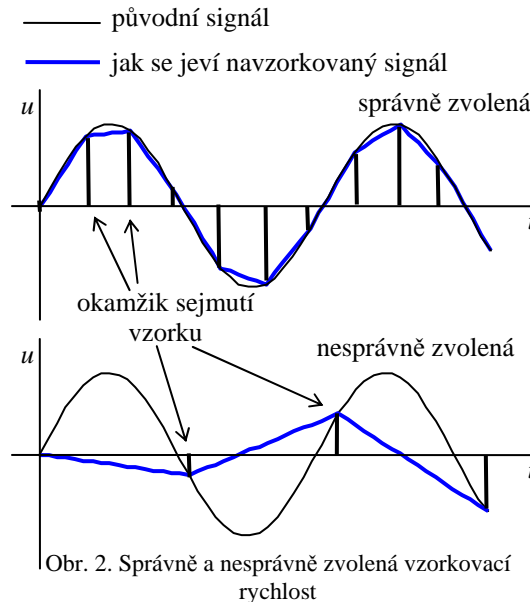
$$f_{\text{VZORKOVACÍ}} \geq 2 \cdot f_{\text{MAX}} \quad (1)$$

Kde  $f_{\text{MAX}}$  je maximální frekvence přítomná v měřeném signálu.

## Další chyby vyskytující se u převodníků

- Ofset - nule signálu neodpovídá přesně nula na výstupu převodníku, dá se poměrně jednoduše matematicky odstranit (je-li jeho velikost stálá).
- Nelinearita - že převodník nepřevádí v celém rozsahu lineárně, odstraňuje se těžko.
- Drift - změna offsetu, nelinearity a dalších chyb v čase a s teplotou. Částečně lze odstranit kalibrací.
- Šum - náhodné rušení, které vstupuje do procesu převodu. Někdy lze jeho vliv zmenšit statistickým zpracováním naměřených vzorků (změřím více vzorků a vypočítám průměr).

Chyba AD převodníků se někdy udává v LSB (last significant bit, kvantovací krok), ve výše uvedeném příkladě 8bitového převodníku byla hodnota LSB 0,039 V, kdyby výrobce udával



maximální chybu (součet všech chyb převodníku) např. 5 LSB, znamenalo by to, že chyba převodníku může dosáhnout až  $5 \cdot 0,039 = 0,195$  V.

## 6.2. Digitálně analogové DA (ČA) převodníky

Slouží k převodu číselně zadané hodnoty na napětí nebo proud. Čísla se do převodníku zadají většinou ve dvojkové soustavě, buďto paralelně (např u 8 bitového převodníku po 8 vodičích), nebo sériově postupně posloupnost logických jedniček a nul po jednom vodiči. Paralelní přenos je rychlejší, u sériového zase stačí méně vodičů. DA převodníky se většinou vyrábějí jako integrované obvody, nebo jsou součástí složitějších integrovaných obvodů.

U DA i AD převodníků se setkáváme s pojmem referenční napětí, je to napětí, které odpovídá plnému rozsahu převodníku. U některých převodníků je pevně dané (např. 5 V), u jiných ho připojujeme k převodníku zvenku a můžeme ho tudíž volit, např v rozsahu 1 až 5 V.

Podle principu činnosti existuje několik druhů DA převodníků, je nad rámec tohoto textu podrobně jejich činnost rozebírat. Uvedeme jen dva příklady činnosti DA převodníku.

### DA převodníky pracující spojitě v čase

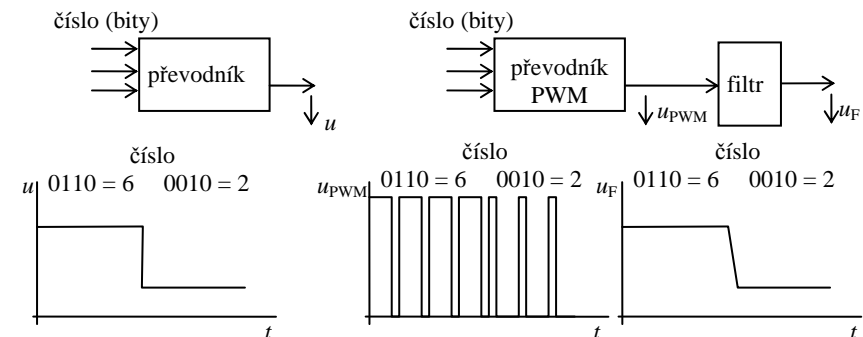
Existuje několik principů zapojení, na kterých může být tento převodník založen. Pro zájemce je zde zapojení DA převodníku s odporovou sítí: [dotanky\DA\\_prevodnik.pdf](#)

Tyto převodníky jsou často používané a mohou převádět rychle se měnící signály (kHz až MHz).

### DA převodníky pracující v čase (nespojitě)

Sem patří hlavně DA převodníky s pulzně šířkovou modulací (PWM - pulse width modulation) Pracují na podobném principu jako šířkově modulované měniče stejnosměrného napětí. Jsou vhodné pouze pro pomalu se měnící výstupní napětí (max. stovky Hz). Na výstupu převodníku je „rozsekané“ pulzí napětí, které se musí vyfiltrout.

Na obrázku 3 je blokový náčrtek DA převodníků pracujících spojitě v čase a nespojitě, i s průběhy výstupního napětí. Pro jednoduchost je naznačeno, že jde o převodníky pouze 3bitové.



Obr. 3. DA převodník pracující spojitě v čase a nespojitě (PWM)

### DA převodníky frekvence - napětí

Jde o zvláštní typ převodníku, na vstup je přivedeno napětí určité frekvence (důležitá je frekvence, nikoli velikost) a převodník převede frekvenci na napětí.

### 6.3. Analogově digitální AD (AČ) převodníky

Existuje několik typů AD převodníků, liší se podle principu činnosti a podle toho se liší i některé jejich další vlastnosti jako rychlost, přesnost, odolnost proti rušení, složitost a cena. Uvedeme si jen některé z nich - nejčastěji používané.

#### Paralelní AD převodník

Tento převodník je velmi rychlý, dosahuje vzorkovací rychlosti 10 MSps až 10 GSpS, ale je obvodově složitý, vyžaduje velký počet komparátorů, proto je drahý. Pro  $n$  bitový převodník je potřeba  $2^n - 1$  komparátorů, pro 8bitový tedy 255, pro 10bitový 1023 komparátorů.

Využívá se tam, kde je potřeba velké vzorkovací rychlosti, např. v digitálních osciloskopech. Principiální schéma 3bitového paralelního AD převodníku je na obrázku 4.

Operační zesilovače tvoří komparátory. Na jeden jejich vstup je přivedeno měřené napětí, na druhý referenční napětí vhodně podělené odporovým děličem (na + vstupu nejnižšího komparátoru je např. 1 V, na dalším 2 V, pak 3 atd.).

Komparátory porovnávají měřené napětí s napětími z odporového děliče, výstup některých komparátorů se překlopí do log. 1, ostatních do log. 0.

Kódovací obvod převede informace z výstupů komparátorů do dvojkové soustavy.

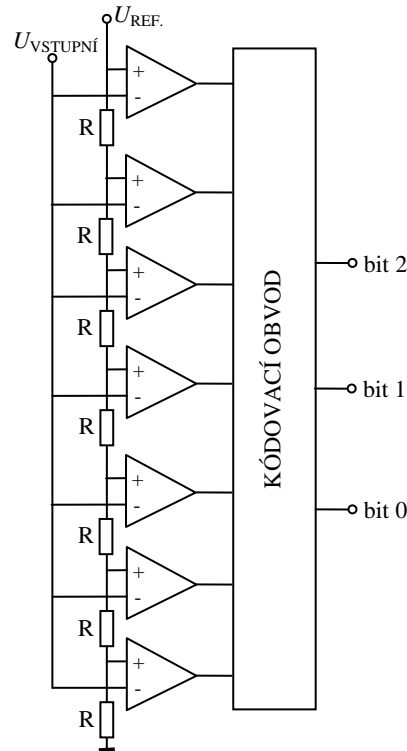
#### AD převodník s postupnou aproximací

Tento převodník je při větším počtu bitů obvodově jednodušší než paralelní AD převodník, ale pracuje pomaleji. Maximální dosažitelná vzorkovací rychlost je asi 200 kSpS. Tento typ převodníku se často používá v audiotechnice, v měřicích kartách do PC a podobných měřicích obvodech.

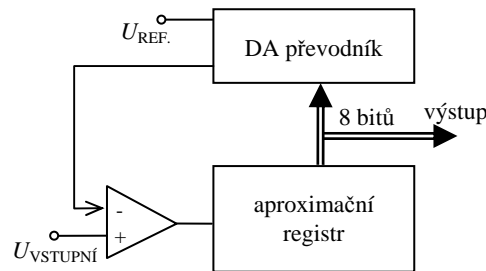
AD převodník s postupnou aproximací v principu obsahuje DA převodník, jeden komparátor a řídicí obvod (logický obvod, někdy nazývaný aproximační registr). Zjednodušené principiální schéma 8bitového AD převodníku s postupnou aproximací je na obrázku 5.

Princip činnosti:

Aproximační registr postupně nastavuje bity do DA převodníku od nejvyššího po nejnižší. Podle toho se mění napětí na výstupu DA převodníku. Komparátor porovnává toto napětí s měřeným napětím. Metodou půlení intervalu se postupně přibližuje číselná hodnota na výstupu převodníku hodnotě vstupního napětí. U osmibitového



Obr. 4. Paralelní AD převodník



Obr. 5. AD převodník s postupnou aproximací

převodníku je k převodu potřeba 8 kroků - 8 postupných aproximací. U 16bitového převodníku je k převodu potřeba 16 kroků.

#### Integrační AD převodníky

Tyto převodníky pracují na principu nabíjení kondenzátoru (nabíjení kondenzátoru je vlastně integrace proudu), měří se čas za který se kondenzátor nabije nebo vybije. Tento čas je úměrný vstupnímu napětí. Tyto převodníky jsou značně pomalé, dosahují vzorkovacích rychlostí nanejvýš stovky SpS, nehodí se tedy pro zaznamenávání průběhu střídavého napětí. Používají se hlavně digitálních multimetrech a podobných aplikacích, kde stačí několik převodů za sekundu.

Existuje několik typů těchto převodníků: s jednou integrací, s dvojitou integrací a s vícenásobnou integrací. Popíšeme si první dva.

#### AD převodník s jednoduchou integrací

V převodníku je kondenzátor, který se nabíjí konstantním proudem (přesný vnitřní proudový zdroj). Nabíjení se ukončí, když napětí na kondenzátoru dosáhne úrovně shodné s měřeným napětím. Převodník měří čas který trvalo nabíjení. Tento čas je úměrný měřenému napětí. Pak se kondenzátor vybije a celý cyklus se může opakovat.

#### AD převodník s dvojitou integrací

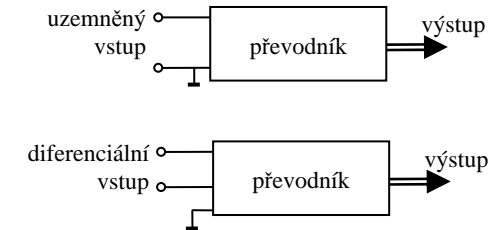
Kondenzátor v převodníku se nabíjí po konstantní dobu proudem, který je úměrný vstupnímu napětí. Pak se kondenzátor vybíjí konstantním proudem (přesný vnitřní proudový zdroj) až do nuly a měří se čas, za který se kondenzátor vybije. Tento čas je úměrný měřenému napětí.

Vhodnou volbou konstantního nabíjecího časového intervalu lze u tohoto převodníku odstranit rušení ze síťového rozvodu. Podrobněji zde: [dodatky/sitove\\_ruseni.pdf](#)

#### Některé parametry AD převodníků obecně

Bez ohledu na princip funkce jsou u AD převodníků důležité následující parametry:

- Zda má převodník uzemněný vstup, nebo diferenciální. Diferenciální je odolnější proti rušení. Viz. obr. 6.
- Bipolární nebo unipolární vstup. Bipolární dokáže převádět jen napětí jedné polaroty, např. 0 až 5 V, unipolární obě polaroty, např.  $\pm 5V$ . (Neplést s bipolárními a unipolárními tranzistory.)
- Počet kanálů. Výše uvedené převodníky byly jednocanálové, ale dnes se vyrábějí i vícekanálové převodníky jako IO. To znamená, že takový převodník může měřit více vstupních napětí.



Obr. 6. Diferenciální a uzemněný vstup

## 6.4. Galvanické oddělení signálu

V mnoha aplikacích je potřeba z důvodu bezpečnosti nebo i z jiných galvanicky oddělit dvě části obvodu. Existuje několik možností, jak to provést. Ve střídavých silových obvodech lze k tomuto účelu použít transformátor, v obvodech měření střídavých napětí a proudů lze použít měřicí transformátor. Při měření stejnosměrného napětí nebo proudu nelze měřicí transformátor použít, existují ovšem čidla využívající Hallova jevu (lidově se jim podle známého výrobce firmy LEM říká lemčidla), která mají podobnou funkci jako měřicí transformátor a převádějí i stejnosměrné proudy a napětí. V elektronice se velmi často uplatňuje optické oddělení.

### Optické oddělení signálu

Toto oddělení se uplatňuje často ve spojení s počítači, ale i jinde, kde je potřeba galvanicky oddělit dvě části obvodu. Kromě bezpečnosti se optickým oddělením dosáhne i omezení rušení, které se může do obvodu indukovat, je-li příliš rozsáhlý (např. dlouhé kabely v průmyslových rozvodech).

K optickému oddělení slouží takzvané optočleny. Optočlen sestává ze svítivé LED diody na jedné straně a fotodiody nebo fototranzistoru\* na druhé straně. Je možné ho vyrobit z diskretních součástek, ale to není příliš vhodné. Vyrábí se jich celá řada v podobě integrovaných obvodů, výrobci zaručují izolační pevnost mezi vstupem a výstupem až 5 kV.

Optočlenem je možné oddělit signál analogový, nebo digitální. Obojí je naznačeno na obrázku 7, kde je znázorněn AD převodník připojený k počítači a oddělením pomocí optočlenu. Kvůli přesnosti měření je lepší oddělovat digitální signál, protože optočlen vnese do signálu určité zkreslení. Toto zkreslení u analogového signálu může negativně ovlivnit přesnost měření, u digitálního signálu však nevádí.

**Optočlen pro analogové signály** obsahuje většinou svítivou diodu (LED) a fotodiodu.

(Pro dosažení lepší linearity bývá prakticky zapojení složitější. Fotodiody bývají v optočlenu dvě. Na vstupní straně je zesilovač se zpětnou vazbou, ve které je zapojena druhá fotodioda, to kompenzuje nelinearitu.)

**Optočlen pro digitální signály** obsahuje většinou na vstupní straně LED diodu, na výstupní fototranzistor.

Pokud by bylo připojení digitálních dat paralelní, použilo by se v zapojení tolik optočlenů, kolik je přenášených bitů (např. pro 8bitový převodník 8 optočlenů). Při sériovém přenosu postačí optočlen jeden. Takto bývá řešeno připojení k počítači u digitálních multimetrů s výstupem pro počítač.

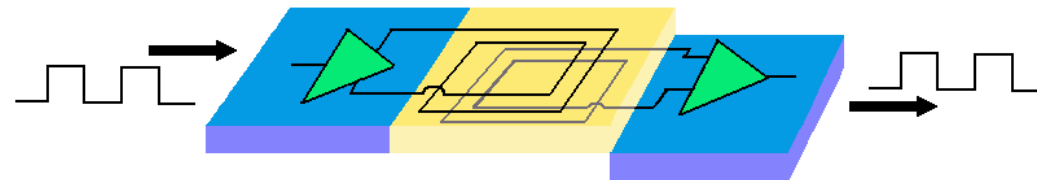
\* Poznámka. Fototranzistor je tranzistor, který není ovládán proudem do báze, ale osvětlením PN přechodu báze-kolektor. Osvícení generuje volné elektrony a tranzistor se otevře.

### Induktivní oddělení signálu pomocí integrovaného induktivního členu

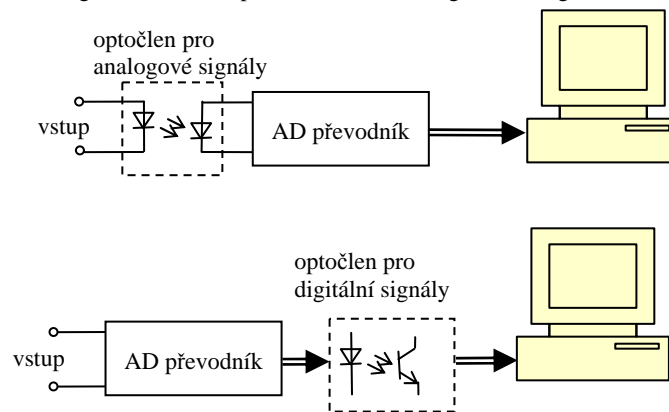
Pro oddělení velmi rychlých digitálních signálů se začaly v posledních letech (psáno v roce 2008) vyrábět integrované obvody, které vypadají podobně jako optočleny, podobně se používají, ale pracují na principu elektromagnetické indukce. Uvnitř čipu je vytvořen stejnou technologií jako zbytek integrovaného obvodu miniaturní oddělovací transformátor (bez feromagnetického jádra). Tyto obvody mohou dosahovat vyšších rychlostí než optočleny, zatím existují pouze pro digitální signály.

Výrobce (zatím pouze jediná firma Analog Devices) označuje tyto součástky jako „icoupler“ (podobně jako optočlen se řekne anglicky optocoupler).

Principiální náčrtek je na obrázku 8.



Obr. 8. Principiální náčrtek icoupleru pro galvanické oddělení digitálního signálu



Obr. 7. Galvanické oddělení optočlenem u analogového a digitálního signálu