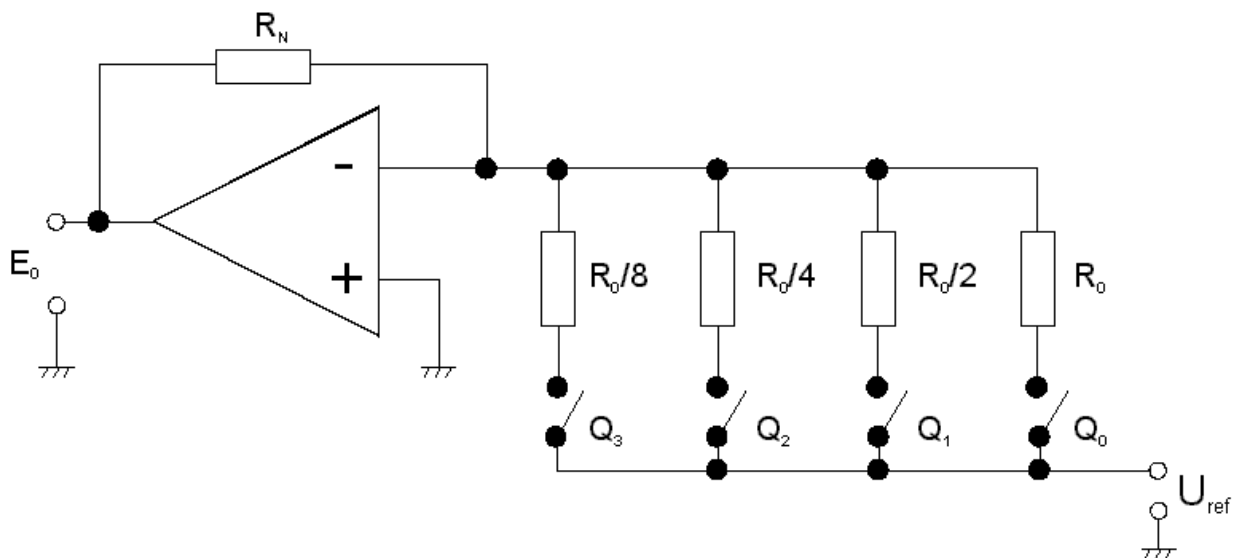


## 17 Převodníky analogových a číslicových signálů

Převodníky umožňující transformaci číslicově vyjádřené informace na analogové napětí a naopak zaujímají v řídicím systému klíčové postavení. Značná část měřených veličin bývá obvykle zaznamenána ve formě časově spojitého průběhu analogového napětí a do číslicové formy se musí převést pomocí převodníku. Převodníky tedy umožňují propojení mezi analogovou a číslicovou částí řídicího systému. Přesnost a rychlost převodu použitých převodníků je jedním z hlavních faktorů určujících použitelnost a kvalitu celého řídicího systému.

### Číslicově analogový převodník

Číslicově analogové převodníky neboli převodníky číslo-napětí (zkráceně převodník Č/N nebo D/A) zabezpečují transformaci informace vyjádřenou v číslicové formě na analogové napětí. U D/A převodníku využíváme vlastnosti operačního zesilovače u kterého je zesílení prakticky určeno zpětnou vazbou. Principiální zapojení čtyřbitového převodníku je na obr.17.1



Obr. 17.1

Výstupní napětí převodníku z obr. 8.1. je:

$$E_o = -R_{ref} \frac{R_N}{R_o} (8Q_3 + 4Q_2 + 2Q_1 + Q_0) = -U_{ref} \frac{R_N}{R_o} \sum_{n=0}^3 2^n Q_n$$

$$Q_i \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

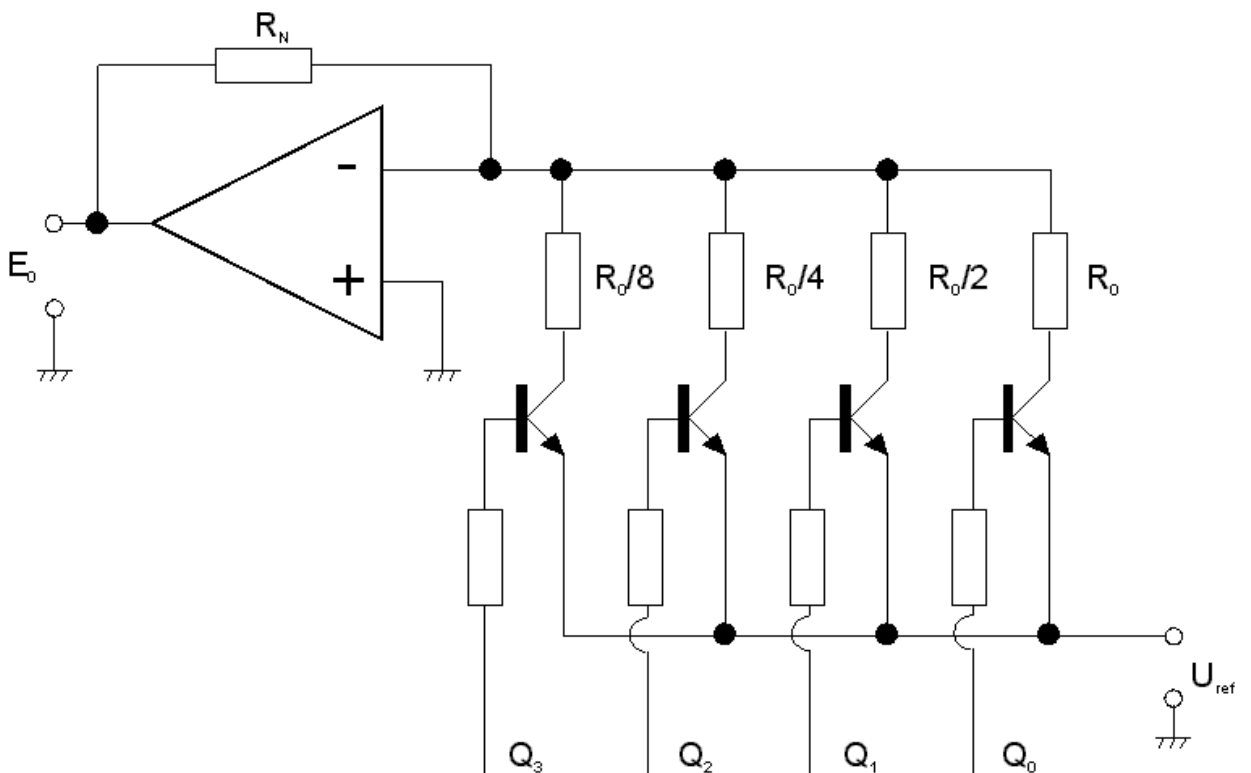
Jestliže chceme vícebitový převodník, musíme zapojit další systém s odporem  $R/16$ ,  $R/32$ , atd.

Požadavky na přesnost odporů v síti převodníku se zvyšují se zvyšujícím se počtem bitů vstupního čísla. Aby změna výstupního napětí způsobená změnou nejméně významného bitu (LSB) nebyla menší než chyba převodu způsobená chybou velikosti odporu u bitu s vahou  $n$  platí pro maximální odchylku odporu  $\Delta R_n$  vztah:

$$\Delta R_n / R_n = 1 / 2^n$$

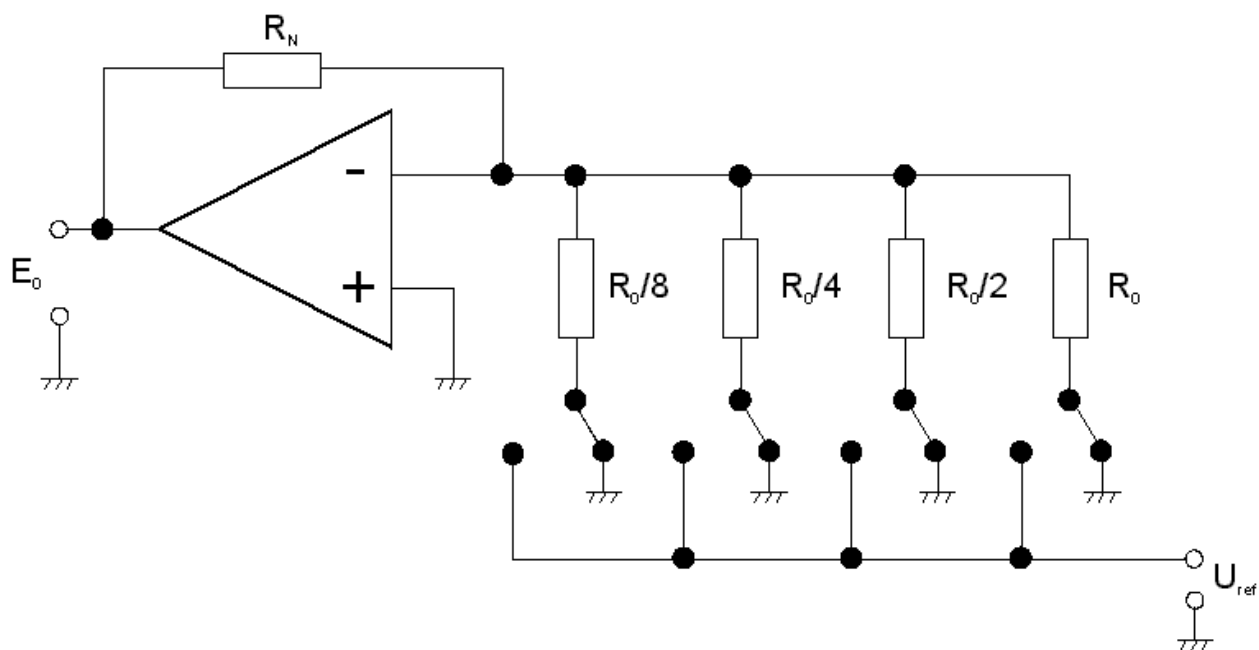
kde  $R_n$  je velikost odporu u bitu s vahou  $n$ . Takže pro  $n = 4$  je povolena tolerance odporu 6% zatímco pro  $n = 10$  je maximální dovolená tolerance odporu 0.1%.

Jako spínačů se používá obvykle tranzistorů v inverzním zapojení tak, aby chyba způsobená saturačním napětím byla co nejmenší. U inverzního zapojení je saturační napětí řádu mV takže při referenčním napětí  $U_{ref} = 10 \text{ V}$  je chyba způsobená saturačním napětím řádu jednotky promile. Příklad zapojení je na obr. 17.2



Obr. 17.2

Zapojení uvedené na obr. 17.1 a 17.2 mají nevýhodu v tom, že odpor sítě se mění v závislosti na vstupním čísle ( $Q_3, Q_2, Q_1, Q_0$ ). U reálného operačního zesilovače tak může vzniknout chyba ve výstupním napětí způsobená změnou vstupního proudu. Aby odpor sítě byl nezávislý na vstupním čísle, je zapojení modifikováno podle obr. 17.3.



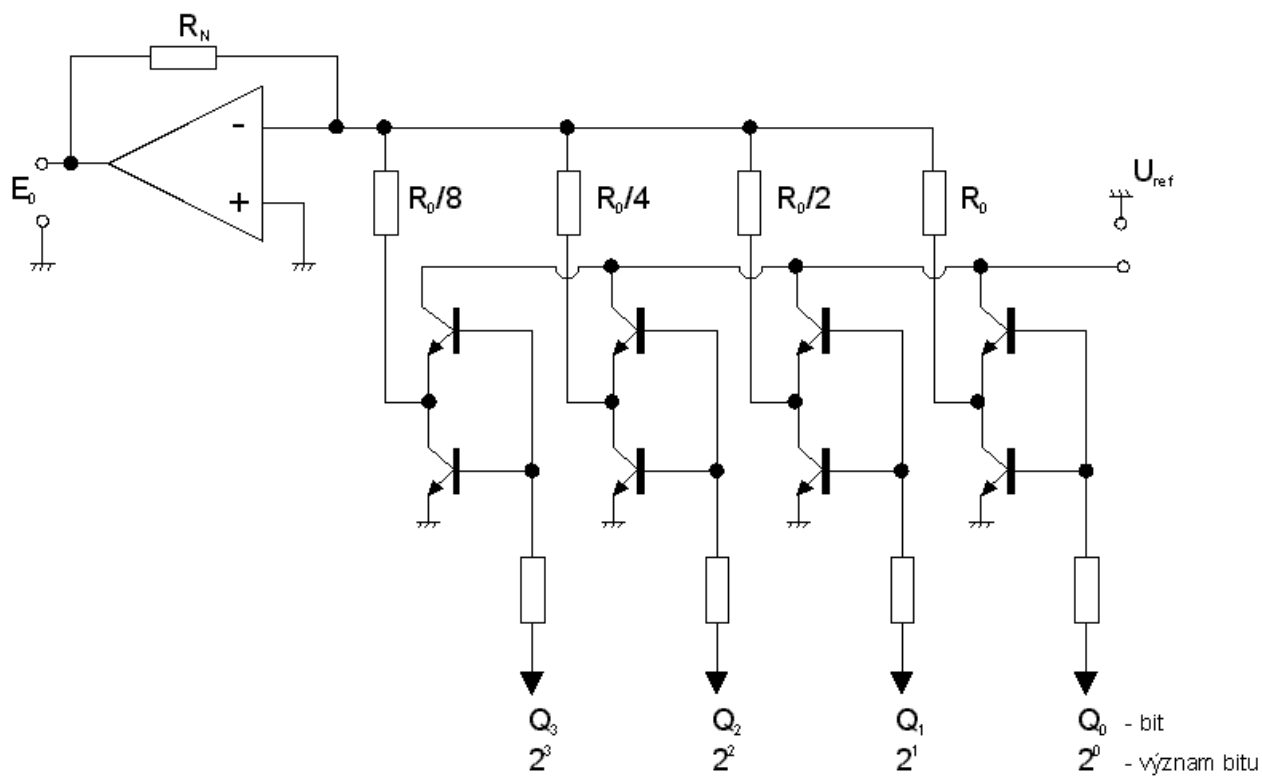
Obr. 17.3

V zapojení na obr. 17.3 jsou jednotlivé větve sítě připojeny buď na zem nebo na zdroj napětí  $U_{\text{ref}}$ . Pak za předpokladu, že vnitřní odpor zdroje  $U_{\text{ref}}$   $R_g$  je zanedbatelný je odpor sítě  $R_i$ .

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_0} + \frac{2}{R_0} + \frac{4}{R_0} + \frac{8}{R_0} = \frac{15}{R_0}$$

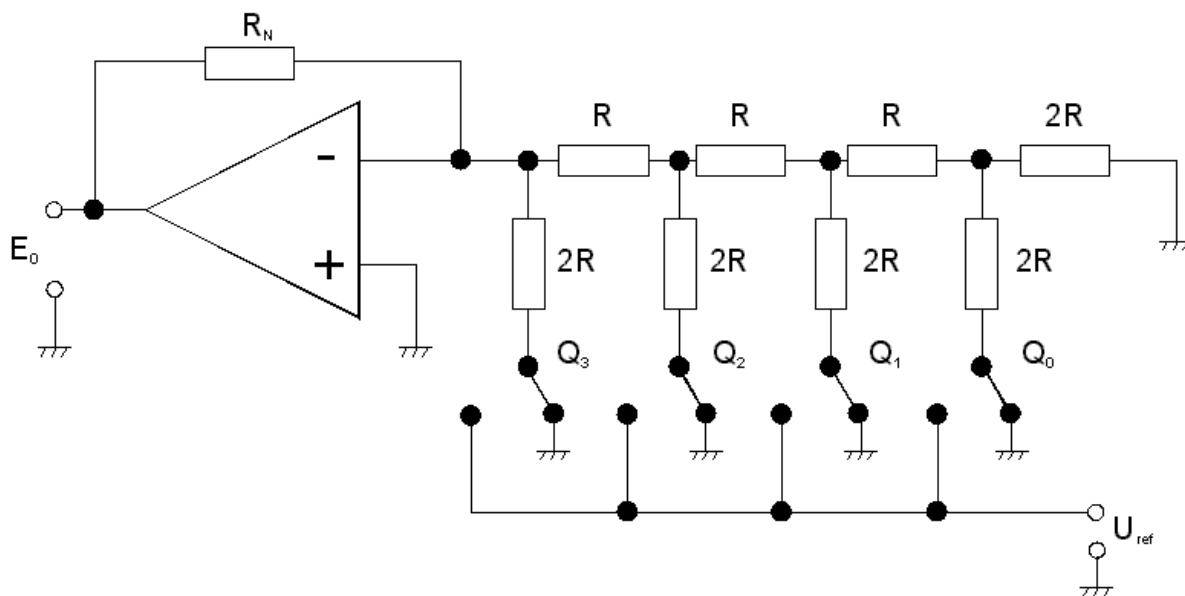
$$a \quad R_i = \frac{R_0}{15}$$

Zapojení používající komplementárních tranzistorů jako spínačů je uvedeno na obr.17.4.



Obr. 17.4

U dosud uvedených zapojení ke každému bitu s různou vahou přísluší jiná velikost odporů v síti. Tato skutečnost je na závadu zejména pro převodníky vyrobené v integrované monolitické formě. Z tohoto důvodu bylo vyvinuto zapojení využívající odporu jedné velikosti. Principiální zapojení je na obr. 17.5.



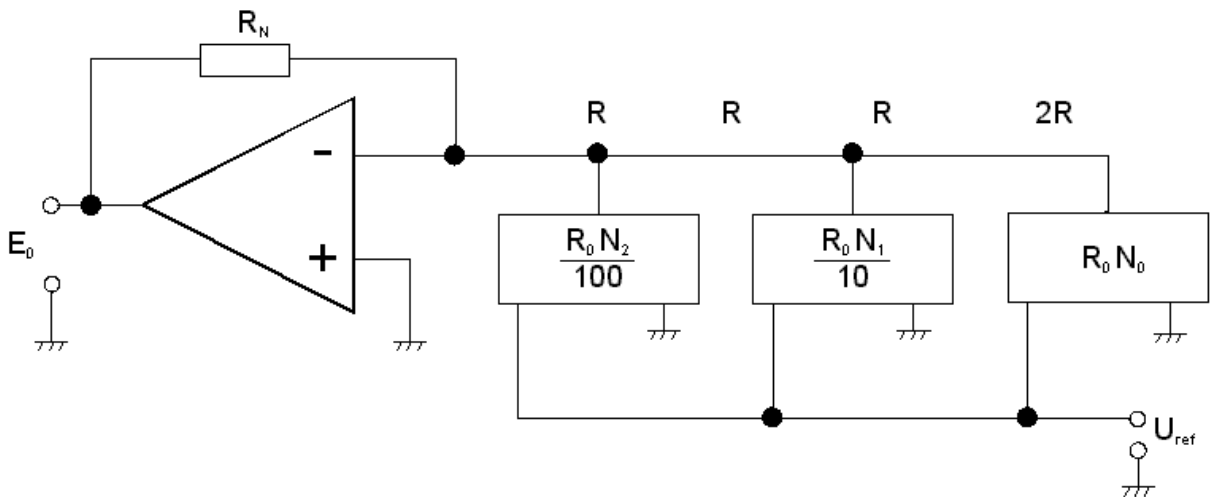
Obr. 17.5

Pro výstupní napětí platí vztah

$$E_o = - \frac{U_{ref}}{2R} \left( Q_3 + \frac{1}{2}Q_2 + \frac{1}{4}Q_1 + \frac{1}{8}Q_0 \right)$$

Převodník D/A z B C D kódu na analogový signál je možno provést tak, že v základním zapojení z obr. 17.1 volíme v jednotlivých blocích převodu dekadických čísel (4 bity)

základní odpory v poměru  $R_o, \frac{R_o}{10}, \frac{R_o}{100}$  atd; principiální zapojení je na obr. 8.6.



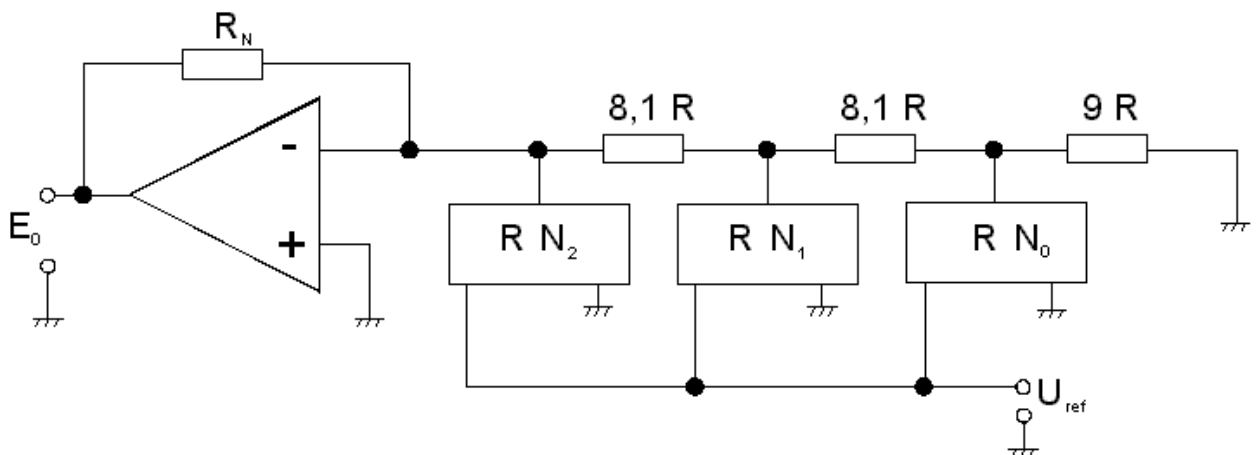
Obr. 17.6

Pro výstupní napětí platí vztah:

$$E_o = - \frac{U_{ref} R_N}{R_o} \left( N_2 + \frac{1}{10} N_1 + \frac{1}{100} N_0 \right) \quad (17.1)$$

kde  $N_2, N_1, N_0$  je číslo v B C D kódu.

Abychom odstranili opět nevýhodu spočívající v tom, že každý obvod má jinou hodnotu základního odporu, můžeme použít následující zapojení, kde každý obvod má stejný základní odpor  $R$ . V tomto případě je použit pro každou číslici čtyřbitový blok z obr. 17.5 a bloky jsou zapojeny do sítě podle obr. 17.7.



Obr. 17.7

Napětí na výstupu je pak:

$$E_o = -\frac{U_{ref} R_N}{16R} \left( N_2 + \frac{N_1}{10} + \frac{N_o}{100} \right)$$

kde  $N_2, N_1, N_0$  je číslo v B C D kódu.

### **Analogově-číslicové převodník**

Převodníky analogového signálu v číslicový (zkráceně převodník N/ Č nebo A/D jsou povětšinou založeny buď na principu transformace napětí na jinou fyzikální veličinu (většinou čas), která se snadněji digitalizuje nebo na komparačním principu, tj. srovnáváním převáděného analogového napětí s proměnným napětím vytvářeným např. pomocí převodníku D/A. V okamžiku, kdy rozdíl mezi srovnávanými napětími je menší než určitá mez, se převod zastaví a zobrazí se vstupní číslo D/A převodníku.

### **Převodník využívající dvojnásobné analogové integrace**

Tento převodník je typickým představitelem převodníku kde se analogový signál transformuje na časový interval, který se digitalizuje. Základním obvodem je analogový integrátor (obr. 17.8). Ke vstupu integrátoru se nejprve na přesně stanovený časový interval  $t_1$  přivede analogový signál  $U_x > 0$ . Poté se na vstup integrátoru připojí referenční napětí  $U_{ref}$  opačného znaménka než  $U_x$ . Komparátor určuje okamžik, kdy výstupní napětí integrátoru je rovno nule. Časový interval mezi okamžikem připojení napětí  $U_{ref}$  na vstup integrátoru a překlopení komparátoru označíme  $t_3$ . Časové intervaly  $t_1$  a  $t_3$  měříme jako násobky přesného hodinového intervalu  $t_2$ .

Vyjádříme-li časový interval  $t_1$  pomocí hodinového intervalu

$$\tau = m\tau_2,$$

je napětí na výstupu integrátoru na konci intervalu  $t_1$  rovno:

$$E_{o1} = -\frac{\tau_1}{RC} U_x = -\frac{m\tau_2}{RC} U_x$$

Po připojení  $U_{ref}$  na vstup integrátoru napětí na výstupu se zmenšuje podle vztahu

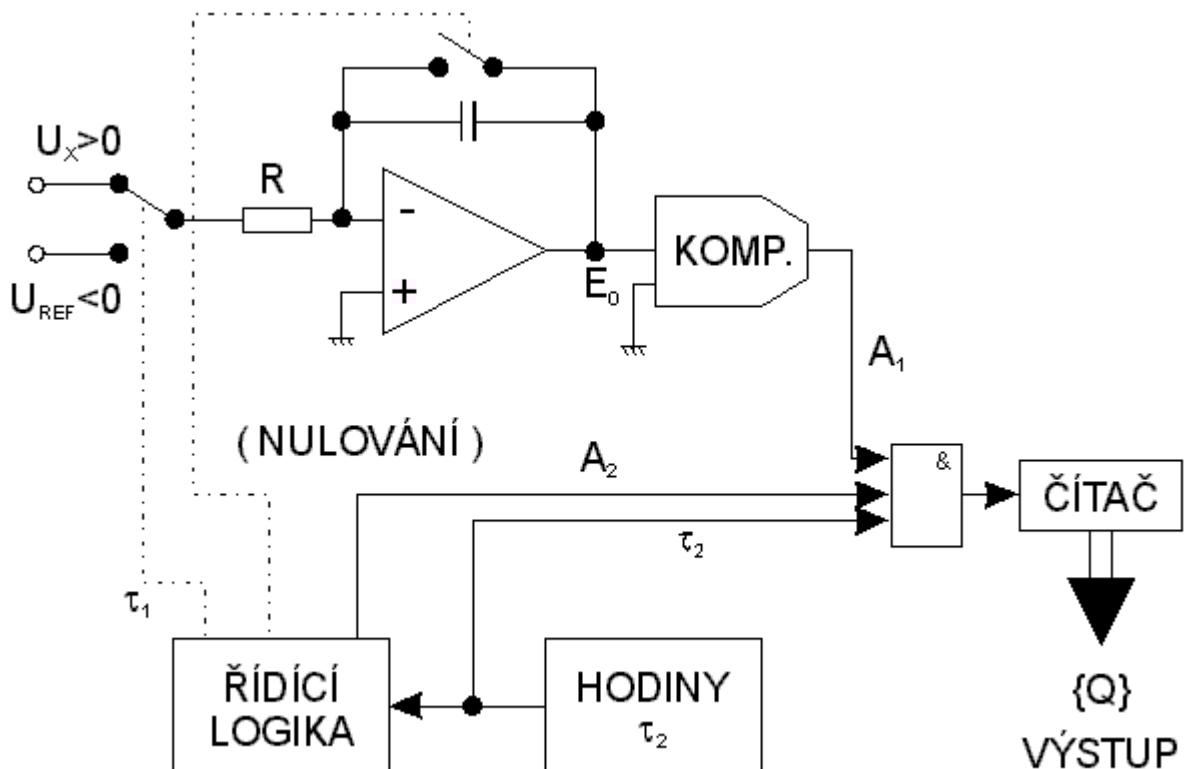
$$E_o = -\frac{m\tau_2}{RC} U_x + \frac{U_{ref}}{RC} t$$

kde jsme použili vztahu (17.1),  $t$  je čas počítaný od okamžiku připojení  $U_{ref}$  na vstup integrátoru.

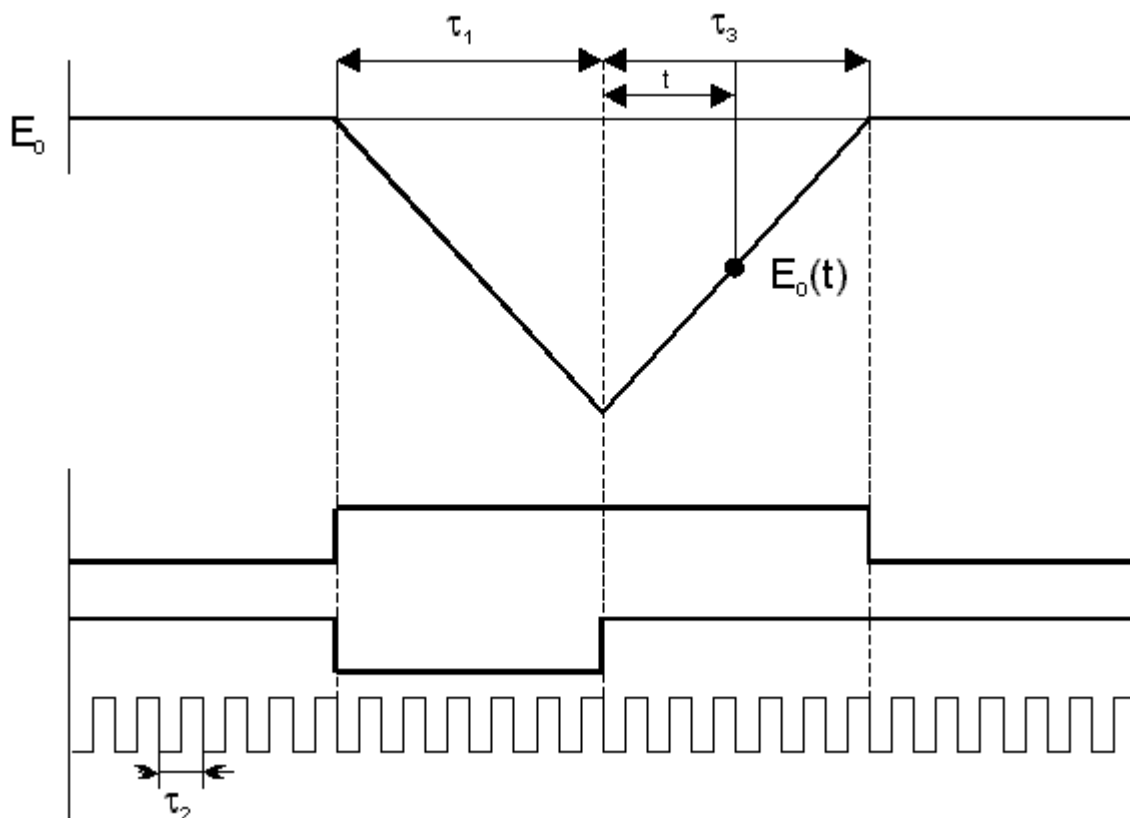
Je-li  $t = \tau_3$  je  $E_o = 0$  a

$$\tau_3 = m \tau_2 \frac{U_x}{U_{ref}} \quad (17.2)$$

Vztah (17.2) ukazuje, že časový interval  $\tau_3$  je úměrný převáděnému analogovému signálu  $U_x$ . Časový interval  $\tau_3$  snadno vyjádříme v číslicové formě pomocí hodinových impulsů a čítače. Přívod hodinových impulsů na vstup čítače blokujeme pomocí řídicích signálů  $A_1$  a  $A_2$ , které nám vymezují časový interval  $\tau_3$ . Signál  $A_1$  je generován komparátorem a nabývá pro  $E_0 < 0$  hodnoty log 1. Pro  $E_0 = 0$  se signál  $A_1$  změní z log 1 na log 0. Řídicí signál  $A_2$  je generován obvodem řídicí logiky. Na začátku převodu má signál  $A_2$  hodnotu log 0. V okamžiku připojení  $U_{ref}$  na vstup integrátoru nabude hodnoty log 1. Číselný údaj čítače je tedy podle vztahu (8.2) úměrný převáděnému napětí  $U_x$ . Průběh napětí  $E_0$  a řídicích signálů  $A_1$  a  $A_2$  je uveden na obr. 8.9. Výhodou uvedeného zapojení je, že v konstantě úměrnosti ve vztahu (8.2) není časová konstanta integrátoru  $\tau_1 = RC$ . Tato časová konstanta se může s časem, teplotou i jinými vlivy měnit, což by ovlivňovalo přesnost převodu. Obvykle se uvádí výstupní hodnota převodníku v B C D kódu. Dosahuje se přesnosti 4 1/2 až 5 1/2 platných číslic (jedna polovina znamená, že nejvíce významná číslice může nabýt hodnoty pouze 1 nebo 0). Převodníky s dvojnásobnou integrací jsou jedny z nejpřesnějších, jejich nevýhodou je však relativně dlouhá doba převodu řádu 100 msec.



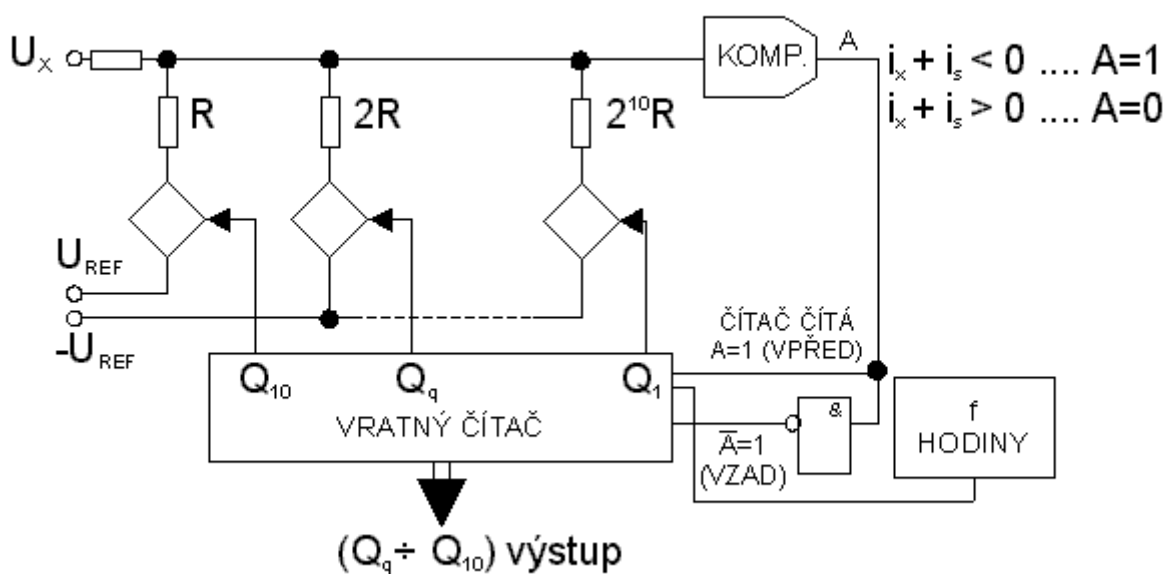
Obr.17.8



Obr.17.9

### Převodník komparačního typu

Jako první příklad převodníku komparačního typu si uvedeme převodník, který s určitou rychlostí sleduje změny vstupního analogového napětí, které se má převádět. Principiální zapojení je na obr. 17.10.



Obr. 17.10



Převáděné napětí  $U_x$  je přivedeno na komparátor, kde se srovnává s výstupním napětím převodníku D/A. Převodník D/A je řízen vratným čítačem jehož směr čítání je řízen komparátorem. Čítač čítá hodinové impulsy vpřed v případě, že pro proud  $i_x = (U_x/R)$  a pro proud ze sítě převodníku D/A  $i_s$  platí vztah

$$i_x + i_s > 0$$

v opačném případě

$$i_x + i_s < 0$$

čítač čítá vzad.

Bit s nejvyšší vahou u převodníku D/A má význam znaménkového bitu. Je připojen na kladné referenční napětí ( $+U_{ref}$ ). Ostatní bity jsou připojeny na záporné referenční napětí. Proud ze sítě převodníku D/A pak můžeme vyjádřit vztahem:

$$i_s = Q_z \left( \frac{U_{ref}}{R} \right) - \sum_{n=0}^{r-1} Q_n \frac{U_{ref}}{2^{j-n} R}$$

Kde  $Q_z$  je znaménkový bit s nejvyšší vahou,  $Q_n$  ostatní bity,  $j$  počet bitů převodníku včetně znaménkového,  $n$  váha jednotlivých bitů. Převodník vyjadřuje převáděné napětí číslem ve dvojkovém kódu, které je násobkem napětí o velikosti ( $U_{ref}/2^j$ ). Záporné napětí je vyjádřeno doplňkem do dvou. V případě, že se napětí na vstupu převodníku mění, je probíraný převodník schopen s určitým zpožděním sledovat změny vstupního napětí. Dá se dokázat, že převodník je schopen sledovat časovou rychlost  $v_n = (\Delta U / \Delta t)$  změny vstupního napětí  $\Delta U$ :

$$v_n = f \left( \frac{U_{ref}}{2^j} \right)$$

kde  $f$  je frekvence hodinových impulsů.

Pro frekvenci  $f = 1$  MHz a desetibitový převodník je při  $U_{ref} = 10$  V  $v_n \approx (10 \text{ mV}/1 \mu \text{ sec})$ . To znamená, že převodník je schopen sledovat vstupní napětí, jehož maximální časová změna nepřesáhne 10 mV za 1  $\mu$  sec.

V případě, že výstup převodníku požadujeme v BCD kódu (např. pro optickou indikaci) je nutné aby převodník D/A byl převodníkem z BCD kódu.

Jako další příklad komparačního převodníku si uvedeme paralelní převodník. Jeho základem je  $2^j - 1$  komparátorů. Na jedny vstupy komparátorů přivádíme převáděné napětí  $U_x$ . Na druhé vstupy přivádíme násobky napětí  $U_{ref}$  tak, že rozdělíme  $U_{ref}$  na  $2^j$  diskretních hladin o stálém napětovém rozdílu mezi hladinami  $\Delta U = (U_{ref}/2^j)$ . Jestliže napětíovou úroveň první nenulové hladiny posuneme na  $\Delta U/2$  pak výstup prvního komparátoru se změní z log 0 na log 1 v případě, že  $U_x > \Delta U/2$ . Výstup druhého komparátoru se změní pro  $U_x > (3 \Delta U/2)$  atd. Výstupy

komparátorů vedeme na dekodér pomocí něhož každému napěťovému intervalu mezi dvěma hladinami přiřadíme binární číslo. Napětí  $U_x$  můžeme pak vyjádřit tímto číslem:

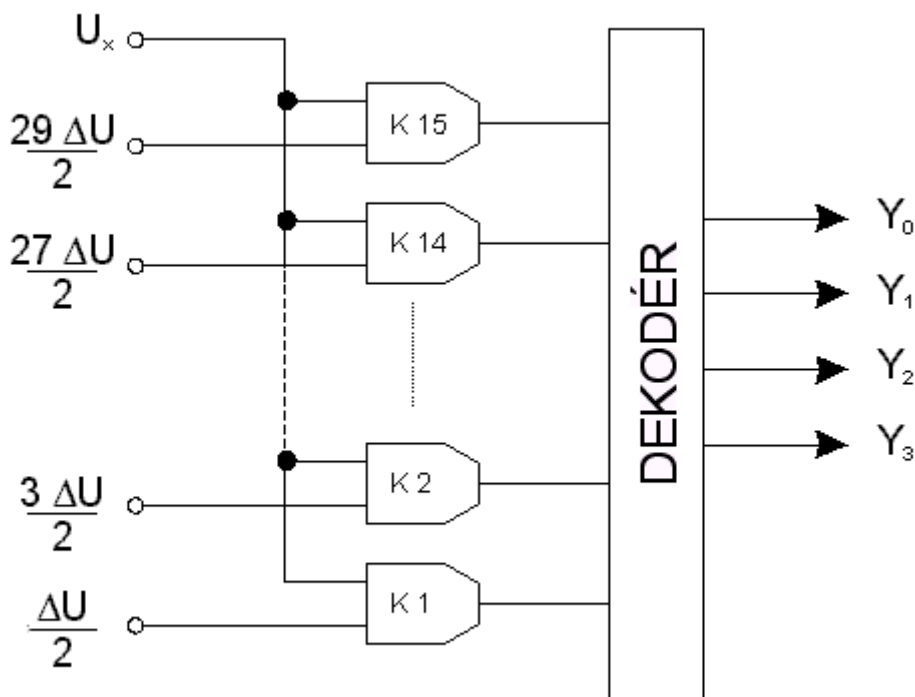
Napěťovému intervalu:

$$\frac{\Delta U}{2} < U_x < \frac{3}{2} \Delta U$$

přiřadíme pro  $j = 8$  číslo

0000 0001

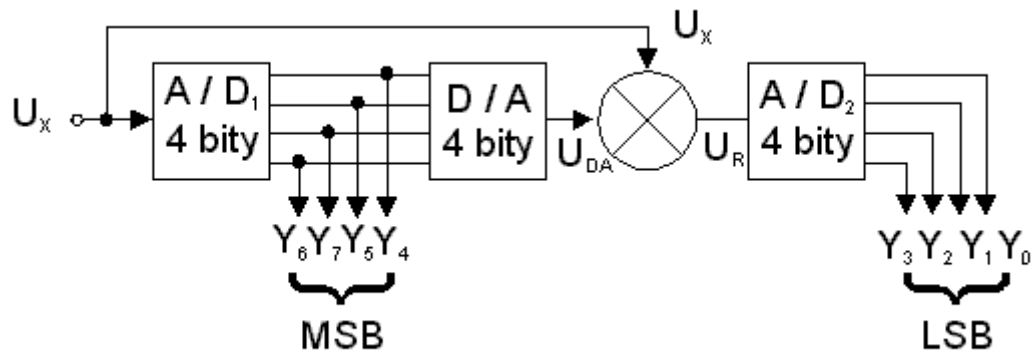
Digitalizace převáděného napětí pak vnáší do převodu chybu ( $\Delta U/2$ ), což v případě, že  $j = 8$  je menší než 0.2% maximální hodnoty. Přesnost osmibitového paralelního převodníku odpovídá tedy běžné chybě analogových voltmetrů. Počet komparátorů je však pro osmibitový převodník 255, což je neúnosně mnoho. Za rozumnou hranici je možno považovat 4 bitový paralelní převodník. Jeho principiální zapojení je na obr. 17.11. Pro vícebitové převodníky je možno použít seriově-paralelní převodník.



Obr.17.11

Principiální zapojení pro  $j = 8$  je na obr. 17.12. Převáděné napětí  $U_x$  je nejprve přivedeno na první čtyřbitový převodník pomocí něhož získáme první čtyři bity (MSB). Tyto čtyři bity vedeme na D/A čtyřbitový převodník pomocí něhož dostaneme napětí  $U_{DA}$ . Napětí  $U_R = U_x - U_{DA}$  je opět digitalizováno dalším čtyřbitovým převodníkem, čímž získáme další čtyři bity (LSB). Jinými slovy, prvním A/D převodníkem rozdělíme referenční napětí na 16 diskretních napěťových intervalů, které dalším A/D převodníkem rozdělíme do dalších 16 napěťových

intervalů. Počet komparátorů v A/D převodnících tedy klesne pro  $j = 8$  z 255 na 30. Tato úspora se ovšem dosáhne za cenu prodloužení časového intervalu převodu. Přesto jsou seriově-paralelní A/D převodníky rychlé a např. u 8bitových převodníků může doba potřebná k převodu dosáhnout hodnoty řádově stovky nsec.



Obr. 17.12