

## 7. Digitális-analóg (D/A) és analóg-digitális (A/D) átalakítók

A digitális rendszerekben sokszor előfordul, hogy analóg jelet kell feldolgozni, vagy átalakítani. Ha egy folytonos analóg jelet digitálisan kell feldolgozni, akkor az analóg bemeneti jelet megfelelő bináris számokká kell alakítani. A feladatot analóg-digitális átalakítóval (A/D átalakító, A/D konverter, **ADC**) lehet megoldani. A digitális értékek visszaalakítása ezzel arányos feszültséggé vagy árammá digitális-analóg átalakítóval (D/A átalakító, D/A konverter, **DAC**) lehetséges.

Az átalakítók működésének a bemutatására a következő fogalmakat szükséges definiálni:

- **kvantálás:** – egy analóg mennyiség érték-változási tartományának felosztása meghatározott számú egységre (*kvantumra*);
- **MSB:** – a legnagyobb helyértékű bit (angolul: **Most Significant Bit**) az a bit, amely a legnagyobb súlyozású a bináris számok felírása során;
- **LSB:** – a legkisebb helyértékű bit (angolul: **Last Significant Bit**) az a bit, amely a legkisebb súlyozású a bináris számok felírása során.

Egy  $n$ -jegyű binárisan kódolt,  $D$  digitális jelet  $n$  darab  $D_1, \dots, D_n$  együtthatókkal az alábbi összefüggés írja le:

$$D = D_1 \cdot 2^{-1} + D_2 \cdot 2^{-2} + \dots + D_k \cdot 2^{-k} + \dots + D_{n-1} \cdot 2^{-(n-1)} + D_n \cdot 2^{-n}$$

A legkisebb helyértékű hely  $2^{-n} = \frac{1}{2^n}$  és az ennek megfelelő *legkisebb helyértékű bit*

(*LSB*)  $D_n$ . A legnagyobb helyértékű hely  $2^{-1} = \frac{1}{2}$  és az ennek megfelelő *legnagyobb helyértékű bit* (*MSB*)  $D_1$ .

A  $D_{\max}$  érték akkor lép fel, ha az  $n$  hely összes  $D_k$  együtthatója **1** értékű:

$$D_{\max} = 2^{-1} + 2^{-2} + \dots + 2^{-n} = 1 - 2^{-n} \approx 1$$

### 7.1. Digitális-analóg (D/A) átalakítók

#### 7.1.1. Digitális-analóg átalakítók alapelvei

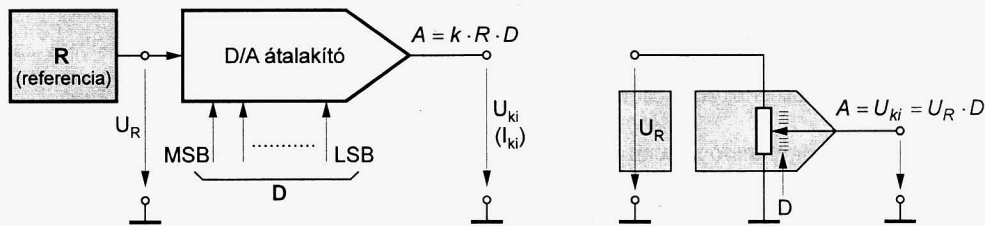
A *digitális-analóg átalakítók* (angolul: **DAC** – Digital to Analog Converter) feladata, hogy a bemenetére érkező „ $D$ ” számadatnak megfelelő „ $A$ ” analóg jelet (általában áramot vagy feszültséget) állítson elő a kimenetén (7.1.a ábra).

Egy ideális digitális-analóg átalakító esetén felírhatjuk, hogy:

$$U_{ki} = n \cdot \Delta U = n \cdot U_{LSB} \quad \text{vagy} \quad I_{ki} = n \cdot \Delta I = n \cdot I_{LSB},$$

feszültségkimenet, illetve áramkimenet esetén. Az  $n$  változó a bemenetre adott számot képviseli,  $\Delta U$  illetve  $\Delta I$  pedig egy bemenetre adott egységnek megfelelő feszültség- illetve áram-lépcsőket (pl.  $n = 1$  esetén  $U_{ki} = \Delta U$ ) jelenti.

A működéshez szükséges egy  $U_R$  referenciafeszültség (általában egy nagyon pontos feszültségforrás), amelyből a kimeneti feszültséget származtatjuk és ez határozza meg a kimeneti feszültség maximális értékét (*végkitérését*) is (angolul: *Full Scale – F.S.*).



a) tömbvázlat

7.1 ábra. D/A átalakító

b) elvi működés

Az áramkör működése – feszültségkimenetet feltételezve – hasonlít egy potenciométeres feszültségosztó működéséhez, amelynek a leszedő-érintkezőjének a helyzetét digitális vezérléssel határozzuk meg (7.1.b ábra).

A digitális vezérléstechnikában az adatok többnyire bináris alakban állnak rendelkezésre, valamilyen meghatározott kódban kifejezve. Ezt a kódot a D/A átalakítónak ismernie kell. A D/A átalakítók csak meghatározott bináris kód szerinti jeleket képesek analóg jellé átalakítani. Bizonyos bináris kódok nem alkalmasak digitális-analóg átalakításra. Ezek az érték nélküli kódok. *Érték nélkülinek* nevezzük azt a kódot, amelynek elemeihez nincsenek adott számértékek hozzárendelve. A bináris- vagy a BCD-kód pl. *értékkel rendelkező kódok* (minden helyértékhez a kettőnek valamilyen hatványa van hozzárendelve). A Gray-kód ezzel szemben érték nélküli kód, elemeihez nincs konkrét számérték hozzárendelve. Az érték nélküli kódokat a digitális-analóg átalakítás előtt értékkel rendelkező kóddá kell alakítani, amely megfelelő kódátalakítókkal nehézség nélkül megoldható.

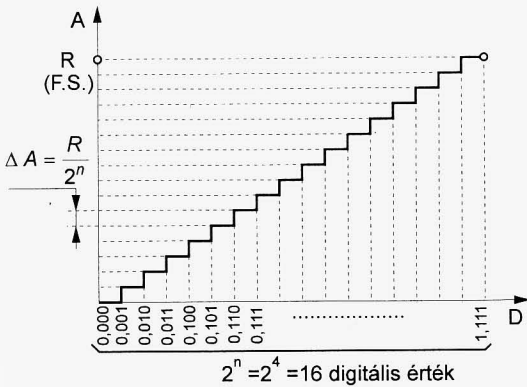
Az ideális D/A átalakítók kimeneti jele egyenesen arányos a bemenetükre digitálisan adott szám értékével. Vagyis a 7.2. ábrán látható módon a  $D$  digitális érték és a kimeneti  $A$  analóg jel között egyenes arányosság áll fenn ( $D < 1$ ). Egy  $n$ -bites digitális érték maximum:

$$N = 2^n$$

analóg jelértéket eredményez. A legkisebb, elemi lépcső az analóg jelben:

$$\Delta A = \frac{R}{2^n}, \quad (\text{feszültségkimenet esetén } \Delta A = \frac{U_R}{2^n} = U_{LSB}).$$

Megfigyelhető, hogy egy analóg jel annál pontosabban állítható elő, minél kisebb egy elemi lépcső. Az elemi lépcső méretét az átalakító *bitszáma* („*felbontása*”) határozza meg.



7.2 ábra. A D/A átalakítás elve

Az átalakítók felbontásának a növelése az áramköri megvalósítást nehezíti, drágítja. A kis pontosság-igény esetén általánosan használt digitális-analóg átalakítók felbontása **8 bit** (256 elemi lépcső), nagyobb pontosságot biztosítanak a **10, 12, 14 bites** (1024, 4096, 65536 elemi lépcsővel) átalakítók, a **16, 18, 20 bites** átalakítók főleg nagy pontosságú rendszerekben alkalmazzák).

A D/A átalakítók egy digitális jelet (számot) vele arányos feszültséggé alakítanak. A D/A átalakítók az átalakítás elve szerint lehetnek:

- ◆ **közvetlen elvű átalakítók:** amelyek vezérelt feszültség- vagy áramosztás, illetve erősítés útján állítják elő az analóg jelet a bemeneti digitális jeltől;
- ◆ **közvetett elvű átalakítók:** amelyek az analóg jel előállításának folyamatába egyéb mennyiségeket (pl. impulzus-időt, idő-arányt, frekvenciát) iktatnak be.

Attól függően, hogy a digitális jel bitjei időben mikor fejtik ki hatásukat az átalakítás során megkülönböztetünk:

- ◆ **párhuzamos működésű átalakítókat:** amelyekben a digitális jel bitjei egyidőben fejtik ki hatásukat (az átalakító bitszámával egyező ismétlődő hálózatrész található bennük);
- ◆ **soros működésű átalakítókat:** amelyek egymást követő ismétlődő ciklusokban, bitenként alakítják át a digitális jelet analóggá.

### 7.1.2. Közvetlen D/A átalakító, összegző erősítővel

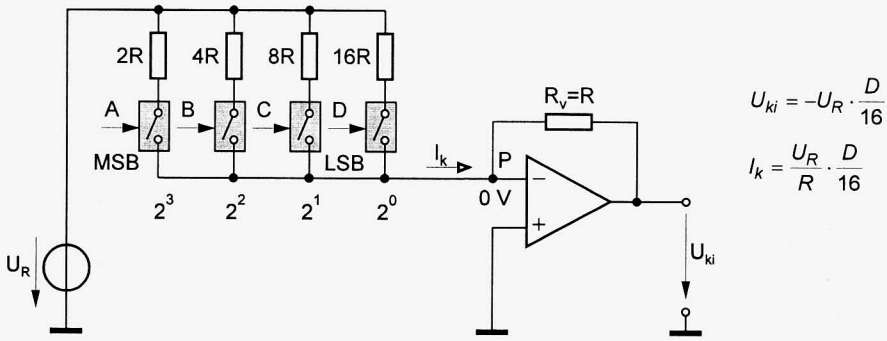
A 7.5. ábrán látható műveleti erősítő összegző kapcsolás, bináris számok velük arányos feszültséggé való átalakítását végzi (az egyszerűség kedvéért 4 bites digitális kódot szemléltetünk). Az ellenállások értékeit úgy határozzuk meg, hogy zárt kapcsolóállásnál olyan áram folyjon rajtuk keresztül, amely megfelel az adott helyérték súlyának. A kapcsolókat akkor zárjuk, ha az adott helyértéken logikai **1** van. A műveleti erősítő  $R_v$  visszacsatoló ellenállásán létrejövő negatív visszacsatolás miatt a **P** összegzőponton mindig 0 V feszültség van. A részáramok tehát nem befolyásolják egymást.

Ha a legkisebb helyértékű bitnek (**LSB** – **Last Significant Bit**) megfelelő kapcsoló zárva van (a bináris érték: **0001**), akkor a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = U_{LSB} = -U_R \cdot \frac{R_v}{16 \cdot R} = -\frac{1}{16} \cdot U_R.$$

Ha a legnagyobb helyértékű bitnek (**MSB** – **Most Significant Bit**) megfelelő kapcsoló zárva van (a bináris érték: **1111**), akkor a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = U_{ki \max} = -U_R \cdot \frac{15 \cdot R_v}{16 \cdot R} = -\frac{15}{16} \cdot U_R.$$



7.5. ábra. Összegző erősítővel működő 4 bites D/A átalakító

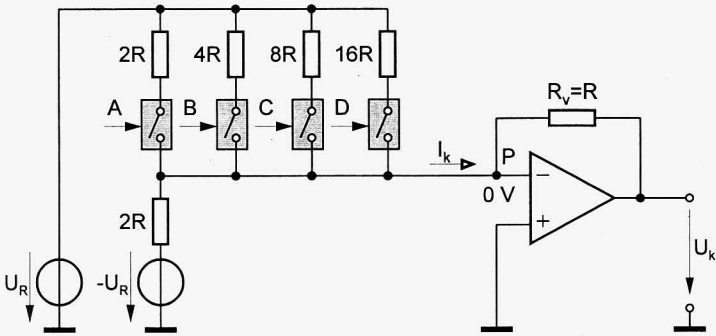
Általános esetben:  $U_{ki} = D \cdot U_{LSB} = -U_R \cdot \frac{D}{D_{max} + 1}$ .

Az átalakító működését a 7.1. táblázat foglalja össze.

A	B	C	D	$U_{ki}$
$2^{-1}$	$2^{-2}$	$2^{-3}$	$2^{-4}$	<i>számpélda</i> $U_R = -16V$
0	0	0	0	$0 = 0 \cdot U_{LSB} = 0V$
0	0	0	1	$-\left(\frac{1}{16} \cdot U_R\right) = 1 \cdot U_{LSB} = 1V$
0	0	1	0	$-\left(\frac{1}{8} \cdot U_R\right) = 2 \cdot U_{LSB} = 2V$
0	0	1	1	$-\left(\frac{1}{8} \cdot U_R + \frac{1}{16} \cdot U_R\right) = 3 \cdot U_{LSB} = 3V$
.....				.....
1	1	1	1	$-\left(\frac{1}{2} \cdot U_R + \frac{1}{4} \cdot U_R + \frac{1}{8} \cdot U_R + \frac{1}{16} \cdot U_R\right) = 15 \cdot U_{LSB} = 15V$

7.1. táblázat. A D/A átalakító működése

A 7.5. ábrán látható kapcsolás kismértékű kiegészítésével olyan D/A átalakítót készíthetünk, amelyik pozitív-negatív polaritású feszültséget képes előállítani. A módosított kapcsolás a 7.6. ábrán látható. A műveleti erősítő invertáló bemenetére egy újabb ágat csatlakoztatunk, amely az eredetivel azonos abszolút értékű, de ellenkező irányú referencia feszültségforrást tartalmaz. Eredményképpen olyan átalakítót kapunk, amely nem változtatja meg a feszültséglépcsők nagyságát csak a kezdőpont (a **0000** kódnak megfelelő kimeneti feszültség) tolódik el 8 egységgel (7.2. táblázat). Megfigyelhető, hogy a kimeneten 0V akkor áll elő mikor csak az **A** bitnek (előjel-bit) megfelelő kapcsolót zárjuk (ilyenkor a  $+U_R$  és  $2R$  illetve a  $-U_R$  és  $2R$  ág éppen kiegyenlíti egymást). A kimeneti feszültséglépcsők száma nem változik, továbbra is 16 különböző állapot van (**8** a negatív feszültség-lépcsőknek, **1** a nullának és **7** a pozitív feszültség-lépcsőknek).



7.5. ábra. Pozitív-negatív kimenetű, összegző erősítővel működő 4 bites D/A átalakító

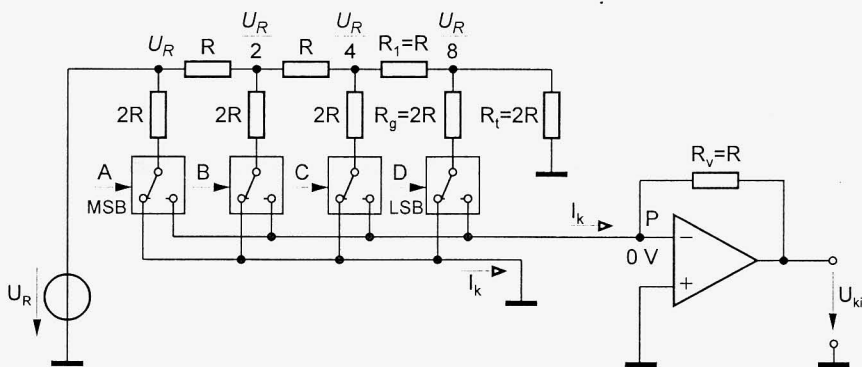
A előjel	B $2^{-1}$	C $2^{-2}$	D $2^{-3}$	$U_{ki}$ számpélda $U_R = -16\text{ V}$
0	0	0	0	$-\frac{1}{2} \cdot U_R = -8 \cdot U_{LSB} = -8\text{ V}$
0	0	0	1	$-\frac{1}{2} \cdot U_R + \frac{1}{16} \cdot U_R = -7 \cdot U_{LSB} = -7\text{ V}$
0	0	1	0	$-\frac{1}{2} \cdot U_R + \frac{2}{16} \cdot U_R = -6 \cdot U_{LSB} = -6\text{ V}$
.....				.....
1	0	0	0	$-\frac{1}{2} \cdot U_R + \frac{1}{2} \cdot U_R = -0 \cdot U_{LSB} = 0\text{ V}$
.....				.....
1	0	0	1	$-\frac{1}{2} \cdot U_R + \frac{9}{16} \cdot U_R = +1 \cdot U_{LSB} = +1\text{ V}$
.....				.....
1	1	1	1	$-\frac{1}{2} \cdot U_R + \frac{15}{16} \cdot U_R = +7 \cdot U_{LSB} = +7\text{ V}$

7.2. táblázat. Pozitív-negatív kimenetű, 4 bites D/A átalakító működése

Az összegző erősítővel működő D/A átalakítók egyik hátránya, hogy nagyon széles értéktartományú ellenállás-sorozat szükséges a felépítéséhez (pl. 10 bit esetén  $R$ -tól  $1024R$ -ig). Ez nagyon megnehezíti a megfelelő pontosságú megvalósítást. Ugyancsak hátrányként említhető, hogy az elektronikus kapcsolókon nagy feszültségváltozások lépnek fel. A nyitott kapcsolón  $U_R$  feszültségkülönbség van, záráskor a feszültségkülönbség 0 lesz. Ezért minden átkapcsolás során át kell tölteni a kapcsoló parazita kapacitásait.

### 7.1.3. Ellenállás-létrahálózatos közvetlen D/A átalakító

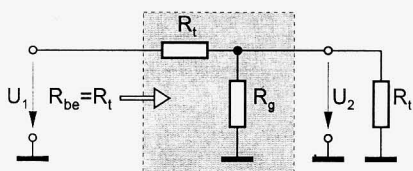
Az integrált D/A átalakítók gyártásánál általában a nagy értékszórású, pontos ellenállások megvalósítása okozza a legnagyobb nehézséget. Ezért a súlyozást a helyértékek szerint gyakran ellenállás-létrahálózattal valósítják meg. Egy 4 bites ellenállás-létrahálózatos D/A átalakító kapcsolását a 7.7. ábra szemlélteti.



7.7. ábra. Ellenállás-létrahálózatos közvetlen D/A átalakító

Egy ilyen létrahálózat alapeleme a 7.8. ábrán látható terhelt feszültségosztó, amely a következő tulajdonságú:

- ha  $R_t$  terhelő-ellenállással terheljük, akkor az  $R_{be}$  bemeneti ellenállásának  $R_t$ -vel egyenlőnek kell lennie;
- az  $\alpha = \frac{U_2}{U_1}$  feszültségátvitelnek ennél a terhelésnél egyenlőnek kell lennie egy előre megadott értékkel.



7.8. ábra. A létrahálózat egy fokozatának felépítése

A méretezési egyenletek az előbbi két feltétel felhasználásával:

$$R_t = \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha} \cdot R_g$$

$$R_t = \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \cdot R_g$$

Bináris kód esetén  $\alpha = 0,5$ . Feltételezve, hogy  $R_g = 2 \cdot R$ , akkor:  $R_t = R$  és  $R_t = 2 \cdot R$  a 7.7. ábrán szemléltetett adatokkal összhangban. A referenciafeszültség-forrást az  $R_{be} = 2 \cdot R \times 2 \cdot R = R$  ellenállás terheli. Az összegző műveleti erősítő kimeneti feszültsége, pedig:

$$U_{ki} = -R_v \cdot I_k = -U_R \cdot \frac{R_v}{16 \cdot R} \cdot (8 \cdot A + 4 \cdot B + 2 \cdot C + D) = -U_R \cdot \frac{R_v}{16 \cdot R} \cdot D$$

A 7.7. ábrán látható digitális-analóg átalakító kapcsolásban a  $2R$  értékű ellenállások két  $R$  értékű ellenállás sorba kapcsolásával helyettesíthetők. Ezért az áramkör nagyon jól gyártható monolit integrált áramkörös technológiával. A szükséges együttfutási pontosság így egyszerűen biztosítható, mivel az ellenállások pontos értéke nem lényeges, csupán a relatív hibát kell minél kisebbre csökkenteni. A pontos kimeneti feszültség biztosítása céljából az  $R_v$  visszacsatoló ellenállást is ugyanazon a monolit chipen kell megvalósítani. Így az A/D átalakító kimeneti feszültségének értéke ( $R_v = R$  helyettesítést alkalmazva):

$$U_{ki} = -U_R \cdot \frac{1}{16} \cdot D.$$

### 7.1.4. Kapcsolt áramgenerátoros közvetlen D/A átalakító

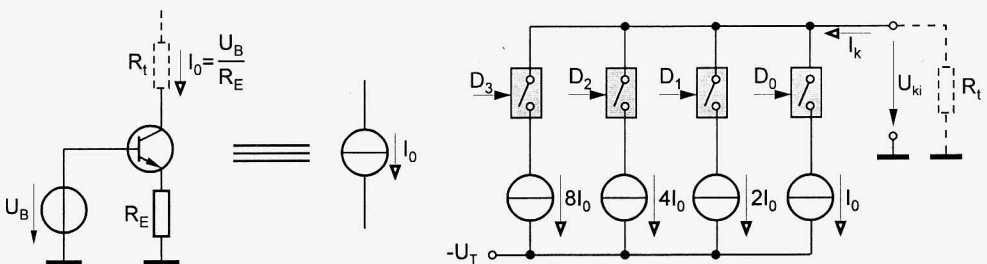
A bipoláris technológiájú digitális-analóg átalakítók egyszerűen áramgenerátorokkal valósíthatók meg, amelyek az eredő kimeneti áram összetevőit alkotják. Ha egy bipoláris tranzisztor bázisára stabil egyenfeszültséget kapcsolunk és emitter-ellenállással látjuk el, akkor a kollektor-terhelésen állandó áram folyik (7.9.a ábra). Ha ilyen áramgenerátorból többet ki-be kapcsolható módon párhuzamosan kötünk, és áramukat 2 hatványai szerinti értékűre állítjuk be, akkor D/A átalakítót valósíthatunk meg (7.9.b ábra). Ha a bázisfeszültségek egyenlők, és minden emitter-ellenállást közös  $-U_T$  pontra csatlakoztatunk, akkor az ellenállásoknak a helyérték súlyával fordított arányban kell változniuk. Ez a bipoláris integrált áramkörös technikában is megnehezíti a kellő pontosságú megvalósítást.

Emiatt az áram eloszlását itt is célszerű létrahálózattal megoldani. Az elvet a 7.10. ábrán látható kapcsolás szemlélteti.

A  $T_1, \dots, T_6$  tranzisztorok bázisfeszültsége egyenlő. A bázisfeszültséget a műveleti erősítő úgy állítja be, hogy a  $T_1$  referencia tranzisztoron  $I_{REF} = \frac{U_{REF}}{R_{REF}}$  áram folyjék. Ekkor

$U_{REF} = 2 \cdot R \cdot I_{REF}$ . Ha a többi tranzisztor emitter-bázis feszültsége egyenlő  $T_1$ -ével, akkor az emitter-ellenállásokon a 7.10. ábrán bejelölt feszültségesések jelentkeznek, tehát megfelelő súlyozott áramok keletkeznek.

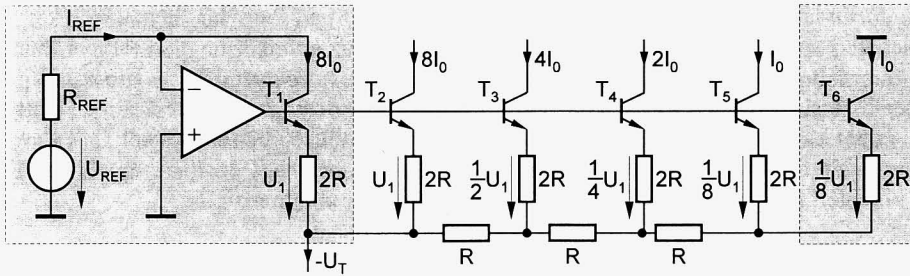
Nem adódnak teljesen egyenlő bázis-emitter feszültségek még akkor sem, ha a tranzisztorok egyformák, mert különböző áramok folynak át rajtuk. Hogy minden tranzisztor kollektorárama azonos legyen, annyi tranzisztort kell párhuzamosan kapcsolni, hogy minden tranzisztoron csak  $I_0$  áram folyjon. Integrált áramkörökben ez egyszerűen megvalósítható, mivel csak az árammal arányosan kell növelni a tranzisztorfelületet.



a) tranzistoros áramgenerátor

b) elvi kapcsolás

7.9. ábra. Kapcsolt áramgenerátoros közvetlen D/A átalakító



7.10. ábra. Súlyozott áramok előállítása

A 7.10. ábra létrahálózatának  $2R$  lezáró ellenállását nem szabad a fölhöz csatlakoztatni, hanem erre a célra emitterpotenciálú pontot kell keresni. Erre való az egyébként nem használt  $T_6$  tranzisztor. A  $T_6$  tranzisztor emitterét  $T_5$ -el párhuzamosan köthetjük, és a két emitterellenállást egyetlen  $R$  ellenállássá egyesíthetjük.

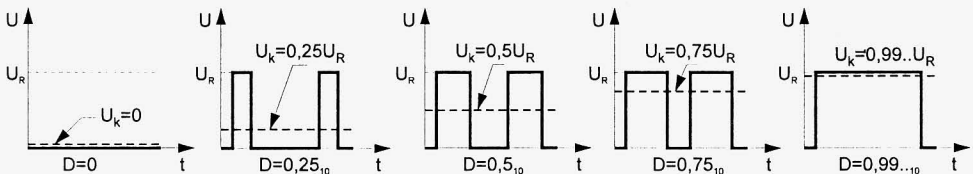
### 7.1.5. Közvetett D/A átalakító impulzus-kitöltés modulációval

A közvetett elvű D/A átalakítók közül az impulzus-kitöltés modulációval (angolul: *PDM* – *Pulse Duration Modulation*) működő átalakító bír a legnagyobb gyakorlati jelentőséggel. Olyan helyeken célszerű az alkalmazása, ahol az átalakítás sebessége nem kritikus. A működés alapelve a 7.11. ábra alapján tárgyalható.

- ◆ Olyan – logikai szintű – négyyszögjelet állítunk elő, amelynek kitöltési tényezője megegyezik az átalakítandó digitális értékkel.

*Megjegyzés:* – **Kitöltési tényezőnek** nevezzük a négyyszögjel logikai 1-es értékének- és teljes periódusidejének viszonyát.

- ◆ A digitális értékkel egyező kitöltési tényezőjű periodikus jelet egy megfelelő áramkörrel  $U_R$  (referencia feszültség) amplitúdójú négyyszögjellé alakítjuk (a 7.11. ábra különböző kitöltési tényezőjű jelalakokat szemléltet);
- ◆ A kapott  $U_R$  amplitúdójú négyyszögjelet egy középpérték-képzőre kapcsoljuk. A kimeneti feszültség egyenesen arányos a bemeneti digitális értékkel ( $0 \leq D \leq 1$ ).

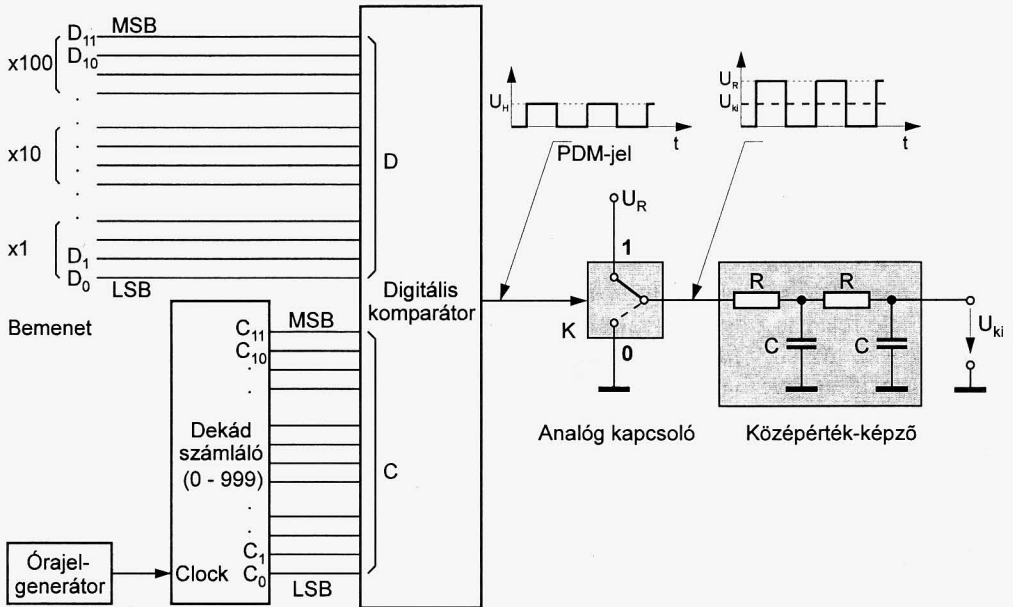


7.11. ábra. Különböző kitöltési tényezőjű négyyszögjelek ( $U_k$  – a négyyszögjel középpértéke)

A 7.12. ábra egy impulzus-kitöltés modulációval működő D/A átalakító tömbvázlatát szemlélteti. Az impulzus szélesség modulált jelet egy órajel-generátorral vezérelt dekádszámláló és egy digitális komparátor segítségével állítjuk elő. A digitális komparátor a számláló ( $C$ ) és a bemenet ( $D$ ) jelet hasonlítja össze. Az átalakító működése a 7.12. ábra alapján követhető.



- Amíg a számláló az előre számlálás közben (maximális értéke 999) nem éri el a bemeneti jel értékét addig a komparátor kimenetén logikai **1**-es szint van (a *PDM* jel ilyenkor logikai **1** szinten van). Amikor a számláló kimenetén levő **C** digitális érték megegyezik a bemeneti **D** értékkel, a komparátor kimenete logikai **0**-ra vált, és ez a logikai szint marad a ciklus végéig (a *PDM* jel ilyenkor logikai **0** szinten van). Megállapítható, hogy a komparátor kimenetén keletkező négyszögjel (*PDM jel*) kitöltési tényezője – ezrelékben kifejezve – megegyezik a bemeneten levő digitális jel értékével.
- A *PDM* jellel vezérelt *K* analóg kapcsoló kimenetén olyan négyszögjelet kapunk, amely  $U_R$  és  $0\text{ V}$  értékeket vesz fel a vezérlésnek megfelelő kitöltési tényezővel. Ennek a jelnek a középértékét úgy kapjuk meg, hogy aluláteresztő szűrőn (középérték-képzőn) vezetjük át.



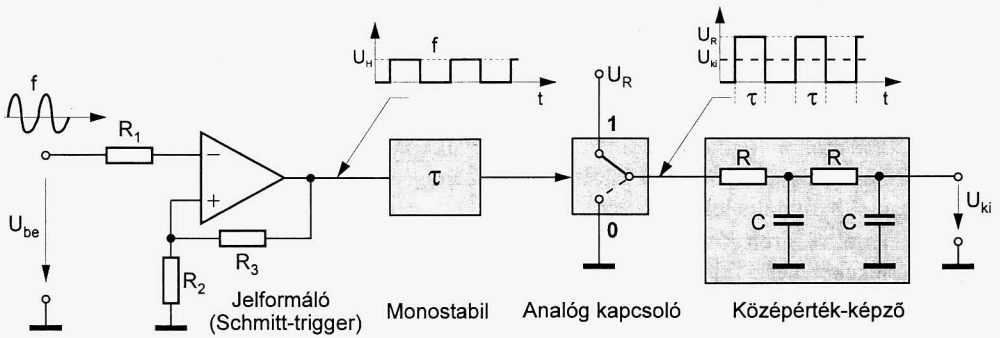
7.12. ábra. Impulzus-kitöltés modulációval működő D/A átalakító tömbvázlata

A tárgyalt D/A átalakító nagy előnye, hogy pontossága elvileg csak az  $U_R$  referencia-feszültség pontosságától függ, egyéb nagy pontosságú áramköri elemekre nincs szükség. Ezért a D/A átalakításnak ezt a módszerét a gyakorlatban nagyon sok helyen alkalmazzák (pl. nagy pontosságú egyenfeszültségek előállítására, CD lemezjátszók D/A átalakító részeként).

### 7.1.6. Frekvencia-feszültség közvetett D/A átalakító

A digitális technikában gyakran egy jel frekvenciáját használják fel mint a digitális jel értékét, mivel az iparban igen elterjedtek a frekvencia-kimenetű érzékelők, távadók.

A 7.13. ábra egy frekvencia-feszültség átalakító tömbvázlatát szemlélteti, amely alkalmas a bemenetére érkező jel-frekvencia egyenfeszültséggé alakítására. Fontos követelmény, hogy a bemeneti jel-frekvencia és a keletkező egyenfeszültség között szigorúan lineáris összefüggés legyen.



7.13. ábra. Frekvencia-feszültség átalakító tömbvázlata

A kapcsolás működése a 7.13. ábra alapján magyarázható.

- A különböző jelszintű és alakú bemeneti jelet egy erősítő és jelformáló áramkör fogadja, amely logikai szintű négyszögjelet állít elő.
- A jelformáló áramkör kimeneti jele egy monostabil áramkört vezérel, amely a bejövő frekvenciától függetlenül azonos,  $\tau$  szélességű impulzusokat állít elő.
- A monostabil áramkör kimeneti jelével egy analóg kapcsolót vezérelünk. Az analóg kapcsoló feladata, hogy a  $\tau$  szélességű impulzusok pontosan egyforma  $U_R$  amplitúdójúak legyenek. Az ily módon kapott azonos szélességű, amplitúdójú és a bemeneti frekvenciával egyező impulzus-sorozat középértéke arányos a frekvenciával.
- A kimeneti jelet egy középérték-képző áramkör biztosítja. A kimeneten kapott egyenfeszültség egyenesen arányos a bemeneti jel frekvenciájával:  $U_{ki} \sim f$ .

### 7.1.7. Digitális-analóg átalakítók jellemzői

**A kimeneti feszültség változásának tartománya:** – a D/A átalakító kimenetén jelentkező analóg mennyiség változásának maximális tartományát képviseli.

**Felbontás (angolul: resolution):** – egy D/A átalakító kimenetén fellépő legkisebb analóg lépcső értéke; meg kell jegyezni, hogy a felbontás megadható vagy a kimeneten fellépő legkisebb elemi lépcső értékével, vagy a kimeneten jelentkező különböző elemi lépcsők maximális számával.

**Offszethiba:** – az átviteli karakterisztikának a kezdőponthoz viszonyított elmozdulása; az offszethiba mértékegysége az *LSB*.

**Linearitáshiba:** – a D/A átalakító valós karakterisztikájának az ideális karakterisztikától (egy egyenes) való eltérését fejezi ki; a linearitáshiba mértékegysége az *LSB*.

**Konverziós (átalakítási) idő:** – azt az időtartamot képviseli, ami egy átalakításhoz szükséges; az átalakítás akkor tekinthető befejezettnek, mikor a kimeneti analóg mennyiség a végleges értéket felveszi  $\pm \frac{1}{2} LSB$ .

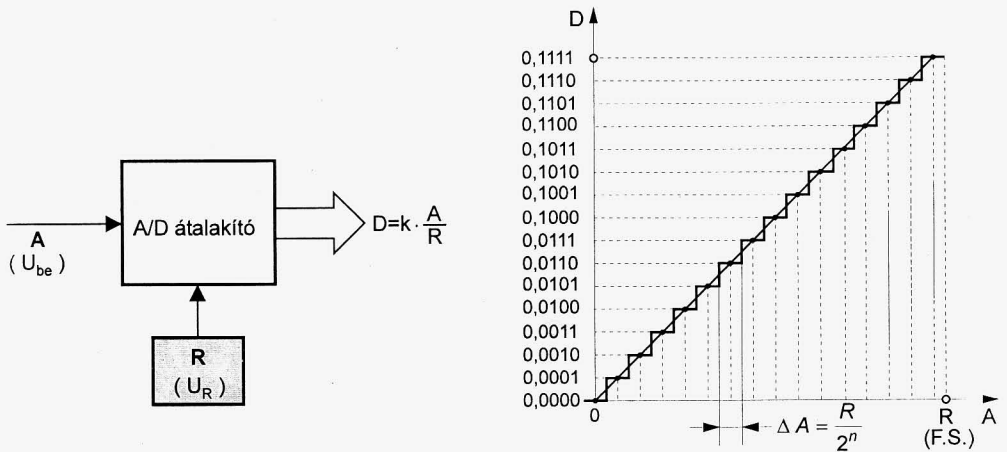
**Átalakítási sebesség:** – a D/A átalakító által egy másodperc alatt végrehajtott átalakítások számát adja meg.

## 7.2. Analóg-digitális (A/D) átalakítók

### 7.2.1. Analóg-digitális átalakítók alapelvei

Az *analóg-digitális átalakító* (angolul: *ADC* – Analog to Digital Converter) feladata, hogy a bemenetére érkező „*A*” analóg jelnek megfelelő „*D*” digitális jelet állítson elő a kimenetén (7.15.a ábra).

A működéshez szükséges egy *R* referencia (általában egy  $U_R$  referenciafeszültség), amelyhez az A/D átalakítók az *A* analóg mennyiséget viszonyítják ( $D = k \cdot \frac{A}{R}$ ) és amely a kimeneti feszültség maximális értékét is meghatározza.



a) tömbvázlat

b) átviteli karakterisztika

7.15. ábra. A/D átalakítók elvi működése

A 7.15.b ábra az A/D átalakító átviteli karakterisztikáját szemlélteti. Megfigyelhető, hogy az analóg jel bizonyos számú (az ábrán 16 érték) amplitúdó-értékkel közelíthető (vagyis az A/D átalakító *kvantál*). Az analóg jelet – vagyis a  $0 \dots R$  tartomány minden pontjában értelmezett jelet (*feszültséget*) – egyenlő részekre kell osztani és minden egyes szakaszhoz egy-egy számot (*digitális mennyiséget*) kell rendelni a lehető legkisebb hibával. Az analóg jel tengelyének egy-egy elemi szakasza ( $\Delta A$ ), amelyhez ugyanaz a digitális kód tartozik, a *kvantum*. Az analóg jelben a kvantum, vagy elemi lépcső mérete (*bináris kódú átalakítóknál*):

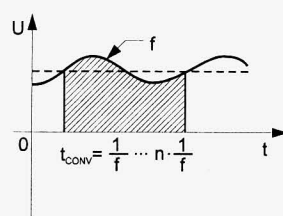
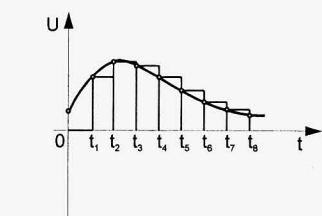
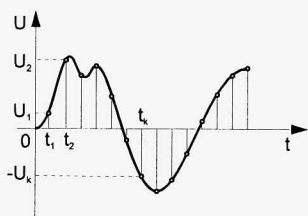
$$\Delta A = \frac{R}{2^n}, \text{ vagy feszültség esetén } \Delta U = U_{LSB} = \frac{U_R}{2^n}.$$

Egy analóg jel annál pontosabban ábrázolható digitális értékekkel, minél kisebb egy elemi lépcső, vagy kvantum nagysága. Mivel az elemi lépcsők méretét az átalakító *felbontása* határozza meg, a kvantálás finomságának a növelése érdekében növelnünk kell az átalakító felbontását. Az A/D átalakítónak annál nagyobb a felbontóképessége, minél több áll rendelkezésre a számábrázoláshoz.

Az átalakítók felbontásának a növelése az áramköri megvalósítást nehezíti, drágítja. A kis pontosság-igény esetén általánosan használt analóg-digitális átalakítók felbontása **8 bit** (256 elemi lépcső), nagyobb pontosságot biztosítanak a **10, 12, 14 bites** (1024, 4096, 65536 elemi lépcsővel) átalakítók, a **16, 18, 20 bites** átalakítókat főleg nagy pontosságú rendszerekben alkalmazzák).

## 7.2.2. Mintavételezés

Az analóg jelábrázolással ellentétben, ahol a mérendő mennyiségeket folyamatos mérőjellel alakítják át, a digitális mérési jel ábrázolásánál csak diszkrét mérőjelek fordulnak elő, amelyeket mintavételezéssel, kvantálással és kódolással állítanak elő. A kvantálásnál elkerülhetetlen az információvesztés. Az ésszerű kvantálás a fizikai mérőjel fajtájától és az előírányzott alkalmazástól függ.



7.15. ábra. Mintavételezés

7.16. ábra. Pillanatérték átalakító

7.17. ábra. Közéérték átalakító

Az A/D átalakítók bemeneti jele a legritkább esetben egyenfeszültség. Az átalakítandó jel, attól függően, hogy milyen forrásból származik, lassan vagy gyorsan változhat az idő függvényében. Az időben változó analóg jelek esetén – ahhoz, hogy a jelből képzett digitális információ megfelelő legyen – meghatározott időközönként a jelből mintát kell venni (7.16. ábra). A mintavételezés gyakoriságát annál nagyobbra kell venni, minél gyorsabban változik az analóg jel. Általánosságban érvényes:

- ◆ az analóg jel mintavételezési gyakoriságának legalább kétszer akkora kell lennie, mint a jel változásának legnagyobb frekvenciája.

Az A/D átalakítókat aszerint, hogy az analóg jel mely értékeit dolgozzák fel, két alapvető típusba sorolják.

- **Pillanatérték átalakítók:** – amelyek bizonyos időközökben az adott időpillanatban felvett jel-értéket alakítják át digitális információvá (7.16. ábra). A pillanatérték átalakítók nem veszik figyelembe a jel megváltozását az átalakítás ideje alatt. Ugyanakkor igen nagy a zavarérzékenységük. Ezeket az átalakítókat legtöbbször gyors ( $\mu\text{s}$  nagyságrendű, vagy rövidebb átalakítási idővel) átalakításokhoz alkalmazzák.
- **Átlagérték átalakítók:** – amelyek az átalakítás ideje alatt a jel átlagértékét (közéértékét) veszik figyelembe. Alkalmazásuk lassú átalakítások (ms nagyságrendű átalakítási idővel) esetén célszerű és olyan esetekben, amikor a hasznos jelre zavarfeszültség szuperponálódik (7.17. ábra).

Ha az átalakítás ideje ( $t_{\text{CONV}}$ ) megegyezik a zavaró jel periódusidejével, akkor ez a zavar nem befolyásolja lényegesen a digitális eredményt. Ez különösen fontos, pl. ipari környezetben, mérőátalakítók, távadók jelének digitális feldolgozásakor.

### 7.2.3. Átalakítási elvek és áramköri megvalósításuk

Nagyszámú konkrét A/D átalakítótípus létezik, amelyek az áramköri kiépítésben, a használt elemekben, az elvégezhető műveletek sorrendjében, konstrukciós és technológiai megoldásokban térnek el egymástól. Ezek alapját azonban viszonylag kis számú bázismódszer (elv) képezi. Különböző közelítésben lehet vizsgálni ezen elvek kiemelését és egy megfelelő osztályozási rendszer kialakítását, amely az A/D átalakítók sokféleségét tükrözné.

Az egyik osztályozási módszer alapjául az A/D átalakítókban a visszacsatolás alkalmazásának a vizsgálata szolgál. Ebből a szempontból kiindulva az átalakítókat **zárt** és **nyitott rendszerűekre** oszthatjuk fel.

Hasonlóan a D/A átalakítókhoz, az A/D átalakítók is lehetnek **közvetlen**, vagy **közvetett** működésűek aszerint, hogy nem iktatunk be, vagy beiktatunk az átalakítás folyamatába egyéb mennyiségeket.

Az utóbbi időben legelterjedtebbé vált osztályozás lényege az analóg mennyiség digitális átalakítási folyamata idődiagramjának vizsgálata. Már említettük, hogy a jelek mintavételi értékeinek egyértékű digitális értéksorba alakításához a kvantálási és kódolási műveletek szolgálnak alapul. Ezek az átalakítandó mennyiség soros, párhuzamos vagy soros-párhuzamos közelítésével valósíthatók meg. Ennek alapján az A/D átalakítók felépítési lehetőségeit célszerű **soros**, **párhuzamos** és **soros-párhuzamos** módszerekre osztani. Ehhez még figyelembe kell venni, hogy a soros eljárás lehet **számláló típusú**, illetve megvalósítható **súlyozott bináris közelítéssel** is.

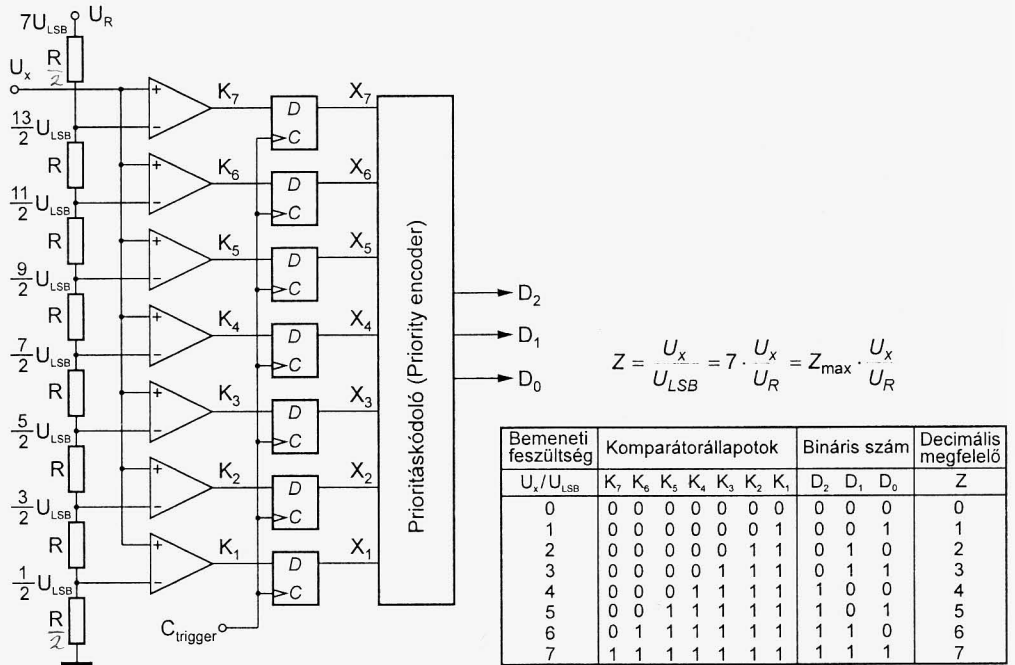
#### 7.2.3.1 Közvetlen A/D átalakító

Egy közvetlen A/D átalakító megvalósítását – 3 bites számra – a 7.18.a ábra szemlélteti. Az áramkör működése az amplitúdószelekció elvén alapul.

- Az  $U_x$  bemeneti jelet egy komparátor-sor hasonlítja össze egy ellenállás-osztó által előállított lépcső feszültséggel.
- Amelyik komparátor nagyobb bemeneti feszültséget érzékel mint a hozzá tartozó lépcső feszültség, az logikai **1**-et, amelyik kisebbet, az logikai **0**-át ad a kimenetére ( $K_1 - K_7$ ). Ha a bemenetre, pl.  $\frac{5}{2}U_{LSB}$  és  $\frac{7}{2}U_{LSB}$  közti bemeneti feszültség kerül, akkor az 1...3 komparátor kimeneti állapota logikai **1**-es, a 4...7 komparátoré logikai **0** szintű lesz. A 7.18.b ábrán látható táblázatban az összetartozó komparátor-állapotok és a bináris kódú eredmények összefoglalása látható.

A szükséges átalakítást prioritásdekódolóval oldhatjuk meg. A prioritásdekódolót nem lehet közvetlenül a komparátorok kimenetére csatlakoztatni, mert ha a bemeneti feszültség nem állandó, akkor időlegesen teljesen hamis eredményt kaphatunk. Példaként megvizsgálhatjuk a **3**-ról **4**-re való átváltást, amely bináris kódban **011**-ből **100**-ba való átváltást jelent.

Ha a legnagyobb helyértékű helyen a változás kisebb késleltetése miatt gyorsabban megvalósul, mint a többin, akkor egy átmeneti időre **111** jelenik meg, amely **7**-nek felel meg. Ez fél végkitérésnek megfelelő mérési hibát jelent.



a) tömbvázlata

b) állapotai a bemeneti feszültség függvényében

7.18. ábra. Közvetlen (párhuzamos) A/D átalakító (3-bites)

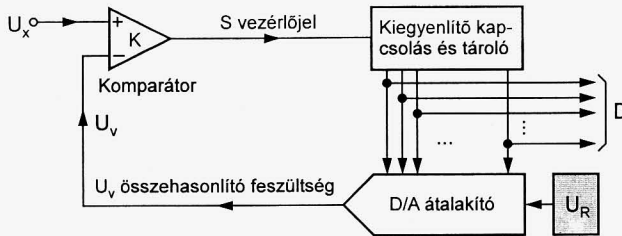
Ha a mérés időtartamára a komparátorok kimeneti feszültségét állandó értéken tartjuk, akkor ezt a hibát kiküszöböljük. A probléma megoldására a komparátorok kimenetén digitális tárolást használhatunk. Az ábrán ezt a célt szolgálják a minden komparátorkimenetre kapcsolt élvezérelt *D* tárolók. Így biztosítható, hogy a prioritásdekódolóra egy teljes órajel-periódus alatt állandó bemeneti jel kerüljön. A következő triggerjel (jelölése:  $C_{trigger}$ ) beérkezése előtt így a prioritásdekódoló kimenetén az állandósult állapotnak megfelelő adatok állnak rendelkezésre. A közvetlen átalakítási megoldás különleges előnye éppen a digitális mintavevő-tartó áramkör alkalmazásának lehetősége. Ez a nagysebességű A/D átalakítás előfeltétele.

A bemutatott közvetlen átalakító hátrányaként említhető, hogy annyi komparátor és ellenállás kell, ahány lépcső van (pl. egy 10 bites átalakítóhoz 1023 komparátor szükséges). Előny viszont, hogy a közvetlen módszerrel rendkívül gyors átalakítót lehet készíteni (ezért is hívják *angolul villám konverternek – flash converter*).

Az 1990 óta rendelkezésre álló integrálási technikákkal 12 bit felbontású, párhuzamos átalakítók előállítására lehetséges. Ennél tehát 4095 komparátort és a referenciafeszültségek előállításához szükséges szerkezeti elemeket, az átkódoló, valamint a kimeneti tárolót kell egy chipre integrálni. Ezeknek a flash konvertereknek a tipikus frekvenciája 100 – 200 MHz értékű. A hozzá tartozó átalakítási idők tehát 5 – 10 ns értékűek.

### 7.2.3.2. Kompenzációs elv szerinti A/D átalakítás

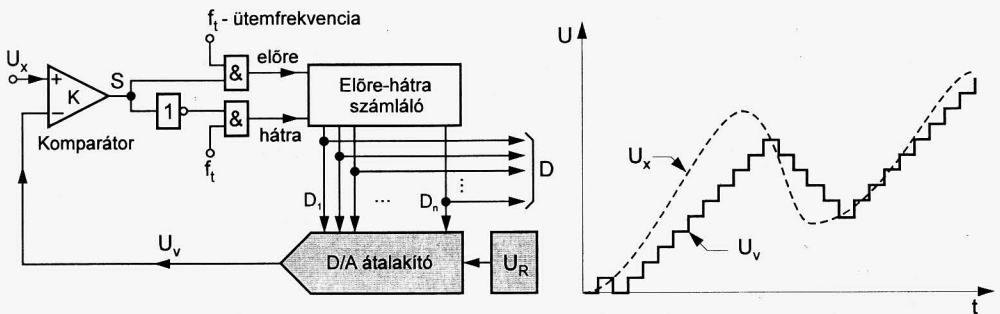
A kompenzációs elv szerinti analóg-digitális átalakító a 7.19. ábra szerint egy D/A átalakítót tartalmaz a visszacsatolásban. Egy kiegyenlítő kapcsolás segítségével a D/A átalakító digitális  $D$  bemeneti jelét megfelelő módon addig változtatják, amíg az  $U_v$  analóg kimeneti jel gyakorlatilag teljes mértékben kompenzálja az átalakítandó  $U_x$  analóg bemeneti jelet. A szükséges  $S$  vezérlőjelet a kiegyenlítő kapcsolás egy olyan  $K$  komparátortól kapja, mely logikai **1** jelet szállít mindaddig, amíg az átalakítandó  $U_x$  bemeneti feszültség nagyobb, mint a visszacsatolt  $U_v$  összehasonlító feszültség. Kiegyenlített állapotban a D/A átalakító digitális bemeneti jele azonos a teljes A/D átalakító digitális kimeneti jelével.



7.19. ábra. Kompenzációs rendszerű A/D átalakító elve

### Követő átalakító kétirányú számlálóval

A kompenzációs elv szerinti legegyszerűbb A/D átalakító az egyirányú számlálóval rendelkező növekményes átalakító. Mivel az ilyen átalakítók vagy csak növekvő vagy csak csökkenő bemeneti feszültséget tudnak követni, ezért általában kétirányú számlálóval rendelkező növekményes átalakítót szoktak beépíteni. Ezek a követő átalakítók mind növekvő, mind csökkenő bemeneti jeleket tudnak követni.



a) elvi kapcsolás

b) idődiagram

7.20. ábra. Követő átalakító kétirányú számlálóval

A 7.20. ábra egy kétirányú számlálóval rendelkező követő átalakító tömbvázlatát és idődiagramját szemlélteti. Az áramkör működése az ábra alapján magyarázható.

- Megfelelő logikával a számláló előreszámoló bemenetét addig vezérlik, amíg a bemeneti jel nagyobb, mint a D/A átalakító visszacsatolt  $U_v$  jele.
- A reverzibilis számláló visszaszámláló bemenetét akkor vezérlik, ha az átalakítandó bemeneti feszültség kisebb, mint  $U_v$ . A digitális kimeneti jel mindig egy egy egységgel ugrik ide-oda, mivel a két számláló bemenet egyikén állandóan ütemimpulzusok lépnek fel. Ezt az ide-oda ugrálást el lehet kerülni, ha komparátorként ún. ablakkomparátort használnak, amely egy meghatározott holtzónán belül az egyik számláló bemenetét sem vezérli.

A 7.20.b ábra szerinti jelleggörbe megmutatja, hogyan követi egy követő átalakító a bemeneti feszültség növekedését illetve csökkenését. Ha a rendszer maximális átalakítási sebességét túllépjük, csak akkor követi késéssel az átalakító az  $U_x$  változó feszültséget.

Ha a követő átalakítónak késleltetésmentesen kell tudnia a jelet követnie, akkor a bemeneti feszültség maximális változási sebességének nem szabad az összehasonlítási feszültség maximális változási sebességénél nagyobbak lennie.

Példa: – Egy 10-bites átalakító esetén, ha az  $f_i$  ütemfrekvencia 1 MHz és a bemeneti feszültség váltakozó összetevőjének amplitúdója  $\frac{1}{2}U_R$ , a bemeneti feszültség maximális, megengedhető frekvenciája kb. 310 Hz.

### Fokozatos közelítésű A/D átalakító

Az analóg-digitális átalakítási eljárások között nagyon elterjedt a fokozatos közelítés módszere. Ezek az átalakítók az olyan ütemvezérlésű, soros átalakítókhöz tartoznak, melyeknél minden ütemperiódusban a  $D$  digitális kimeneti jel egy helyértéke alakul ki (angolul: *one bit at a time*). Egy  $n$ -bites átalakítónál tehát az átalakításhoz  $n$  lépés szükséges.

Egy fokozatos közelítés elve (angolul: *successive approximation* – *szukcesszív aproximációs*) szerint működő A/D átalakító tömbvázlatát a 7.21.a ábra mutatja.

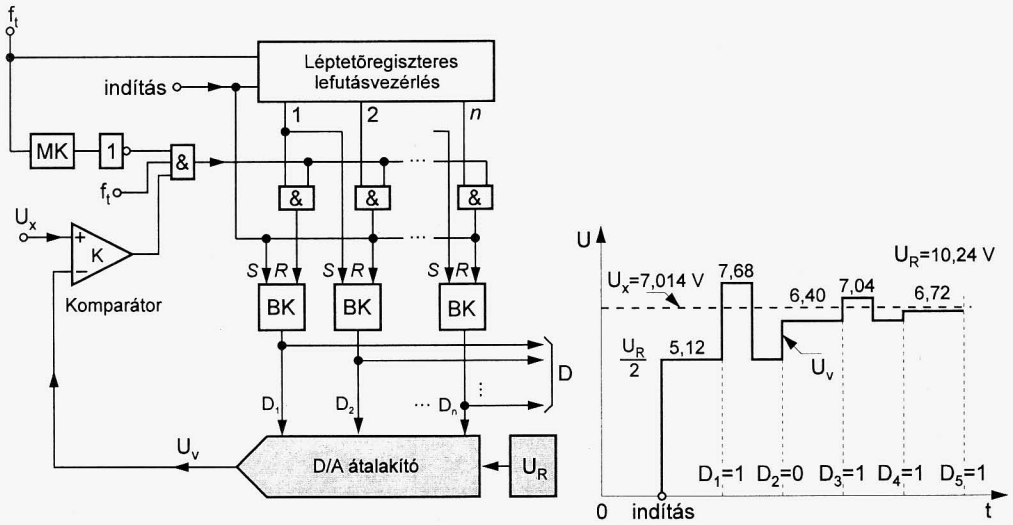
Az átalakító működésének alapjául a dichotómia elve szolgál, vagyis a mért érték sorozatos összehasonlítása a lehetséges maximális érték ( $U_R$ )  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$  stb. részével. Az

átalakítás egy kísérlettel kezdődik, amely szerint a legmagasabb értékű helyértékre logikai **1**-et kell beírni. Ha a D/A átalakító  $U_v$  kimeneti feszültsége kisebb, mint az átalakítandó  $U_x$  bemeneti feszültség, akkor ezt a logikai **1** értéket a rendszer megőrzi. Ha azonban  $U_x < U_v$ , akkor a komparátor kimenete átbillen és ezt a lépcsőt a rendszer visszaállítja nullára.

Ez az eljárás folytatódik az ezután következő legmagasabb értékű helyen, és végül a legalacsonyabb értékű helyen fejeződik be. Minden lépés után a D/A átalakító  $U_v$  kimeneti feszültségét a rendszer az  $U_x$  analóg bemeneti jellel összehasonlítja. Ha az  $U_x$  feszültség kisebb értékű, akkor logikai **1** marad a bistabil  $BK$  billenőfokozatban. Túlkompenzálás esetén azonban a billenőfokozat visszaáll nullára (7.21.b ábra).

A lefutásvezérlést léptetőregiszterrel oldják meg, amely egyrészt túlkompenzálás esetén nyitja az  $\bar{E}S$ -kaput a billenőfokozat törlésére, másrészt pedig az ezt követő kisebb értékű hely billenőfokozatát logikai **1**-re állítja. A monostabil  $MK$  billenőfokozat a komparátor jelét elegendő hosszú ideig késlelteti ahhoz, hogy ezáltal az átmeneti folyamatok beállása kivártható legyen.





a) elvi kapcsolás

b) idődiagram

7.21. ábra. A/D átalakító fokozatos megközelítéssel

A 7.21.b ábrán  $U_x = 7,014 \text{ V}$  bemeneti feszültség példáján bemutatjuk az átalakítás kezdetét  $U_R = 10,24 \text{ V}$  referenciafeszültség esetén.

A gyors átalakítók ezen elv szerint 1 MHz-es ütemfrekvenciával dolgoznak. Ez 1  $\mu\text{s}$ -os ütemperiódusnak felel meg. Egy 10-bites jel átalakítására ekkor 10  $\mu\text{s}$  szükséges

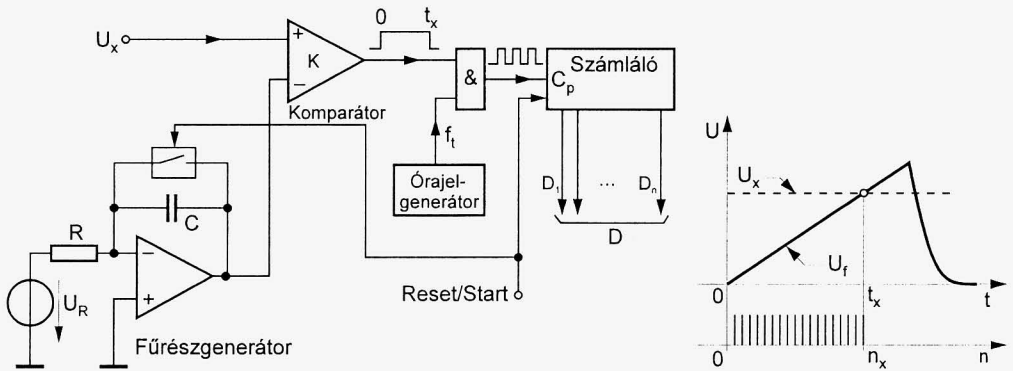
### 7.2.3.3. Analóg-digitális közvetett átalakítás

Egy sor gyakorlati alkalmazási eseténél, (pl. laboratoriumi digitális voltmérőknél) az analóg-digitális átalakítás sebességével szemben nem támasztanak nagy követelményeket. Ezeknél előnyösen lehet alkalmazni azokat a közbenső mennyiségként idővel vagy frekvenciával dolgozó átalakítási eljárásokat, amelyek részben nagyon nagy pontosságot tesznek lehetővé.

#### Fűrészfeszültség-eljárással működő közvetett A/D átalakító

Az időtranszformációs átalakítók legegyszerűbb változata a fűrészfeszültség-eljárással működő változat. A 7.22. ábrán látható tömbvázlata nem tartalmaz D/A átalakítót. Működése azon az elven alapul, hogy az átalakítandó bemeneti feszültséget először értékével arányosan idővé alakítjuk.

Az átalakítás a fűrészjelet előállító integrátor elindításával kezdődik. A komparátor kimenete ilyenkor logikai 1-es értéken van, és az órajelgenerátor által szolgáltatott impulzusokat – a nyitott  $\overline{ES}$ -kapun keresztül – egy előre-számláló számolja. Amikor az  $U_f$  lineáris fűrészfeszültség eléri a bemeneti jel  $U_x$  értékét, a komparátor kimenete logikai 0-ra vált és letiltja az  $\overline{ES}$ -kapun keresztül az órajel impulzusokat (vagyis a számlálás megáll).



a) elvi kapcsolás

7.22. ábra. Fűrészfeszültséggel működő A/D átalakító

b) idődiagram

Az átalakítás kezdetétől eltelt  $t_x$  idő (és a számlálóban tárolt impulzusok  $n_x$  száma), egyenesen arányos a bemeneti  $U_x$  feszültség értékével. Minden mérés után nulláznunk kell a számlálót és a fűrészgenerátort is vissza kell állítani kezdeti állapotába.

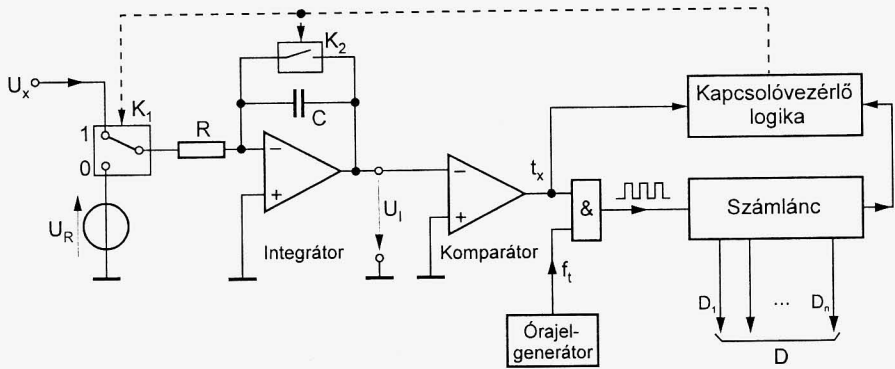
**Megjegyzés:** A fűrészgenerátor kisebb módosításával lehetőség nyílik pozitív és negatív feszültségek átalakítására is. Ennek feltétele, hogy a fűrészgenerátor  $U_f$  feszültsége negatívtól pozitív értékek irányában változzon.

Ha negatív feszültség kerül a bemenetre, akkor az  $U_f$  feszültség először a mérendő feszültséget éri el, majd a  $0$  feszültséget lépi át. Ebből a sorrendből adódik a mért feszültség előjele. A mérés időtartama nem függ a vizsgált feszültség előjelétől, csak az abszolút értékétől.

A fűrészfeszültséggel működő átalakítók pontossága nagymértékben függ a felhasznált alkatrészek minőségétől. A fűrészfeszültség jellemzőit az  $RC$  tag, a műveleti erősítő és az  $U_R$  referencia-feszültség együttesen határozza meg, ezért ezek minősége kritikusnak tekinthető. Ugyanakkor az átalakítás pontosságát ezen alkatrészek hőmérsékletfüggése és hosszú idejű stabilitása is befolyásolja (ez szükségessé teszi pl. az automatikus kalibrálást). Ezért 0,1 %-nál nagyobb átalakítási pontosság csak nehezen érhető el. Ezeknek az átalakítóknak hátránya, hogy zavarérzékenységük viszonylag nagy (mivel pillanatérték átalakítók), ami korlátozza a felbontóképességet, és rendszerint ezt 8...10 helyérték szintjén tartja.

### Kettős meredekséggel integráló közvetett A/D átalakító

A kettős meredekségű integrálás (angolul: *Dual Slope Integration*) elvén működő átalakító a legelterjedtebb típusok közé tartozik, amely mentes az előző átalakító hibáitól. A 7.22. ábra egy ilyen – egyféle polaritású feszültség mérésére alkalmas – átalakító tömbvázlatát mutatja. A teljes működési ciklus két szakaszból áll. A mérés kezdetén a kapcsolóvezérlő logika a számlánlcot törli, a  $K_1$  kapcsolót az 1-es állásba billenti és a  $K_2$  kapcsolót pedig nyitja. Ezáltal az  $U_x$  mérendő feszültséget egy  $t_0$  állandó ideig integrálják. Ha a mérendő jel pozitív, az integrátor kimenete negatív lesz, és a komparátor engedélyezi az órajelgenerátor jelét.

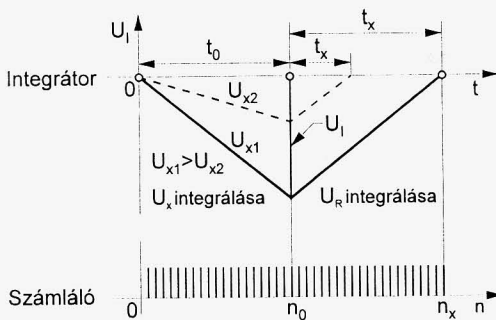


7.23. ábra. Dual slope A/D átalakító tömbvázlata

Ez a mérési időtartam akkor ér véget, amikor a számláló  $Z_{\max}+1$  periódus után túlszordul, és ezáltal a számláló által mutatott érték ismét 0 lesz. Ezen szakasz végén az integrátor kimeneti feszültsége:

$$U_I = -\frac{1}{RC} \cdot U_x \cdot t_0 \quad (7.1)$$

Ezt követően a negatív referenciasfeszültség integrálására kapcsol át a vezérlő logika. Így a kimeneti feszültség abszolút értéke csökkenni kezd, amint ez a 7.24. ábrán látható. Amikor az integrátor feszültsége eléri a zérust, a számlálás megszűnik, és a számlálóban az  $n_x$  végeredmény tárolódik.



7.24. ábra. Az integrátor kimeneti feszültségének időábrája

Megfigyelhető, hogy minél nagyobb az  $U_x$  feszültség, annál meredekebb a jel-integrálási szakasz, annál nagyobb a vissza-integrálás ideje és ezzel együtt az  $n_x$  értéke is.

$$t_x = \frac{U_I}{U_R} \cdot RC \quad (7.2)$$

A 7.1 és 7.2 egyenleteket felhasználva kapjuk a kettős meredekséggel integráló

átalakítók alapegyenletét:

$$-\frac{U_x}{U_R} = \frac{t_x}{t_0} = \frac{n_x}{n_0} \quad (7.3)$$

A számlálóban tárolt végeredmény: 
$$n_x = -n_0 \cdot \frac{U_x}{U_R} \quad (7.4)$$

A (7.3) és (7.4) egyenletek szerint a kettős integrálási eljárás szembeötlő jellegzetessége, hogy sem a  $\tau = R \cdot C$  időállandó, sem az  $f_i$  órajelfrekvencia nem szerepel a végeredményben. Csak az szükséges, hogy az órajel frekvenciája a  $t_0 + t_x$  időtartam alatt állandó legyen. A szükséges rövid idejű stabilitás azonban viszonylag egyszerű órajel-generátorral is biztosítható. A pontosságot tehát lényegében a referenciefeszültség toleranciája, az integrátor és a komparátor nullponthibája határozza meg. Emiatt ezzel az eljárással 0,01 % pontosságot is elérhetünk.

Igen előnyös tulajdonsága ezeknek az átalakítóknak, hogy azokat a váltakozó feszültségeket, amelyeknek a frekvenciája  $\frac{1}{t_0}$ -nak egész számú többszöröse, a kapcsolás

teljesen elnyomja. Ezér az órajel frekvenciáját célszerű úgy beállítani, hogy  $t_0$  a hálózati váltakozó feszültség periódusidejével vagy annak egész számú többszörösével legyen egyenlő. Ekkor a bűgőfeszültség hatását teljesen kiküszöbölhetjük.

Mivel a kettős integrálási eljárás olcsó és pontos, zavarelyomása is nagy, ezért főként digitális feszültségmérőkben használják. Ezeknél a viszonylag nagy átalakítási idő nem zavaró. A 7.23. ábrán látható számlálónak nem kell feltétlenül bináris számlálónak lennie, a működési elve változatlan, ha pl. BCD számlálót alkalmazunk. Ezt a lehetőség ki is használható a digitális voltmérőkben, mert ekkor nem kell bináris-decimális átalakítót használni.

A vizsgált A/D átalakító működési sebessége a feszültség-frekvencia átalakító ismert maximális frekvenciája mellett a szükséges helyértékek számával határozható meg.

### Feszültség-frekvencia közvetett átalakítók

Az ilyen rendszerű A/D átalakítók működési elve azon alapul, hogy a feszültséget előzetesen átalakítja a feszültséggel arányos frekvenciájú sorozattá; ezt az impulzus sorozatot a vezérlőegységben rögzített mérési idő alatt megszámlálja, majd ez a szám a bemeneti jel digitális ekvivalenseként kerül kivitelre (7.25 ábra). Jól látható, hogy ez a folyamat megegyezik a bemeneti jel integrálásával egy ugyanolyan rögzített időintervallum alatt, ezért ez az AD átalakító az integráló átalakítók olyan előnyeivel rendelkezik, mint a kis sztatikus hiba és a nagy zajtűrő képesség. Az átalakító működési sebessége azonban kicsi (Hz-ekben mérhető), ami eleve meghatározza az átalakító felhasználási területeit.

Az átalakító működése a következő képlettel írható le:

$$N_x = f \cdot t_x = \alpha \cdot U_x \cdot t_x, \quad (7.5)$$

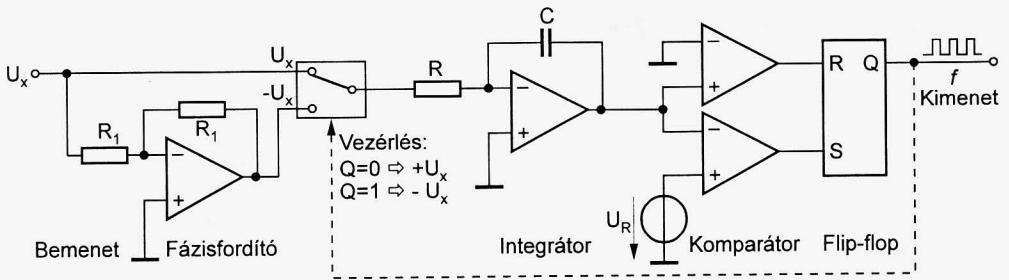
ahol:  $N_x$  – a digitális jelnek megfelelő szám;

$\alpha = \frac{f}{U_x}$  – a feszültség-frekvencia átalakítási jelleggörbe meredekségének inverze;

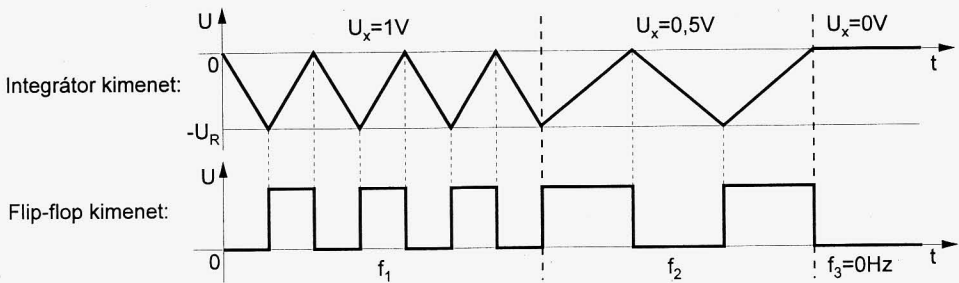
$f$  – a feszültség-frekvencia átalakító egység kimeneti frekvenciája;

$t_x$  – a mérési időintervallum.

Mint ahogyan a (7.5) összefüggésből következik, az A/D átalakító sztatikus hibáját a feszültség-frekvencia átalakításnak a hibája és a  $t_x$  mérési intervallum hibája határozza meg. Ennek következtében pontosságát a gyakorlatban  $R$ ,  $C$  és  $U_R$  közvetlenül befolyásolja. Az ilyen A/D átalakítók előnye, hogy ezekben lényegében az analóg és a digitális rész elválasztódik, és működésük aszinkron.



a) elvi kapcsolási rajz



b) az integrátor és a flip-flop kimeneti feszültségének időábrája

7.25. ábra. Feszültség-frekvencia átalakító

Ez lehetővé teszi az A/D átalakító és az adatfeldolgozási rendszerbe tartozó számítástechnikai eszközök közötti kapcsolat könnyű megszervezését. Ennek érdekében szétválasztható az A/D átalakító analóg és digitális része úgy, hogy az analóg részt az analóg adók mellett helyezik el, a digitális részt pedig a számítástechnikai eszközök bemenetén. És végül: optikai illesztőáramkörök felhasználásával az A/D átalakító analóg és digitális részeit galvanikusan szét lehet választani, és biztosítani lehet kapcsolatukat olyan feltételek között, amikor ezek a részek különböző feszültségen működnek.

#### 7.2.4. Analóg-digitális átalakítók jellemzői

- **Felbontás:** – a kvantálási intervallumok maximális számát képviselő *bitek számával* adható meg; ugyanakkor egy A/D átalakító felbontása kifejezhető egy kimeneti egységnek megfelelő bemeneti lépcsővel is.

- **A bemeneti feszültség változásának tartománya:** – az A/D átalakító bemenetén jelentkező analóg mennyiség változásának maximális tartományát képviseli.

- **Nemlinearitási hiba:** – az A/D átalakító valós karakterisztikájának az ideális karakterisztikától való maximális eltérését fejezi ki; a nemlinearitási hiba mértékegysége az *LSB*.

- **Átalakítási sebesség:** – azt az időintervallumot adja meg, amely egy átalakításhoz szükséges; mértékegysége [ $\mu$ s] vagy [ms]; az átalakítási sebesség kifejezhető még az időegységenkénti átalakítások számával is.

- **Offszethiba:** – az átviteli karakterisztikának a kezdőponthoz viszonyított eltérése; az offszethiba mértékegysége az *LSB*.