

Analóg jelek digitális feldolgozása és továbbítása

(A/D és D/A átalakítók, Programozható Logikai Vezérlők)

előadásvázlat

Összeállította:
Szabó Géza
egyetemi tanársegéd

Budapest, 2001

Bevezetés

A számítástechnika fejlődésével egyre nagyobb szerepet kapnak a processzor alapú berendezések az ipar különböző területein. Ilyen alkalmazásoknál szükség van a vezérlőberendezés és a folyamat kapcsolatának biztosítására. Ennél a kapcsolatnál problémaként merül fel az értelmezett jelek különbözősége: a számítógép bináris ábrázolását kell a valós világ analóg értékeihez illeszteni.

Az alábbi anyag ezt az illesztést tárgyalja, bemutatva a betartandó szabályokat az illesztéshez szükséges átalakítások elvégzésénél. Gyakorlati megvalósítási példákat mutat az elvek realizálására, majd általánosságban tárgyalja az ipari vezérlőberendezéseket is.

Jelek felosztása

Analóg jel: A jel értelmezési tartománya (az idő) és értékkészlete is folytonos (analóg). A jel minden időpillanatban értelmezett, és bármelyik két tetszőleges jelérték esetén található olyan harmadik érték, amelyik az előző kettő közé esik.

Diszkrét idejű vagy időtartományban diszkrét jel: A jel értelmezési tartománya diszkrét, értékkészlete folytonos. A jel csak adott pillanatokban van értelmezve, de ott bármilyen értéket felvehet, pl. hőmérő által mutatott hőmérséklet óránkénti leolvasással és feljegyzéssel – a feljegyzett értékek időtartományban diszkrét jelet valósítanak meg.

Diszkrét amplitúdójú vagy amplitúdóban diszkrét jel: A jel értelmezési tartománya folytonos, értékkészlete diszkrét. Ilyen jelet szolgáltat pl. az a tápegység, amelynek a kimenő feszültsége egy fokozatkapcsolóval 10 lépésben állítható.

Digitális jel: A jel értékkészlete és értelmezési tartománya is diszkrét. A digitális jelek egyik fajtája a *bináris jel*, amelynek értékkészlete két elemet tartalmaz: 0,1.

A digitális jelfeldolgozás és -továbbítás előnyei

Az analóg jeleket analóg csatornán továbbítva számolnunk kell a jelhez hozzáadódó csatornazajjal. Ez a zaj a jelből többnyire már nem távolítható el, mert a jelet analóg erősítőkn keresztül továbbítjuk (a továbbítási veszteségeket az erősítőkkel állítjuk helyre). Az analóg erősítő a jelhez hozzáadódó zajt ugyanúgy erősíti, mint magát a jelet.

Digitális jelek továbbításánál a jelet nem erősíteni, hanem regenerálni kell – a regenerálás során a lehetséges szinteket állítjuk helyre, pl. bináris jel esetén a két lehetséges szintet. A regenerálás – ellentétben az erősítéssel – a zajt nem erősíti, az eredeti digitális jelet tökéletesen képes helyreállítani.

E mellett digitális jelek esetén alkalmazhatóak a különböző hibadetektáló és javító kódolások (pl. egyszerű paritás), amelyek segítségével az átvitel még biztonságosabbá tehető, és/vagy alkalmazhatóak különböző tömörítő kódolások, amelyek az információátvitelt tehetik hatékonyabbá.

Számolnunk kell még a digitális jelfeldolgozás nyújtotta előnyökkel – bármilyen számítástechnikai eszközzel kívánunk analóg jeleket feldolgozni, a jel csak digitalizált formában vihető be az adott eszközbe.

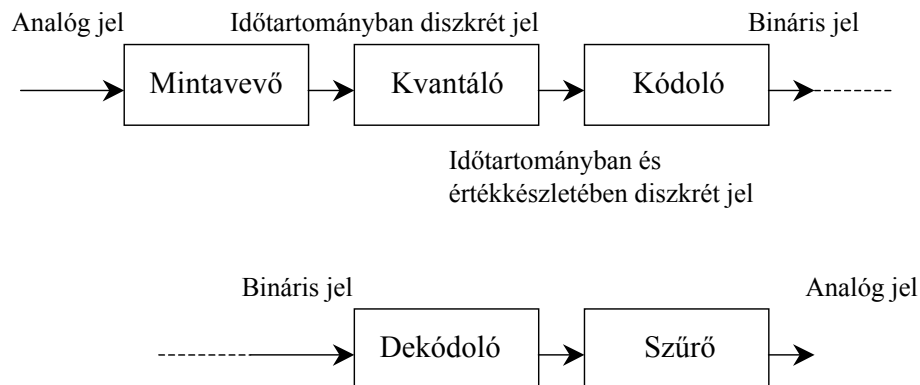
Mindezek miatt célszerű (vagy egyenesen szükséges) az analóg jelet digitalizálni.

Analog jelek digitalizálásának lépései

Az analog jelek digitalizálása során a célunk az, hogy egy analog értéket a lehetőségek szerint egyértelműen azonosítsunk egy bináris kódsorozattal.

Az analog jel átalakításának első lépése a jel **mintavételezése**: a mintavételezés során a folyamatos jelet csak adott időpontokban értelmezzük, az adott időpontban a folyamatos jel értékével megegyező értékű (mintavett) értékekkel helyettesítjük. Az így előálló mintavett jel végtelen sok lehetséges értéket felvehet, és így nem rendelhető hozzá véges hosszúságú kódsorozat. Le kell tehát csökkenteni a mintavett jel értékészletének elemszámát – erre szolgál a **kvantálás**, ami véges sok lehetséges érték közül egy kiválasztottra való kerekítést jelent. Az így kapott jel már digitalizált jel. Amennyiben bináris jelet szeretnénk kapni – a számítógépes feldolgozás és jeltovábbítás miatt ez a célszerű – egy **kódoló** egység segítségével rendelkezünk bináris kódsorozatokat a kvantáló kimenetén megjelenő lehetséges értékekhez.

A **visszaalakítás** lépéseinél a kódoló egység hatása dekódoló egységgel alakítható vissza. A kvantálás vissza nem alakítható hibát eredményez – ezt részletesebben megvizsgáljuk majd a kvantáló tárgyalásakor, míg a mintavételezett jelből elméletileg aluláteresztő szűrővel előállítható az eredeti jelet nagyon jól megközelítő jel (1. ábra).



1. ábra: A digitalizálás és a visszaalakítás lépései

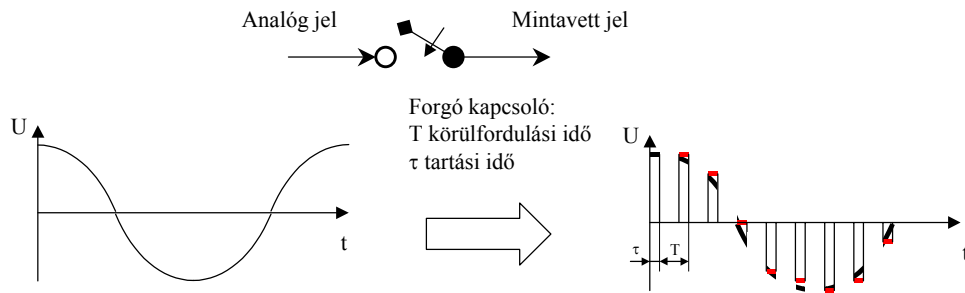
A mintavételezés modelljei, matematikai háttere

A mintavételezéssel szemben támasztott követelmény az, hogy a mintavett jelből az eredeti jel torzításmentesen visszaállítható legyen.

1. modell

A modellben az analog jel-bemenetet egy "forgó kapcsolóval" tapogatjuk le. A kapcsoló körülfordulási ideje T , minden fordulat alatt τ ideig érinti a jelbemenetet (2. ábra).

Ennek a modellnek a segítségével nemcsak a mintavételezés, de az analog multiplexálás is megérthető: tételezzük fel, hogy a kapcsoló forgása során nem egy, hanem több bemenetet érint egymás után, ciklikusan. Ez esetben a kapcsoló kimenetén rendre az egyes bemenetekről származó analog minták jelennek meg.

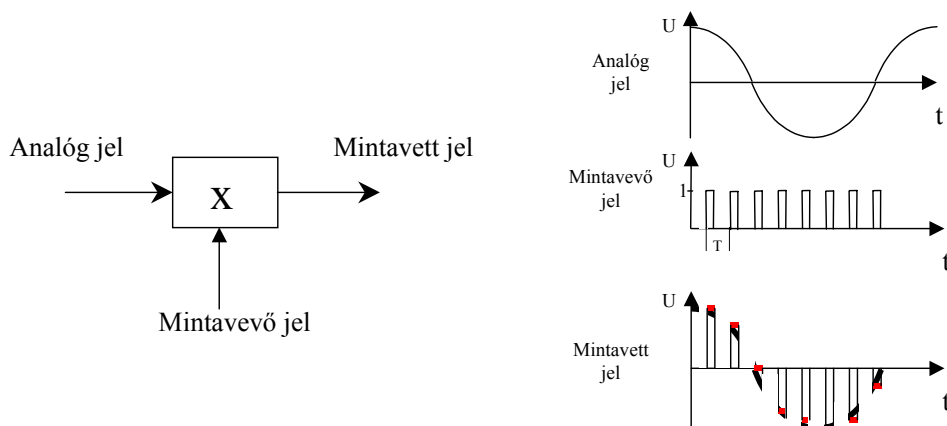


2. ábra: A mintavételezés gyakorlati modellje

2. modell

A mintavételezendő jelet ebben az esetben egy szorzóáramkörre vezetjük. A szorzóáramkör másik bemenetére speciális digitális négyszögjel, ún. kapcsolójel vagy mintavevő jel kerül. A szorzás eredményeképpen előálló jel megegyezik az első modell kimeneti jelével (3. ábra).

Ez a modell a mintavételezés matematikai vizsgálatát teszi lehetővé.



3. ábra: A mintavételezés elméleti modellje

A mintavételezés vizsgálatánál elsődleges kérdés, hogy milyen kritérium adódik a mintavételi impulzusok T periódusidejére (ezzel egyenértékű az első modell szerinti kapcsoló T körülfordulási ideje). A T periódusidő helyett többnyire a vele egyenértékű mintavételi frekvenciát adják meg.

A mintavételezés matematikai leírásához egy kis (vagy nagyobb?) kitérőre van szükség. Meg kell vizsgálnunk, hogyan írhatóak le a jelek általánosan, és hogyan kezelhető a szorzás. A vizsgálatot a **frekvenciatartományban** fogjuk elvégezni.

Tetszőleges periodikus jel felbontható szinuszos és koszinuszos jelek összegére a Fourier sorfejtési tétel alapján. A tétel szerint az időfüggő, T szerint periodikus f függvény olyan szinuszos és koszinuszos összegeként írható fel, amelyek frekvenciája rendre a periodikus jel frekvenciájának (a T periódusidő reciprokanak) egész számú többszöröse:

$$f(t, T) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cos(i\omega t) + B_i \sin(i\omega t) \quad (1)$$

ahol:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t, T) dt$$

$$A_i = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t, T) \cos(i\omega t) dt \quad (2)$$

$$B_i = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t, T) \sin(i\omega t) dt$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

A felbontást komplex alakban is megtehetjük:

$$f(t, T) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_i e^{j\omega t} \quad (3)$$

ahol

$$C_i = \frac{A_i - jB_i}{2} \quad (4)$$

Mivel a jelet most különböző frekvenciájú szinuszok és koszinuszok összegeként tekintjük, ábrázolhatjuk az összetevőket a frekvencia függvényében. Az így nyert ábra a jel spektruma, a felbontást nevezik spektrális felbontásnak is. A C_i együttható abszolút értékének a frekvencia függvényében való ábrázolása az amplitúdó függvényt, a C_i fázisának a frekvencia függvényében való ábrázolása pedig a fázisfüggvényt adja meg.

Amennyiben a vizsgált függvény nem periodikus, a spektrális felbontás nem a Fourier sorfejtéssel, hanem a Fourier integrál segítségével végezhető el. Ilyen esetben a jel spektruma a frekvenciatartományban nem diszkrét lesz, mint periodikus jelek esetén, hanem folytonos.

A Fourier integrál:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

és

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

Tulajdonképpen itt semmi más nem történt, mint a Fourier sorfejtés diszkrét összegzését integrálba vittük át. Ebben az esetben F a jel spektruma, tartalmazva az amplitúdó- és a fázisinformációkat is.

A jel spektrumának ismerete azért kiemelten fontos, mert a frekvenciatartományban jó néhány átalakítás (pl. szűrések) könnyebben vizsgálható, mint az időtartományban.

A következőekben a szorzás frekvenciatartománybeli hatását vizsgáljuk: Vezessünk egy szorzóáramkörre egy koszinuszos f jelet és egy vivőjelnek nevezett másik koszinuszos v jelet.

$$\begin{aligned} f(t) &= \hat{f} \cos \omega t \\ v(t) &= \hat{v} \cos \omega_v t \end{aligned} \quad (7)$$

A szorzóáramkör kimenetén az alábbi jel jelenik meg:

$$f(t) \cdot v(t) = \hat{f} \cos \omega t \cdot \hat{v} \cos \omega_v t \quad (8)$$

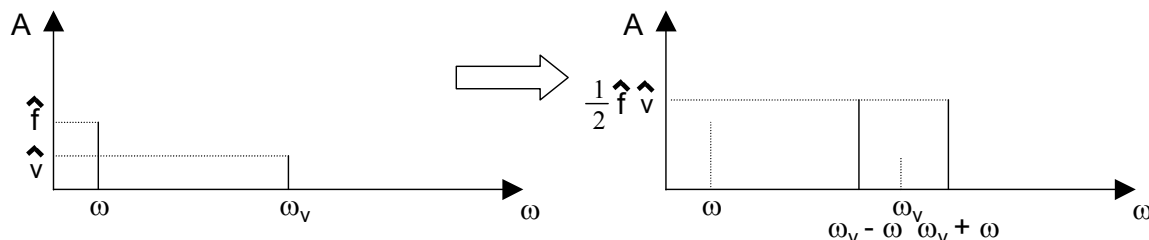
Két koszinuszos jel szorzatára alkalmazhatjuk a klasszikus trigonometrikus átalakítást:

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) \quad (9)$$

és így:

$$v(t) \cdot f(t) = \hat{v} \cos \omega_v t \cdot \hat{f} \cos \omega t = \frac{1}{2} \cdot \hat{v} \cdot \hat{f} \cdot \cos(\omega_v - \omega) + \frac{1}{2} \cdot \hat{v} \cdot \hat{f} \cdot \cos(\omega_v + \omega) \quad (10)$$

Az eredményt értelmezve azt láthatjuk, hogy a szorzás előtt rendelkezésünkre állt két, egyedi frekvenciájú jel, amelyből egy két komponenst tartalmazó eredményjel származik, de ebben a jelben más frekvenciájú komponensek vannak, mint az eredeti jelekben (4. ábra).

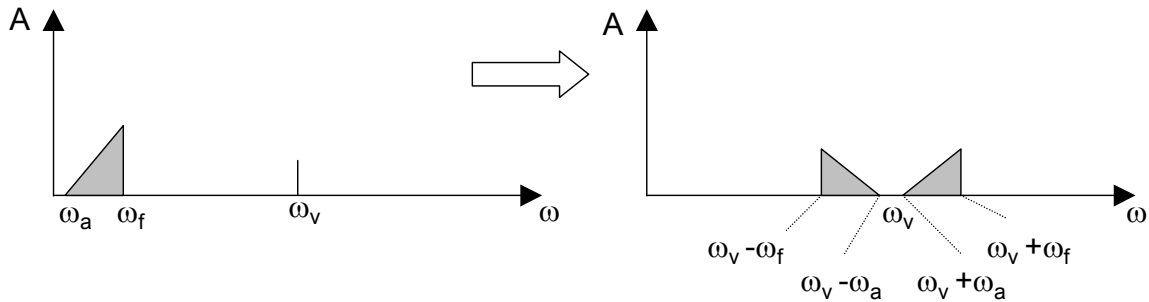


4. ábra: Koszinuszos jelek szorzása

Amennyiben a szorzóáramkörre vezetett f jel nem koszinuszos, hanem attól eltérő (nem feltétlenül periodikus) jel, akkor ezt a jelet Fourier sorfejtéssel vagy Fourier integrállal egyedi szinuszos komponensekre bonthatjuk és ezekre az egyedi komponensekre alkalmazhatjuk a fent bemutatott szorzási szabályt.

Tételezzük fel, hogy f alul és felül sávhatárolt jel, de az amplitúdó függvényéről többet nem tudunk. (Tipikusan ilyen jel a beszédjel.) Ekkor a szorzás az 5. ábra szerint alakul.

Ezek után lehetőségünk nyílik megvizsgálni a mintavételezés 2. modelljét. Itt a szorzóáramkör egyik bemenő jeléről (a mintavételezendő, vagy analog jelről) csak annyi információval rendelkezünk, hogy sávhatárolt. A másik jel, a mintavevő jel periodikus négyszögjel. Ezt a jelet Fourier sorfejtéssel átalakíthatjuk (11).

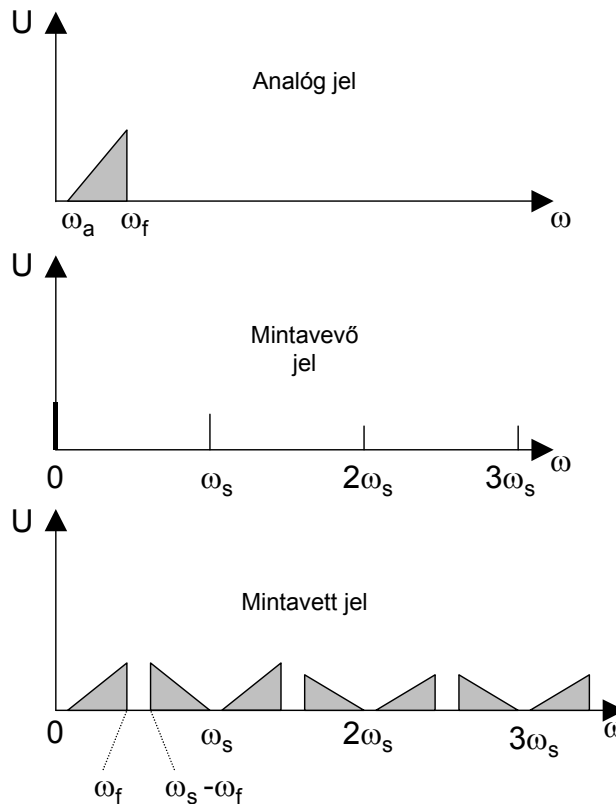


5. ábra: Adott spektrumú jel szorzása szinusszal

$$s(t) = \frac{\tau}{T} \left(1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin \pi i \frac{\tau}{T}}{\pi i \frac{\tau}{T}} \cdot \cos \left(i \frac{2\pi}{T} t \right) \right) \quad (11)$$

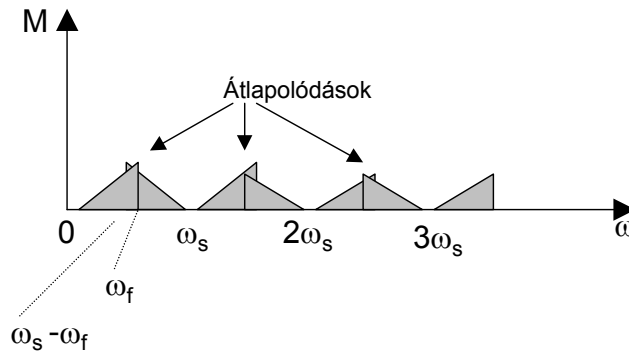
A mintavevő jel most koszinuszok összegeként áll elő. A szorzást ez esetben elvégezhetjük tagonként: olyan helyzet állt elő, mintha egy sávhatárolt jelet több, különböző frekvenciájú szinuszos jellel szoroznánk.

Az egyes szinuszos jellel való szorzások rendre úgy viselkednek, ahogyan azt a szorzás tárgyalásánál már láttuk: eltolják a spektrumot. Mivel a kapcsolójelnek van nulla frekvenciás komponense is, az analog jel eredeti frekvenciatartományában is megjelenik spektrumkomponensként a mintavett jelben (6. ábra).



6. ábra: Mintavételezés

A mintavett jelből maradéktalanul akkor állítható vissza az eredeti analóg jel, ha a szorzás után nincsenek spektrumátlapolódások. Spektrumátlapolódáskor ugyanis az azonos frekvenciájú komponensek összeadódnak, és többet nem választhatóak szét (7. ábra).



7. ábra: Nem megfelelő mintavételi frekvencia esetén előálló átlapolások

Az átlapolódás elkerülhető, és a tökéletes visszaalakítás lehetséges, ha teljesül:

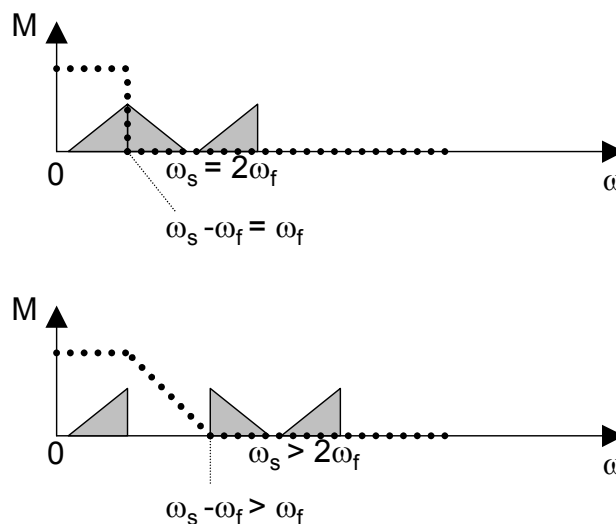
$$\omega_s \geq 2\omega_f \quad (12)$$

A mintavételi frekvenciának a mintavett jel legmagasabb frekvenciájú komponensének kétszeresénél nagyobbnak vagy azzal egyenlőnek kell lennie.

Nyquist tétel: Az ω_f sávhatáru analóg jel mintavételezéséhez (a tökéletes visszaállíthatóság miatt) $2\omega_f$ körfrekvenciájú mintavétel szükséges.

Shannon-Kotelnikov tétel: Az ω_f sávhatáru analóg jel egyenközű, $2\omega_f$ körfrekvenciával vett mintáiból az analóg jel torzításmentesen visszaállítható aluláteresztő szűrővel.

A mintavételi frekvenciát nem célszerű a sávhatár kétszeresére választani, mert így a visszaalakító aluláteresztő szűrő áteresztő és zárási tartománya között végtelen meredekségű átmenetre volna szükség (8. ábra).



8. ábra: Az eredeti jel kiszűrése a mintavett jel spektrumából

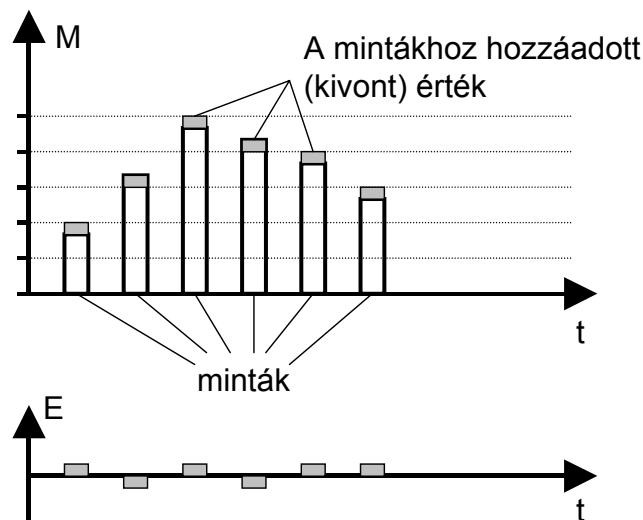
Példa1: A telefonátvitelnél a beszéd sávhatára 3400Hz, digitális átvitelnél a mintavételi frekvencia 8000Hz.

Példa2: CD minőségű hang esetén a sávhatár 20kHz, a mintavételi frekvencia 44kHz.

Kvantálás

A mintavett jel ugyan csak bizonyos időpillanatokban van értelmezve, de amikor értelmezett, akkor tetszőleges értéket felvehet. A teljes digitalizáláshoz (bármilyen bináris vagy gépi reprezentáció előállításához) a lehetséges jelértékek számát véges számúra kell lecsökkenteni. A szintek számának csökkentése a kvantálás.

A kvantálás során az analóg jeltartományon belül kvantálási szinteket jelölünk ki, és az analóg minták értékeit mindig a legközelebbi kvantálási szintre kerekítjük. Ez azt jelenti, hogy bizonyos esetekben a minta értékét csökkentjük, bizonyos esetekben növeljük. A minta megváltoztatása után azonban nem lesz arról információnk, hogy mennyivel kellett növelni vagy csökkenteni az eredeti minta értékét ahhoz, hogy az a kvantálási szintre kerüljön, tehát az átalakításunk nem lesz visszaalakítható. Mivel az átalakítás nem visszaalakítható, a változtatást mint a jelet terhelő zajt is felfoghatjuk (9. ábra).



9. ábra: Kvantálás és a kvantálási zaj

A kvantálási zaj annál kisebb, minél több kvantálási szintet jelölünk ki, mert a szintek számának növelésével csökken a köztük lévő távolság és így a kerekítési érték is.

A szintek kijelölésénél két technikát alkalmaznak:

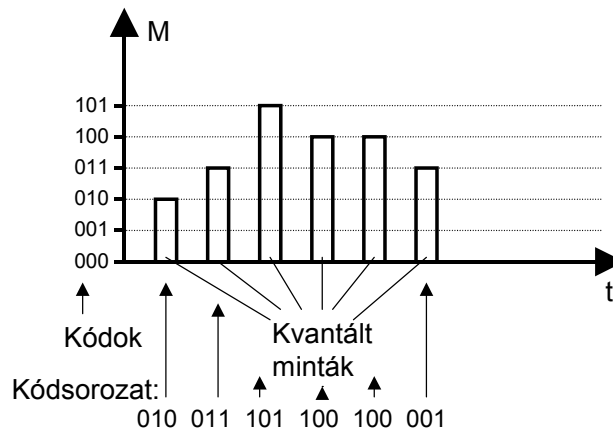
Lineáris kvantálásnál a szintek között azonos távolság van. Ilyenkor egyforma abszolút értékű kvantálási zaj terheli a kicsi és a nagy amplitúdójú jeleket is. Ez beszéd vagy zene jellegű információnál hátrányos – nagy hangerőnél nem zavaró a zaj, de kis hangerőnél igen. Ezért szokás másik eljárásként a nemlineáris kvantálást használni. Nemlineáris kvantálásnál a szintek közötti távolság a nagyobb amplitúdók felé növekszik, így a nagyobb amplitúdóknál nagyobb lesz a zaj abszolút értéke is, de a zaj relatív értéke állandó lesz.

Kódolás

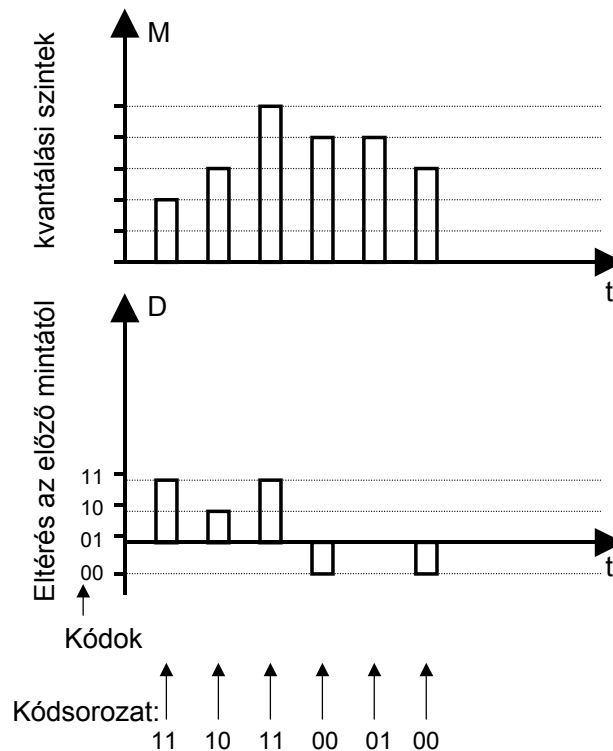
A kódolás feladata a véges sok kvantálási szinthez bináris kódokat rendelni. Alaptechnikája a PCM (Pulzus Kód Moduláció). Ennél az eljárásnál minden lehetséges kvantálási szinthez egyedi kódsorozatot rendelnek, és azt továbbítják vagy dolgozzák fel (10. ábra).

Lehetőség van azonban arra is, hogy ne a minta értékét, hanem az előtte lévő mintától való eltérését továbbítsák. Ekkor várhatóan kevesebb bitre lesz szükség az átvitelhez. Ezt a módszert differenciális PCM-nek (DPCM) nevezik (11. ábra).

A DPCM módszert még tovább lehet fejleszteni. Az aktuális mintát nem az előző mintához, hanem az előző mintasorozat alapján meghatározott, un. előre jelzett mintához hasonlítják, és az eltérést kódolják, majd továbbítják. Amennyiben az előrejelzési algoritmus jó, tovább csökkenthető a kódolási bitszám. Ez a módszer az előrejelzéses PCM.



10. ábra: PCM kódolás



11. ábra: DPCM kódolás

Analog-digitális és digitális-analog átalakítók gyakorlati megvalósításai

A korábbiakban bemutatott analog-digitális konverziós elmélet megvalósítására a gyakorlatban néhány elv terjedt el. Ezek mindegyike úgy rendel a bemenő feszültséghez kódot, hogy a kód által kiadott kettes számrendszerbeli szám arányos legyen a bemenő feszültséggel:

$$Z = \text{int} \left(\frac{U_{be}}{U_{LSB}} \right) \quad (13)$$

ahol U_{LSB} a legkisebb súlyú bithez tartozó feszültségegység (Least Significant Bit, LSB), tehát a $Z=1$ -hez tartozó feszültség, illetve az elmélet szerint a kvantálási szintek közötti távolság. A képletben az *int* egészrész függvény testesíti meg a tényleges kvantálást.

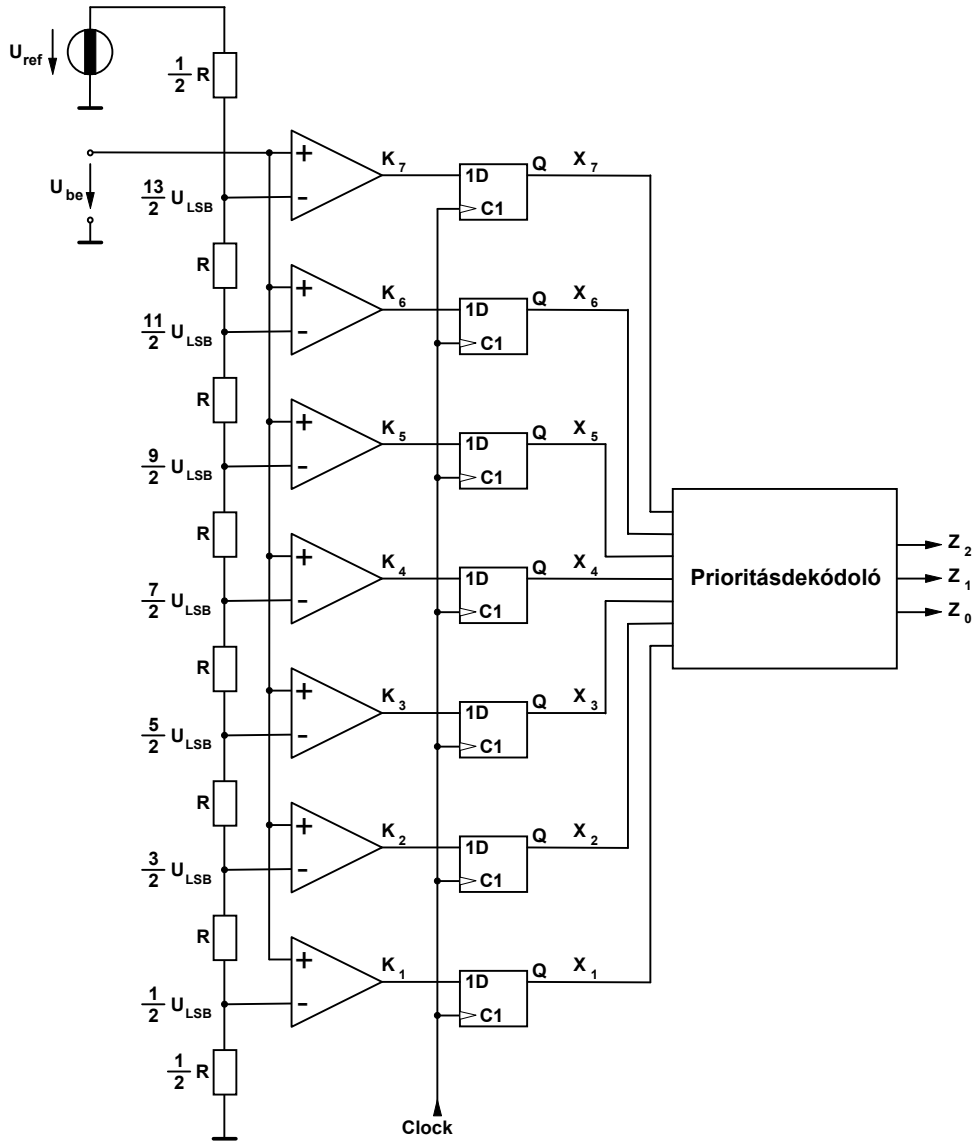
A visszaalakításnál következésképpen a kimeneti feszültségnek arányosnak kell lennie a Z számmal:

$$U_{ki} = Z \cdot U_{LSB} \quad (14)$$

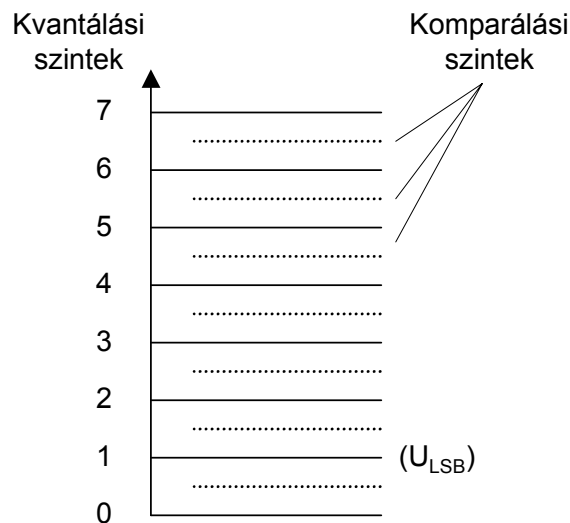
A leggyorsabb átalakítást a **közvetlen** AD átalakítók biztosítják (12. ábra). A bemeneti feszültség $N-1$ darab komparátorra kerül rá egyidejűleg, ahol N a lehetséges kvantálási szintek (nem pedig a kódolásra szolgáló bitek) száma. A komparátorok referenciafeszültsége mindig két kvantálási szint közé van beállítva (13. ábra). Ezt a 12. ábra szerint egy referenciafeszültség-forrás jelének nagy pontosságú leosztásával lehet előállítani.

A komparátorok analog áramkörök, ennek következtében nagyon kis késleltetési idő mellett jelenik meg a kimenetükön az aktuális bemeneti analog értékhez tartozó kód. Ez a kód azonban nem alkalmas közvetlenül további feldolgozásra, mert azt tartalmazza N biten, hogy a bemenő jel hány komparálási szintet haladt meg. Az átalakítás második lépése a komparátorok jelének átkódolása n bitre, ahol $N=2^n$. Az átkódolás lehet folyamatos, vagy lehet órajellel vezérelt, mint a 12. ábrán bemutatott megoldás, a változási tranziensek kiszűrése érdekében. Az átkódolást ún. prioritásdekóder végzi: ez az egység a bemeneteire kerülő logikai 1-esek közül mindig a legmagasabb helyiértékűnek megfelelő kódot állítja elő.

A 12. ábrán egy hárombites, 8 lehetséges értékkel dolgozó AD átalakító került bemutatásra. A 8 szint megvalósításához 7 komparálási szintre, következésképpen 7 komparátor áramkörre volt szükség. Egy ma már kis felbontásúnak számító 8 bites AD átalakítónál 256 lehetséges szint van, 255 komparátorra lenne szükség a megvalósításához. Az iparban elterjedten alkalmazott 12 bites AD-k 4096 szinttel dolgoznak, 4095 komparátor egybeintegrálásával lennének megvalósíthatóak közvetlen átalakításos módszerrel. Ez az egyszerű számítás mutatja a közvetlen átalakítás hátrányát: nagy alkatrészigényű, következésképpen az ilyen elven felépített áramkörök drágák. Ugyanakkor meg kell még egyszer jegyezni az előnyüket: ezek az átalakítók képesek a legnagyobb átalakítási sebesség biztosítására.



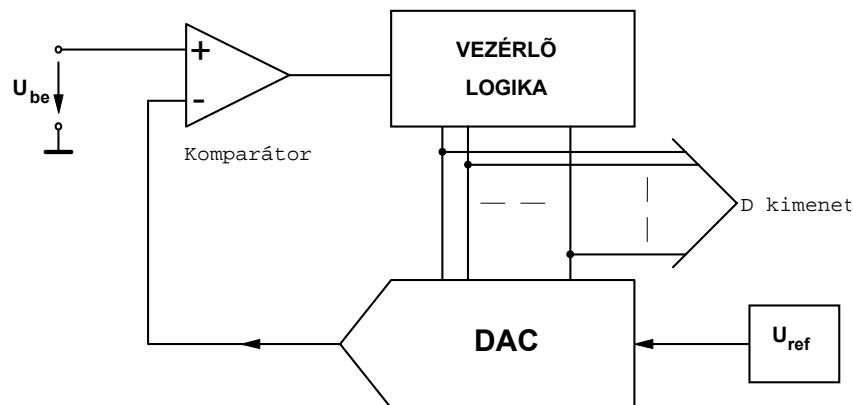
12. ábra: Közvetlen AD átalakító sémája



13. ábra: A kvantálási és a komparálási szintek kapcsolata a közvetlen AD átalakítónál

Amint láttuk, a közvetlen átalakítási elven működő AD konverter problémája a sok szükséges komparátor. Felmerül átalakítási ötletként, hogy használjunk egy komparátort a bemeneti feszültség és egy másik feszültség összehasonlítására, de a másik feszültség ne fix érték legyen, mint a közvetlen átalakítás komparátorainál, hanem változó érték – változtassuk mi ezt az értéket a lehetséges komparálási szintek közül válogatva. Az ilyen AD átalakító kevesebb alkatrészt tartalmaz, mint a közvetlen átalakítási elvű, de hátrányként jelentkezik, hogy lassabb lesz, mivel a komparálási szintek változtatására van szükség a bemenő feszültségnek megfelelő kód előállításához. Ezt az elvet **kompenzációs** átalakításnak nevezzük.

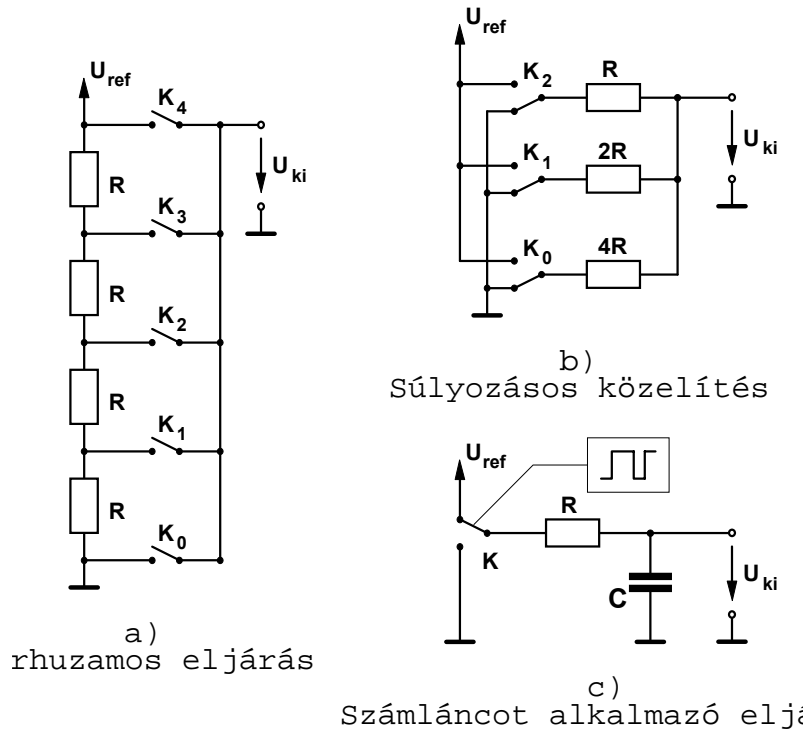
A közelítő átalakítás elvén működő AD konverterek között jelentős megvalósítási különbségek mutatkoznak egyrészt a változtatható komparálási feszültség előállítás módját, másrészt a komparálási feszültség változtatási algoritmusát illetően. A komparálási feszültség előállítható pl. DA konverter segítségével (14. ábra) amelynek elve párhuzamos feszültségosztás vezérelhető kapcsolókkal (ennél az elvnél mindig csak egy kapcsoló lehet zárva, így feszültségosztással biztosítható a kívánt kimeneti feszültség) (15/a ábra), súlyozásos feszültségosztás vezérelhető kapcsolókkal (itt az egyes kapcsolók bekapcsolása adott értékű áram létrejöttét jelenti, ha a kimeneti feszültség pontja virtuális földpont, pl. invertáló műveleti erősítő alapkapcsolás) (15/b ábra), illetve egy darab vezérelt kapcsolót tartalmazó, ún. számláncos módszert megvalósító kapcsolás (15/c ábra), amelynél egy kondenzátort töltünk fel a kapcsoló bekapcsolási idejének megfelelően egy adott feszültségre.



14. ábra: Kompenzációs AD átalakító sémája

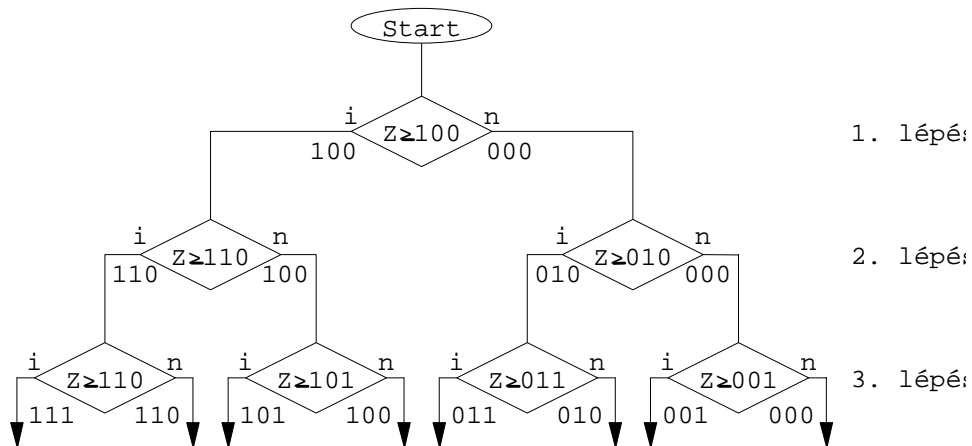
Bármelyik hardver kialakítást alkalmazzák is, a működési elv közös: addig kell változtatni (növelni) a komparálási szintet, ameddig még éppen a bemeneti feszültség alatt marad.

Az átalakítás sebességét jelentősen befolyásolja a változtatás mikéntje. A legegyszerűbb megoldásban minden konvertálási ciklusban a legkisebb értéktől indítják a referenciafeszültséget, és a korábban már bevezetett U_{LSB} értékével addig növelik, ameddig a komparátor azt jelzi, hogy a bemeneti feszültség még magasabb ennél az értéknél. Az ilyen átalakítás időigénye nagyon nagy.



15. ábra: Referenciafeszültség előállítás kompenzációs AD átalakító komparátora számára

Kedvezőbb átalakítási idő érhető el, ha a komparálási feszültséget először a teljes tartomány közepére állítjuk be, majd ha ennél nagyobb a bemenő feszültség, akkor a tartomány negyedével, nyolcadával stb. növeljük a feszültséget. Ha a bemenő feszültség egy adott lépésnél kisebbé válik, mint a komparálási szint, az éppen aktuális növelési értékkel vissza kell csökkenteni a szintet, majd a következő felezett értékkel növelni (16. ábra). Mindkét módszert a **fokozatos közelítés (szukcesszív approximáció)** módszerének nevezzük.



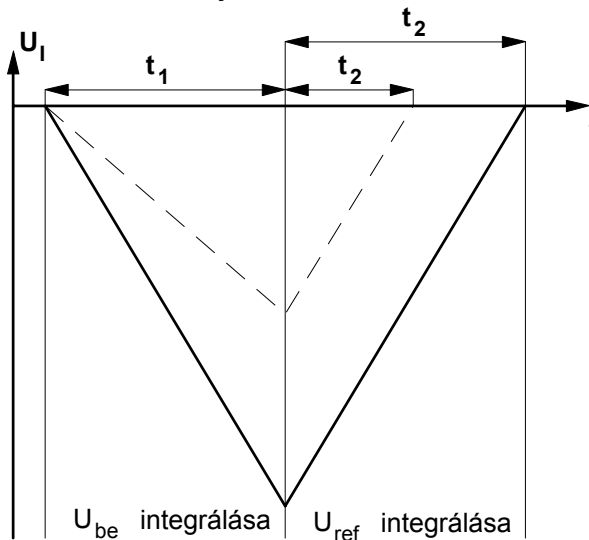
16. ábra: Fokozatos közelítés egy lehetséges algoritmus

Tovább gyorsítható az átalakítási ciklus abban az esetben, ha az egyes átalakítások kezdetén a komparálási szinteket nem a lehető legkisebb értékről, hanem az előző átalakítási lépésben beállított értékről indítjuk. Ebben az esetben azt használjuk ki, hogy a bemeneti jel változási sebessége véges, és várhatóan sokkal kevesebb lépés szükséges a jel követéséhez, mint ismételt eléréséhez. Az ilyen átalakítási elv a **követő közelítés**.

A fenti elvnel lényegesen egyszerűbb (és ebből következően olcsóbb) kialakítást tesz lehetővé a **számláló elv** alkalmazása. Az ilyen elvű AD átalakítóban a komparálási feszültséget az idő függvényében lineárisan növelik (referenciafeszültség integrálása) egészen addig, amíg a bemeneti feszültség értékét el nem éri. A növelés időtartama alatt egy állandó sebességgel növelt számláló értéke mutatja a bemeneti feszültségnek megfelelő digitális kódot (**single slope** átalakítás).

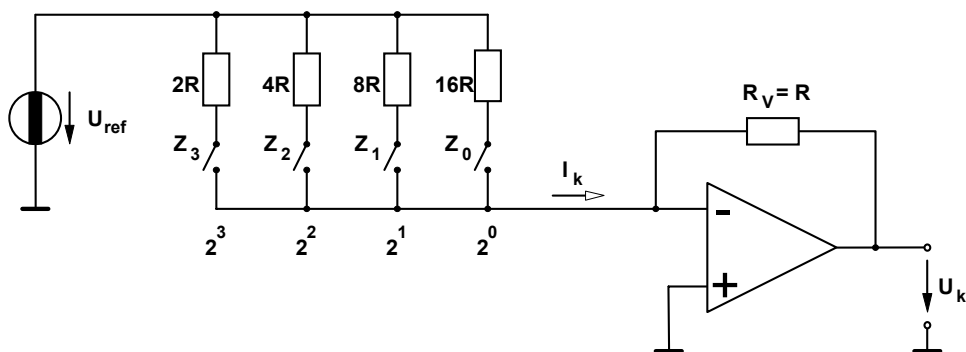
A pontosság az ilyen kialakításokban a megvalósítási elv kismértékű módosításával növelhető. Ilyenkor nemcsak a referenciafeszültséget integrálják, hanem a bemenő feszültséget is: a bemenő feszültség adott ideig (t_1) történő integrálását a referenciafeszültség állandó meredekséggel, megfelelő (t_2) ideig történő, ellenkező előjelű integrálása követi (**dual slope** átalakítás) (17. ábra).

További lehetőség az AD átalakítás megvalósítására a bemeneti feszültség frekvenciaértékké (a bemeneti feszültséggel fordítottan arányos impulzustávolságú impulzussorozattá) konvertálása, majd a frekvencia mérése.



17. ábra: Dual-Slope eljárás

A digitális értékek analóggá konvertálásánál nem találunk annyi egymástól eltérő elvet, mint az analóg-digitális átalakításnál. A leggyakrabban használt, fő alapelv egy referenciafeszültség súlyozottan leosztott, és a digitális értékek megfelelően bekapcsolt értékeinek földpotenciálon vagy virtuális földpotenciálon való összegzését jelenti (18. ábra). Különbségek természetesen találhatóak az egyes megvalósítások között, de ezek már csak a minél nagyobb precizitás elérését célozzák (15/a, b ábrák).



18. ábra: DA konverter alaptípusa

A fentiekől eltérő DA megvalósítási elvet mutat a 15/c ábra, ahol a kimeneti feszültség nem összegzés, hanem megfelelő ideig engedélyezett töltőáram miatt alakul ki.

Bármilyen elvet is alkalmazunk, nem feledkezhetünk meg arról a tényről, hogy a kimenő feszültség a kvantálási hibát mindenképpen magában hordozza. Természetesen minél nagyobb bitszámra történik az átalakítás (minél nagyobb a kvantálási szintek száma), annál kisebb a kvantálási zaj.

Az AD-DA átalakítók témaköréhez javasoljuk a [2] irodalom elolvasását is. Az AD-DA méréshez való felkészüléshez ez elengedhetetlenül szükséges!

Programozható logikai vezérlők

A programozható logikai vezérlő (Programmable Logical Controller, PLC) az ipari szabályozások, illetve vezérlések megvalósítására elterjedten alkalmazott ipari kivitelű mikroszámítógép. Fontos jellemzője, hogy bemeneti és kimeneti egységeinek feszültségszintje illeszkedik az iparban használatos szintekhez. Ezért ezek a be- és kimenetek csak ritkán 5 V-os szintűek (ami a PC-s technikában megszokott): míg az esetek nagy többségében a digitális be- és kimenetek 24, 60, vagy 220 V-osak, az analóg be- és kimenetek feszültségtartománya +/- 24 V. Az ipari kivitel másik jellemzője a környezeti ártalmakkal (por, légszennyezettség) és a mechanikai hatásokkal (ütések, rázkódás) szembeni ellenálló képesség. A PLC-k többnyire moduláris felépítésűek. Ez lehetővé teszi a különböző felhasználói igényekhez való optimális illesztést.

A személyi számítógépek megjelenésekor került előtérbe a számítógépek folyamatirányításra történő felhasználásának gondolata. Mivel a számítógépek rendelkeznek kétállapotú jelek fogadására, ill. kiadására alkalmas egységekkel, digitális vezérlések megvalósítására ideálisak. Ugyanakkor a jel fogadó- és kiadóegységek szintjei nem illeszkednek az ipari szintekhez, és az ipari hatásokkal szemben sem ellenállóak. A kezdeti időszakban a számítógépek ára is igen magas volt, így nem lehet csodálkozni azon, hogy megjelentek a speciálisan folyamatirányításra kifejlesztett mikroszámítógépek, a PLC-k, és nagyrészt ki is szorították ezen az alkalmazási területen a számítógépeket. A PLC-k a számítógépektől nem csak a kialakításban, illetve be- és kimeneti egységekben különböznek: a PLC nem operációs rendszerrel, hanem firmware-rel rendelkezik. A firmware hasonló a számítógép boot EPROM-jában tárolt programhoz: feladata a hardver elemek kezelése (önteszttek, ciklikus lekérdezés, paraméterátadás stb.), valamint a felhasználói program futtatása. A számítógép ezzel szemben operációs rendszerrel rendelkezik, amely biztosítja a felhasználó és a gép közötti mindenkori interaktivitást. Ez az interaktivitás (illetve ennek lehetősége) a PLC-k esetén nincs meg. Ezen túl a számítógép alkalmas a rajta futtatandó vezérlőprogramok fejlesztésére is, míg a PLC-k vezérlőszoftverét magán a PLC-n nem lehet fejleszteni. A másik eltérés a PLC-k és a számítógépek között a megjelenítésben található. A számítógép szabványos megjelenítőfelülettel (monitor) rendelkezik (ez még akkor is igaz, ha egy alkalmazásban ténylegesen monitor nélkül használják), míg a PLC-k többnyire nem, vagy csak korlátozott kijelzésre képes megjelenítőeszközzel rendelkeznek.

Manapság az egészen bonyolult, nagy adathalmazzal operáló, nagy sebességigényű folyamatvezérléseknél használnak speciális folyamatirányító számítógépeket.

A PLC-ket kedvező jellemzőik az alábbi területeken teszik alkalmassá irányítási funkciók elvégzésére:

- Kis irányítási feladatok.
A kompakt kivitelű, mini PLC-k alacsony árak miatt már 5-10 relét igénylő hagyományos megoldások kivitelezésénél is gazdaságosan válthatják ki a relés vezérlést.
- Bonyolult, összetett feladatok.
A nagy teljesítményű, bonyolult számítások elvégzésére képes PLC-k jelentik a megoldást az olyan vezérléseknél, ahol a relés technika alkalmazása már nem, vagy csak nehezen vezet eredményre. Ezek a nagyteljesítményű PLC-k már közel állnak a folyamatirányító számítógépekhez.
- Gyakran módosuló feladatok.
Mivel a PLC a memóriájában tárolt program végrehajtásával oldja meg a feladatot, a feladat módosulása esetén legtöbbször elég a programot módosítani, ami gyorsabb és olcsóbb, mint egy huzalozott vezérlőáramkör átalakítása.
- Területileg elosztott feladatok.
A nagyobb, moduláris PLC-k esetében lehetőség van arra, hogy az I/O (input/output) modulokat a vezérlési helyek (az irányított folyamat) közelében helyezzük el, és ezek a modulok a központi egységgel egy kábelon keresztül kommunikáljanak. Így a rendszer kábelezési költségei jelentősen csökkenthetők ahhoz képest, mintha minden egyes I/O jelet egyenként kellene a központi egységhez vezetni.

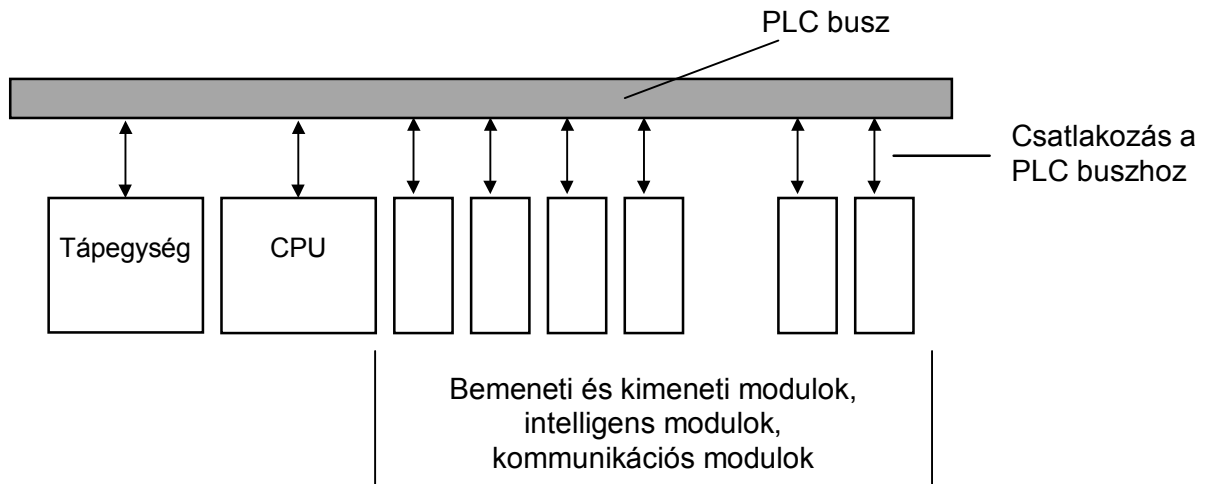
A következő részben sorra vesszük az általános felhasználási célú PLC-k funkcionális elemeit. Moduláris kialakítás esetén ezek a funkcionális egységek általában külön modulokban helyezkednek el, míg kompakt kivitelnél akár az egész PLC egy közös egységben található.

Egy PLC rendszerben az alábbi egységeket találhatjuk meg (19. ábra):

- Központi feldolgozó egység (CPU),
- Tápegység,
- Bemeneti és kimeneti egységek (I/O),
- Intelligens egységek,
- Kommunikációs egységek.

A központi feldolgozó egység (Central Processing Unit, CPU) a PLC "agyja". Futtatja a felhasználói programot és vezérli a további egységeket. A központi vezérlőegység címezi a kimeneti és a bemeneti egységeket, parancsokat ad a rendszerben lévő intelligens feldolgozóegységeknek. A felhasználói program vagy RAM-ban, vagy nem felejtő memóriában (EPROM, EEPROM, Flash) van tárolva. A program fejlesztése személyi számítógépen történik, és a kész programot (már a CPU processzorának gépi kódjában) viszik át a későbbi tárolóeszközbe. Egyes PLC-k speciális, előlapi programozási lehetőséggel is rendelkeznek.

A tápegység feladata, hogy a hálózati feszültséget a PLC számára átalakítsa és stabilizálja, és így a rendszert a megfelelő feszültséggel ellátja. A legtöbb esetben külön telepeket is tartalmaz, hogy feszültségkimaradás esetén a RAM tartalma megőrizhető legyen.



19. ábra: PLC funkcionális felépítése

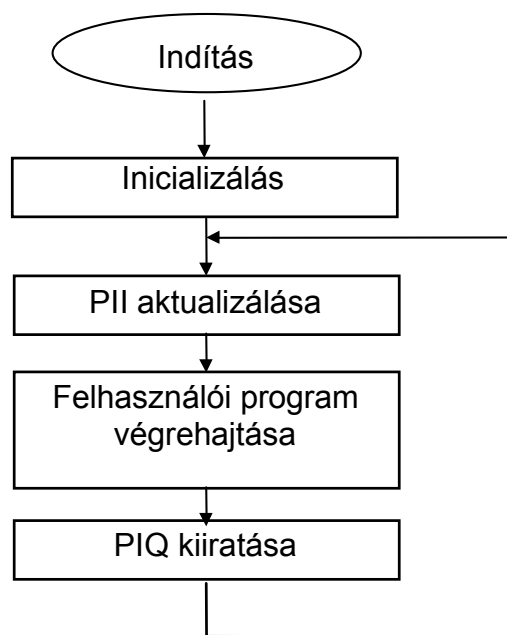
A PLC-k be- és kimeneti pontjai szinte minden esetben galvanikusan le vannak választva a belső buszról, illetve a CPU egységről.

- A digitális bemeneti egységek feladata olyan jelek értelmezése, illetve illesztése a PLC belső szintjéhez, melyek csak két lehetséges állapotot vehetnek fel. Az iparban használatos feszültségekhez igazodva megtalálhatóak a választékban egyen- ill. váltakozófeszültséget érzékelő egységek is. A bemeneti egységek feszültségtartománya is széles skálán mozog, a 24 V-os névleges feszültségűtől a 220 V-os névleges feszültségűig.
- A digitális kimeneti egységek feladata a PLC belső jeleinek átalakítása a környezet számára. Alapvetően kétféle változat található:
 - Relés kimenetű: itt a CPU egy relét vezérel, amelynek az érintkezője van kivezetve. Előnye, hogy segítségével olcsón lehet nagy áramokat kapcsolni, és az áramkörökbe bárhova beilleszthető (ha az egyik pontja nincs pl. földelve). Hátránya, hogy a megvalósítható kapcsolási frekvencia kicsi, kisebb, mint 10 Hz, és a reakcióideje is nagy.
 - Elektronikus kimenetű: itt valamilyen vezérelt félvezető elem kapcsolja a kimeneti feszültséget. Előnye, hogy viszonylag gyors kapcsolásra képes (100 Hz körül) és rövid a reakcióideje. Hátránya, hogy csak megadott helyre illeszthető, pl. az egyik pontot földelni kell, illetve nagy áramokat csak relatíve drága elemekkel lehet kapcsolni.
- Az analóg bemeneti egységek A/D átalakítók segítségével konvertálják digitális kóddá a bemenetre kapcsolt analóg jelet. Az ipari jeltartományokhoz illeszkedve a bemeneti feszültség- vagy áramtartomány több lépcsőben változtatható.
- Az analóg kimeneti egységek a PLC futása során számolt digitális értékeket alakítják át D/A konverter segítségével analóg jellé.

A kommunikációs egységek segítségével valósítható meg a kapcsolattartás más eszközökkel, pl. folyamatirányító számítógéppel vagy printerrel. Szabványos soros vagy párhuzamos interfészt biztosítanak, vagy hálózati kommunikációt tesznek lehetővé.

Az intelligens egységek valamilyen nagy sebességű előfeldolgozást végeznek a bemenő jeleken, nagymértékben tehermentesítve a központi feldolgozó egységet. Ilyen előfeldolgozás lehet pl. számlálás, pozíciófigyelés, hőmérsékletszabályozás stb. A legkülönbözőbb ipari célokra készülnek intelligens egységek, igazodva az egyedi igényekhez.

A PLC-k a felhasználói programot ciklikusan, újra és újra előről futtatva hajtják végre. Ennek oka a felhasználás jellege: a vezérlési feladatokat a gép bekapcsolásától kezdve egészen a kikapcsolásáig el kell látni. Az egyes ciklusokban a felhasználói program előtt és után az operációs rendszer bizonyos részei hajtódnak végre. A 20. ábra mutatja a programvégrehajtás folyamatát.



20. ábra: a PLC-k programvégrehajtási ciklusa

A logikai vezérlő bekapcsolása és az inicializálások (indítási tesztek, tároló törlések stb.) végrehajtása után egy olyan ciklusba kerül, amelyből csak kikapcsoláskor fog kilépni. A ciklus a következő 3 tevékenységből áll:

1. A bemenetek értékeinek beolvasása és tárolása a memória egy előre rögzített, a rendszer által kezelt területén. Ez a művelet azzal az előnnyel jár, hogy a felhasználói program egy ciklusának futása közben hiába változnak meg a környezet jelei, ezt a program nem érzékeli, így nem léphetnek fel házardjelenségek. A környezet változását így a felhasználói program csak mindig egy új lefutás, egy új ciklus kezdetén érzékeli. Ennek megfelelően a felhasználói program szervezése speciális elveket követ: a programon belüli ciklusok megvalósításánál a fenti beolvasási elvet figyelembe kell venni! A memória azon területének a neve, ahol a beolvasott értékeket a rendszer tárolja, "bemeneti folyamatkör", angolul Process Input Image (PII).
2. A felhasználói program végrehajtása. A processzor a végrehajtandó utasításokat egymás után olvassa ki a memóriából. A felhasználói program a bemenetek értékét a PII-ből veszi, és a számolt eredményeket nem közvetlenül írja ki a kimeneti egységekre, hanem szintén a memória egy

területére teszi le. Ennek a területnek a neve "kimeneti folyamatkép", angolul Process Output Image (PIQ).

3. A PIQ-ban tárolt értékek kiírása a kimeneti egységekre. Így minden kimenet egyszerre vált értéket, és e mellett elkerülhetők a programcikluson belüli, egy kimeneti pontnál jelentkező tranziensek is.

Ha időzíteni vagy egyéb okokból szükség van egy bemenet adott pillanatbeli értékének használatára, vagy egy kimenet azonnali beállítására, ez megtehető a PII és a PIQ megkerülésével. Ezekre az esetekre speciális utasításokat lehet használni.

A PLC-k általában többféle módon programozhatók. Mindegyiknél megtalálható az ún. utasításlistás programozási mód, ahol a feladatmegoldás lépéseit a PLC által értelmezhető "mondatokban" írjuk le (21. ábra). Ilyen módon használhatjuk ki legteljesebben a CPU által felkínált lehetőségeket.

Az utasításlistás programozási mód mellett (melyet általában a gyakorlottabb programozók kedvelnek), szinte mindig megtalálható valamilyen grafikus programszerkesztési mód is. Az első lehetőség, hogy logikai elemeket (ÉS, VAGY kapukat, késleltetőket, számlálókat stb.) kapcsolhatunk össze, mintegy áramköri rajzzal definiálva a programot (22. ábra). Az így keletkezett rajzot egy fordítóprogram fordítja le a PLC gépi kódjára. Ez a programozási mód a digitális technikában járatosak számára kedvező. A második grafikus lehetőséggel élve ún. létradiagrammos, vagy más néven áramutas rajzokat készítünk, reléérintkezők és jelfogótekercecsek alkalmazásával (23. ábra). Így egy már korábban jelfogós technikával megoldott feladat elvégzését programozhatjuk be könnyen és gyorsan anélkül, hogy a "rég" jelfogós kapcsolási rajzot át kellene kódolni. Itt szintén fordítóprogram végzi el az átkódolást.

Nézzünk példát mindhárom metódusra! A programozandó logikai függvény legyen az alábbi:

$$Q2.0 = (I 2.3 + I 2.4) * (I 3.3 + (I 3.4 * I 3.5))$$

ahol Q x.y egy kimeneti változót jelent (byte.bit jelöléssel) és

ahol I x.y egy bemeneti változót jelent (byte.bit jelöléssel).

A 21., 22. és 23. ábrákon bemutatott programok STEP 5 programnyelvben íródtak.

A példákban PB231 a 231. programblokkot jelenti a programon belül. (Hasonlóan a Pascal programnyelv "Procedure" eleméhez.)

C:PROBA1ST.S5D a programfájl neve, amelyik PB231-et tartalmazza.

A LEN=18 adja meg a blokk hosszát (LEN: lenght).

A Segment 1 felirat azt mutatja, hogy a programblokk első szegmensében vagyunk (a blokkokon belül további különválasztást tesz lehetővé a szegmensek használata).

BE jelentése: a blokk vége (block end).

PB 231 C:PROBA1ST.S5D LEN=18

Segment 1

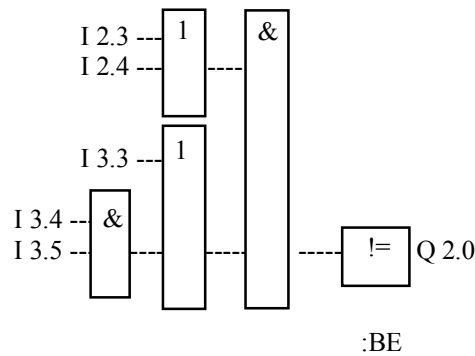
```

:A(
:O I 2.3      01
:O I 2.4      01
:)           01
:A(
:O I 3.3      01
:O           01
:A I 3.4      01
:A I 3.5      01
:)           01
:= Q 2.0
:BE
    
```

21. ábra: Utasításlistás programozási mód

PB 231 C:PROBA2ST.S5D LEN=18

Segment 1



22. ábra: Blokkdiagrammos programozási mód

PB 231 C:PROBA3ST.S5D LEN=18

Segment 1

```

!
! I 2.3 I 3.3 Q 2.0
+---] [---+---] [---+-----+-----+-----+-----+-----+---( )-!
! ! !
! I 2.4 ! I 3.4 I 3.5 !
+---] [---+---] [---+---] [---+
!
!
!
:BE
    
```

23. ábra: Létradiagrammos vagy áramutas programozási mód

Ajánlott irodalom

1. Híradástechnika. Főszerkesztő: Géher Károly. Műszaki Kiadó, Budapest, 1993.
2. Digitális – Analóg (D/A) és Analóg – Digitális (A/D) átalakítók. Segédlet az Irányítástechnika I. című tantárgyhoz. Összeállította: Dr. Hrivnák István.
<http://www1.kka.bme.hu/~irtech/l1/adda.zip>
3. Programozható logikai vezérlők. Segédlet az Irányítástechnika I. című tantárgyhoz. Összeállította: Szabó Géza.
http://www1.kka.bme.hu/~irtech/l1/plc_ea.zip