

A/D és D/A konverterek

Általában egy objektumon elvégzett méréshez szükséges a mérendő tárgy gerjesztése, aminek hatására a tárgy válaszokkal reagál. Ezen válaszok közül kell kiválasztanunk a minket érdeklő részválaszokat és ezeket vezetjük a mérőműszerbe. A mérőműszer előtt a legtöbb esetben mérőátalakító (szenzor, detektor) van, ami olyan fizikai mennyiséggé alakítja a mérendő válaszjelet, ami közvetlenül kijelelezhető.

Általában a mérési eredményt nem egyetlen mért adattal adjuk meg, hanem több mérést végzünk, hogy átlagértéket és szórást is megadhassunk. Emellett gyakran lehet szükség arra, hogy a gerjesztést változtassuk és minden adott gerjesztéshez megmérjük a rendszer válaszát. Ilyen feladat például egy dióda áram-feszültség karakterisztikájának felvétele, amikor a dióda végpontjaira különböző feszültségeket kötünk és megmérjük az átfolyó áramot. A mérést persze nem végezhetjük el minden lehetséges feszültség esetére, ezért a mérési adatokra illesztjük az elméleti formulát, így teljesen meghatározzuk az $I(U)$ függvényt tetszőleges U értékre (természetesen csak egy adott tartományon belül).

Már ebből is látszik, hogy egy ilyen egyszerű mérési feladat is sok elemi mérési, számolási művelet elvégzését igényli. Ennél természetesen lényegesen bonyolultabb feladatok is gyakran előfordulnak a mérések során. A számítások, adatfeldolgozások leghatékonyabban digitális technikával (logikai áramkörökkel, mikroprocesszorokkal, számítógépekkel) végezhetőek el. Egyértelmű

tehát, ha a mérőműszerek és gerjesztések is digitálisan kezelhetők, akkor nagyon nagy hatékonysággal végezhető el a mérési és vezérlési, automatizálási folyamatok. Emellett igaz az is, hogy például egy számítógéphez illesztett mérő és vezérlő rendszer sokféle mérőeszközt realizálhat; pusztán a mérőprogram megváltoztatása révén alkalmas lehet ugyanaz a rendszer például karakterisztikák mérésére, de akár szabályozási vagy más jellegű mérési feladatok elvégzésére is. A digitális jelábrázolásnak nagyon nagy előnye még a kiváló továbbíthatóság és tárolhatóság is. Természetesen mérési és vezérlési feladatok a hétköznapi és ipari életben is találhatóak, mint például hőmérsékletmérés, sebességmérés, hőmérsékletszabályozás, hangrögzítés és továbbítás, hogy csak néhányat említsünk.

Az úgynevezett analóg mérési elvek mellett ezért kifejlesztették a digitális mérési módszereket, aminek alapelemei az analóg és digitális mennyiségek között átalakítást elvégző analóg-digitál konverterek és digitál-analóg konverterek. Ma mindennapnak mondható ezeknek az eszközöknek az alkalmazása nemcsak mérőműszerekben, de hétköznapi használati eszközökben is. Példaként említhetjük meg a digitális multimétereket, digitális hőmérőt, digitális magnót és CD lemezjátszót, telefaxot, mobiltelefonokat, műholdas adatátvitelt, orvosi műszereket. A digitális eszközök és módszerek kifejlesztésének köszönhető a PC-s multimédia létrejötte is, aminek jellemzője, hogy a számítógép mér és irányít:hangot, képet, telefont, telefaxot, szobák hőmérsékletét, stb. Sok olyan mérési feladat végezhető el ma már digitális módszerekkel, amik azelőtt elképzelhetetlenek voltak. Az alkalmazások köre annyira széles, hogy teljes listát szinte

lehetetlen adni.

A/D és D/A konverterek felépítése, tulajdonságai

Az A/D és D/A konverterek sokoldalúan felhasználható eszközök, melyek lehetővé teszik áram vagy feszültség digitális formába alakítását, és digitális adatoknak megfelelő feszültségek, áramok előállítását. Ha a mérendő mennyiség nem ebben a formában áll rendelkezésre (például nyomás vagy hőmérséklet), akkor megfelelő mérőátalakítót (szenzort, detektort) kell alkalmaznunk. A digitális formának sok előnye van, példaként említhetjük a nagy pontosságot, megbízható adattárolást, jó jelátviteli és jeljavítási lehetőséget és a hatékony digitális adatfeldolgozási és vezérlési lehetőséget.

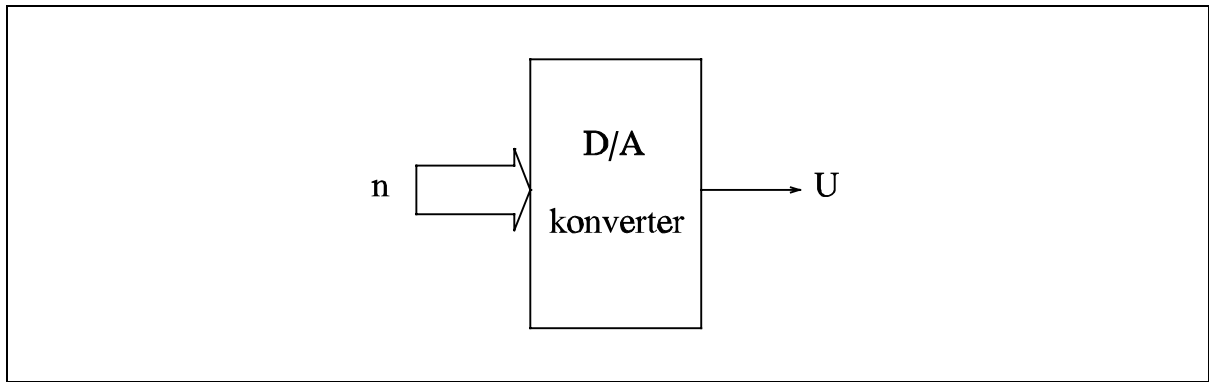
A következőkben röviden áttekintjük a konverterek jellemzőit.

D/A konverterek

A D/A konverter általános feladata, hogy egy egész számmal arányos feszültséget szolgáltatson. A konverzió a következő formula alapján megy végbe

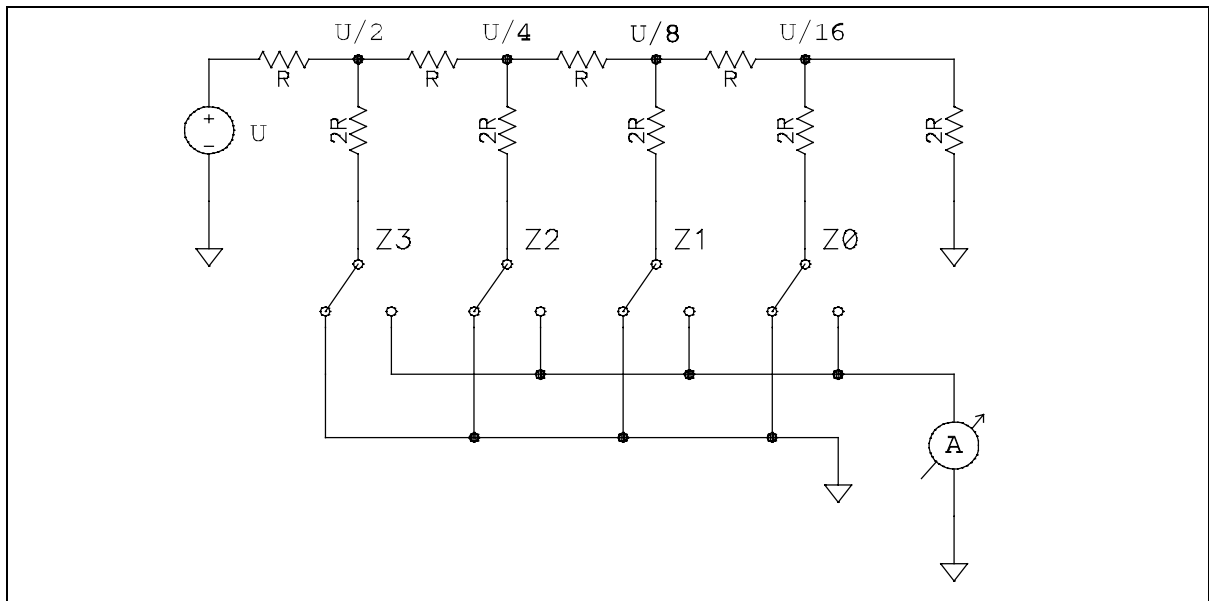
$$U = Z \frac{U_{ref}}{N} = Z \frac{U_{ref}}{2^b} \quad (1)$$

ahol U_{ref} a konverter referenciafeszültsége, $N=2^b$ pedig a konverter pontosságára jellemző egész szám, b a bitek száma. A Z szám értéke 0 és 2^b-1 között lehet. D/A konvertert használhatunk



különböző alakú feszültségjelek előállítására, feszültséggel vezérelhető eszközök számítógéppel való vezérlésére, stb.

A gyakorlati megvalósítások közül példaként a leggyakrabban alkalmazott R-2R ellenálláshálózatos módszert ismertetjük.



A hálózattal előállítjuk az U_{ref} feszültség 2 hatványaival osztott értékeit, mivel minden vízszintes ellenállás után következő rész eredő ellenállása éppen R. A kapcsolók állásától függetlenül minden függőleges 2R ellenállás alsó pontja 0V potenciálon van, ezért az átfolyó áramok az ellenállás felső pontjain mérhető $2^i \cdot U_{ref} / 2^b$ feszültségekkel arányosak, pontosabban

$$I_i = 2^i \frac{U_{ref}}{2R \cdot 2^b}$$

Az árammérő által jelzett áram tehát

$$I = \sum_{i=0}^{b-1} Z_i \cdot 2^i \frac{U_{ref}}{2R \cdot 2^b} = \frac{U_{ref}}{2R \cdot 2^b} Z = \Delta I \cdot Z$$

Ebből látható, hogy az áram arányos a Z egész számmal, aminek kettes számrendszerbeli Z_i számjegyei a kapcsolók állásának felelnek meg.

Láthatjuk, hogy a kimeneti jel arányos tehát a bemeneten levő digitális számmal és a referenciafeszültséggel. Ebből következően a D/A konvertert használhatjuk úgy, hogy fix referenciafeszültség mellett változtatjuk a digitális bemenetet, de úgy is, hogy a referenciafeszültséget változtatjuk. Ez utóbbi esetben *szorzó típusú átalakításról* beszélünk, mivel a kimenet a referencia és a digitális szám szorzatával arányos. Ezt az utóbbi lehetőséget nem minden D/A konverter biztosítja.

A D/A konverterek jellemzői

A D/A konverterek felbontását a bitek számával jellemezzük. Ez a szám adja meg, hogy a realizálható feszültségtartomány hány elemi egységre oszlik, tehát a pontosságot is elvileg ez szabja meg. A D/A konverterek a valóságban természetesen csak adott pontossággal felelnek az említett elméleti leírásnak. A valóságban nem lehet például tökéletesen egyforma ellenállásokat előállítani, feszültségeséstől mentes, ellenállásmentes kapcsolókat készíteni. Ezek az ideális karakterisztikától való

eltérést jelentik, úgynevezett *statikus* és *dinamikus* jellemzőkkel adjuk őket meg.

Statikus jellemzők:

Felbontás, LSB:

Az átalakításhoz használt bitek száma, b

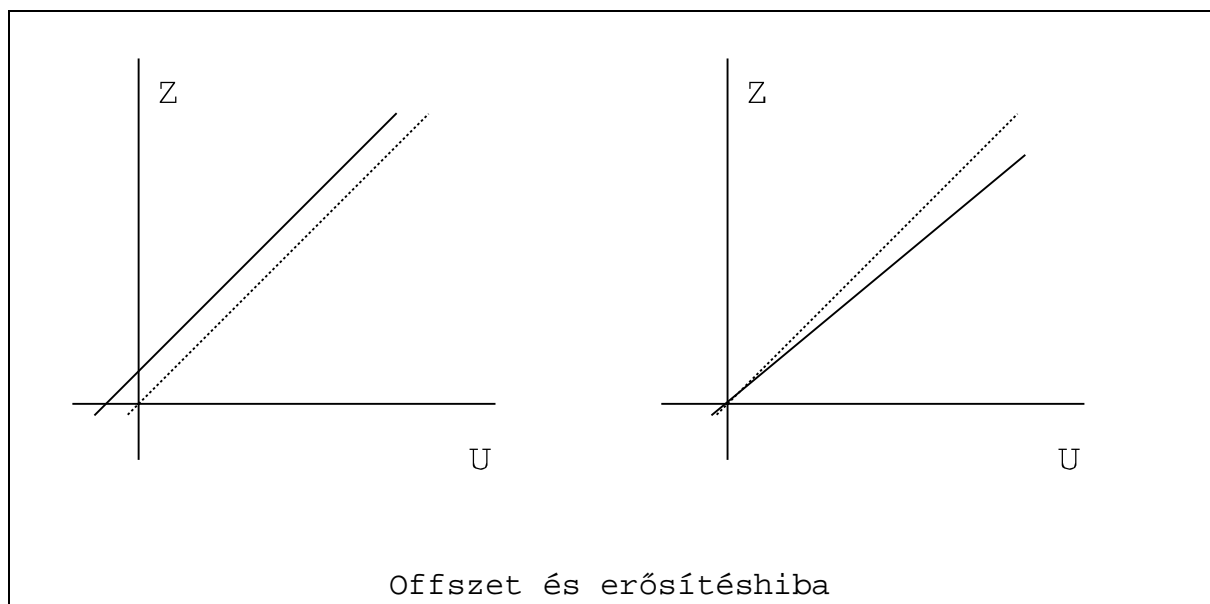
$$\text{LSB} = U_{\text{ref}} / 2^b$$

Offszethiba avgy nullponthiba:

A kimenet eltérése az ideálistól, amikor a digitális bemenet 0

Erősítés hiba:

A kimeneten mérhető jeltartomány eltérése az ideálistól.

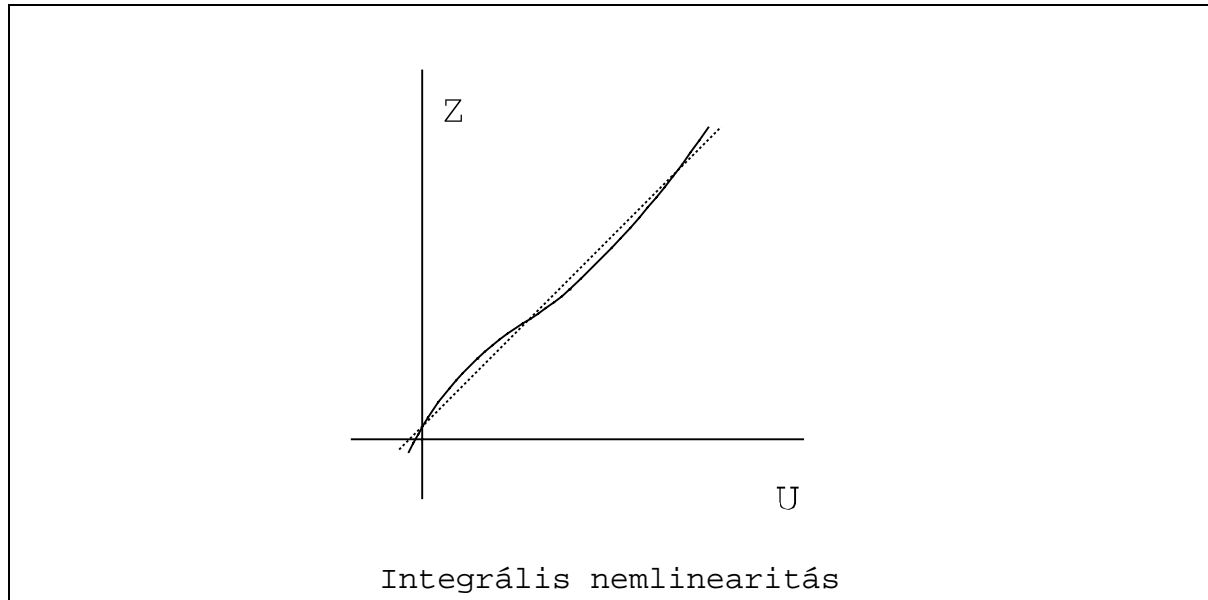


Differenciális nemlinearitás:

Ha a bemeneten eggyel növeljük a digitális kódot a kimenetnek éppen 1 LSB értékkel kellene változnia. A valóságban ez a változás nem azonos, az ideálistól való eltérést jellemzi a differenciális nemlinearitás.

Integrális nemlinearitás:

A reális átviteli karakterisztika maximális eltérése a karakterisztikára illesztett egyenestől.



Hőmérsékletfüggés:

Az eddig említett paraméterek mind függenek a hőmérséklettől; az 1K hőmérsékletváltozás hatására létrejött paraméterváltozással adjuk meg.

Zaj:

A konverter kimenetén mindig van valamekkora zaj is. Ezt a kimeneten mérhető effektív értékkel vagy a teljesítményspektrummal adjuk meg.

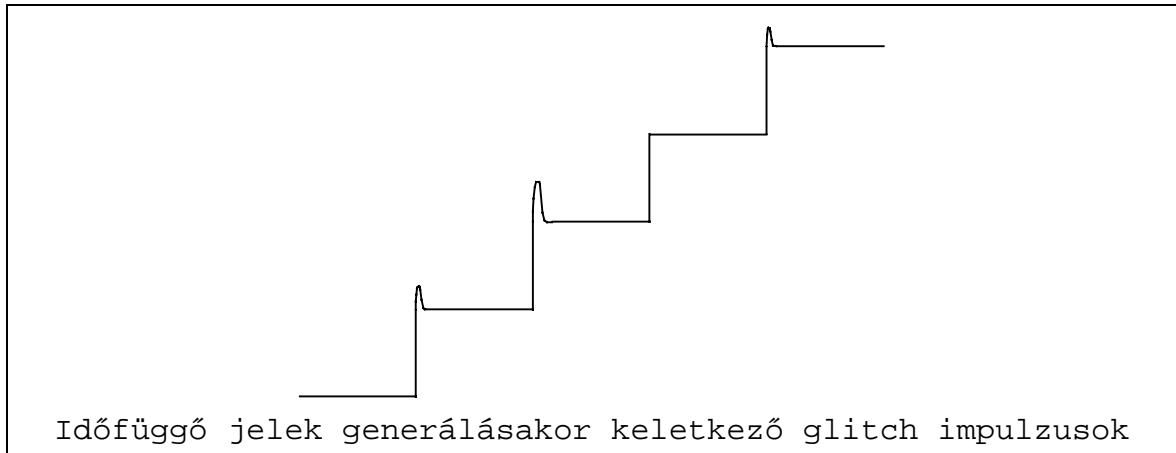
Dinamikus jellemzők:

Beállási idő:

Az idő ami szükséges ahhoz, hogy a bemeneten megváltozott digitális kódnak megfelelő érték jelenjen meg a kimeneten adott hibahatáron belül.

Glitch impulzus:

A bemeneti kód megváltozásakor a kimeneten egy tranziens impulzus jelenik meg a kimenet beállása előtt. Fő oka, hogy a biteket nem lehet tökéletesen egyszerre kapcsolni.



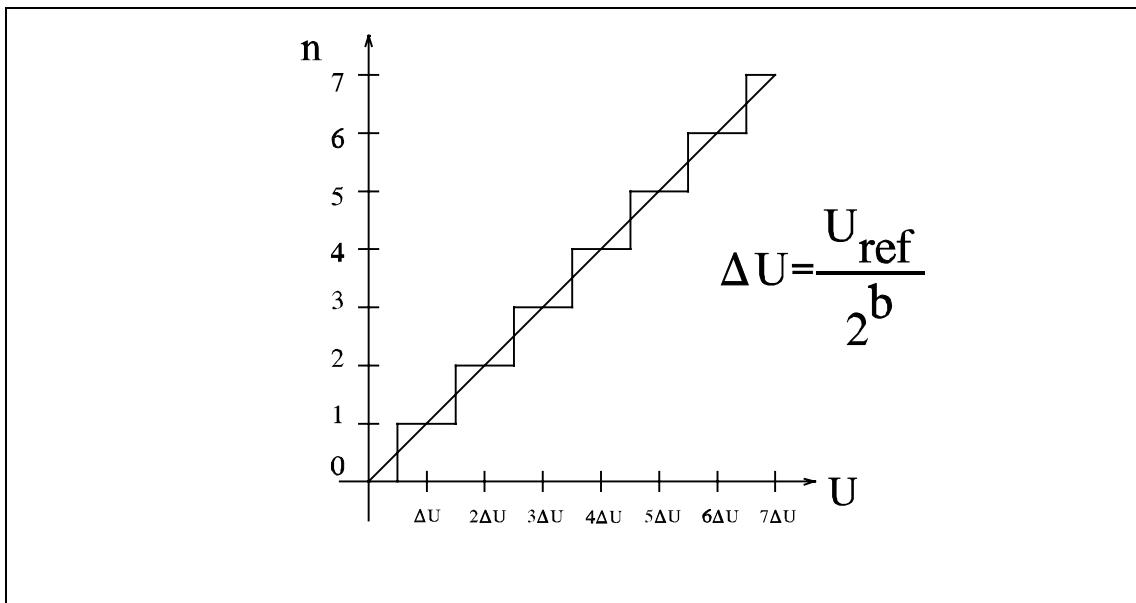
Harmonikus torzítás

Időfüggő szinuszos jel előállításakor a felharmonikusok és az alapharmonikus teljesítményének aránya. Az ideális szinuszos függéstől való eltérést jellemzi.

A/D konverterek

Az A/D konverter feladata, hogy egy U feszültségértéket Z egész számmá alakítson. Az U feszültségnek megfelelő Z egész számot a következő formula adja meg

$$Z = \left\lfloor \frac{U \cdot 2^b}{U_{ref}} + 0.5 \right\rfloor \quad (4)$$

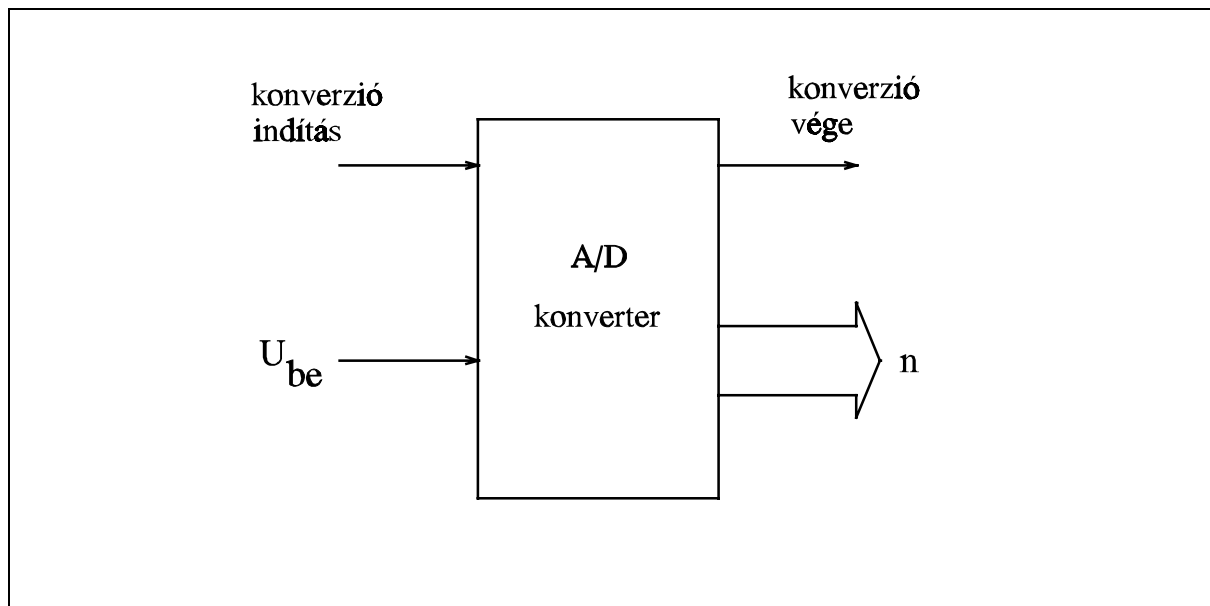


ahol U_{ref} a konverter referenciafeszültsége, b pedig a konverter pontosságára jellemző egész szám, az Z konvertált adat bináris számjegyeinek a számát jelenti. Ha például $b=8$, akkor a Z maximum 8 bináris számjegyből állhat, ami szerint n maximális értéke $2^8 - 1 = 255$. Az A/D konvertert ekkor 8-bitesnek mondjuk. A bitek száma a konverter pontosságát jellemzi, mivel ez adja meg, hogy a teljes mérési tartományt hány részre bontjuk fel. Ha a bitek számát eggyel növeljük, akkor a pontosság kétszereződni fog. Az időben állandó referenciafeszültség a mérési tartományt szabja

meg, a mérendő feszültség nem lehet nagyobb, mint a referenciafeszültség. Ha más mérési tartományra van szükség, akkor a jelet feszültségosztóval, vagy előerősítővel kell a szükséges tartományba konvertálni.

Sokszor előfordulhat, hogy a mérendő fizikai mennyiség nem feszültség, hanem például ellenállás, hőmérséklet, mágneses térerősség, nyomás, stb. Ilyen esetekben mérőátalakítókat (szenzorokat, detektorokat) használhatunk, amelyek az említett mennyiségekkel arányos (vagy legalábbis tőlük valamilyen ismert módon függő) elektromos jelet állítanak elő. Ilyen például a termoelem, a Hall-szonda.

Az A/D konverter megvalósítása a pontossági, sebességi követelményektől függően többféle lehet. A jel egész számmá alakítása mindig igényel valamekkora időt, ezt a jellemzőt nevezzük konvertálási időnek. Általában igaz, hogy a nagyobb pontosságú ($b > 12$) konverterek lassabb működésűek. 6-10 bit pontosságú konverterekkel 10^{-7} s.. 10^{-8} s alatti konverziós idő is elérhető.

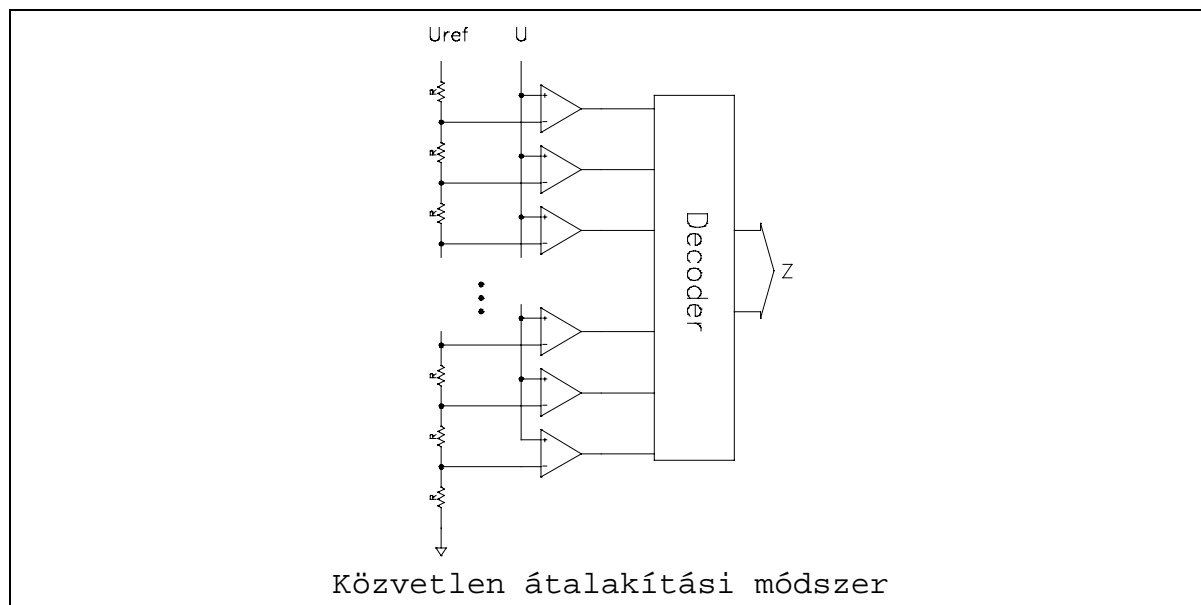


Általában a konverziót egy külső jellel indíthatjuk, így a konverzió az adott időpontbeli feszültségértékhez tartozó egész számot adja eredményül. A konverternek van egy kimenő vonala is, ami azt jelzi, hogy befejeződött-e a konverzió, vagy még folyamatban van. Nyilvánvaló, hogy a digitális adat csak akkor érvényes, amikor az átalakítás már befejeződött.

A következőkben néhány alapvető átalakítási módszert adunk meg rövid formában.

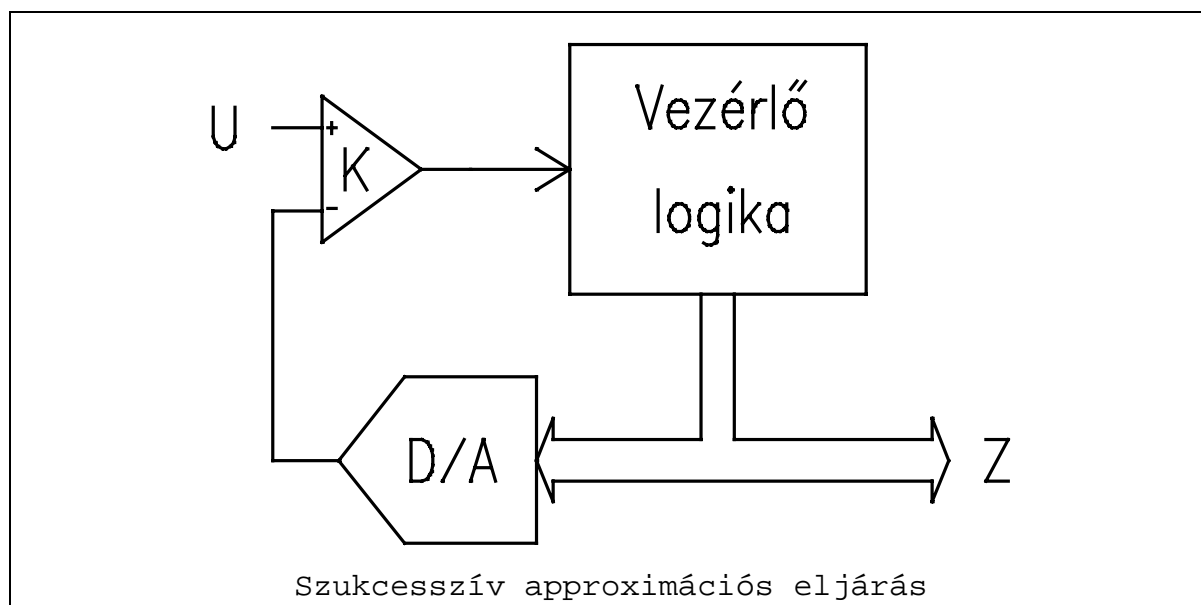
Az egyik legegyszerűbb átalakítási módszer az úgynevezett *közvetlen* módszer (flash A/D converter). Ennek a lényege, hogy előállítjuk az összes lehetséges diszkrét feszültség szintet, amiket az (1) képlet alapján az $i \cdot \Delta U + \Delta U / 2$ ($i = 0..N-1$, $N = 2^b$, $b = \text{bitek száma}$, $\Delta U = U_{\text{ref}} / N$) képlet ad meg. A mérendő feszültséget komparátorokkal összehasonlítjuk az összes feszültség szinttel, és ebből már meghatározható a konvertált i érték, mivel erre teljesül, hogy

$$i \cdot \Delta U + \Delta U / 2 < U < (i+1) \cdot \Delta U + \Delta U / 2$$



tehát azon a komparátorok kimenetein 1 van, amelyek indexe kisebb mint i , ezek száma viszont éppen i , ezt kell a dekodoló digitális áramkörnek kettes számrendszerbeli számmá alakítania.

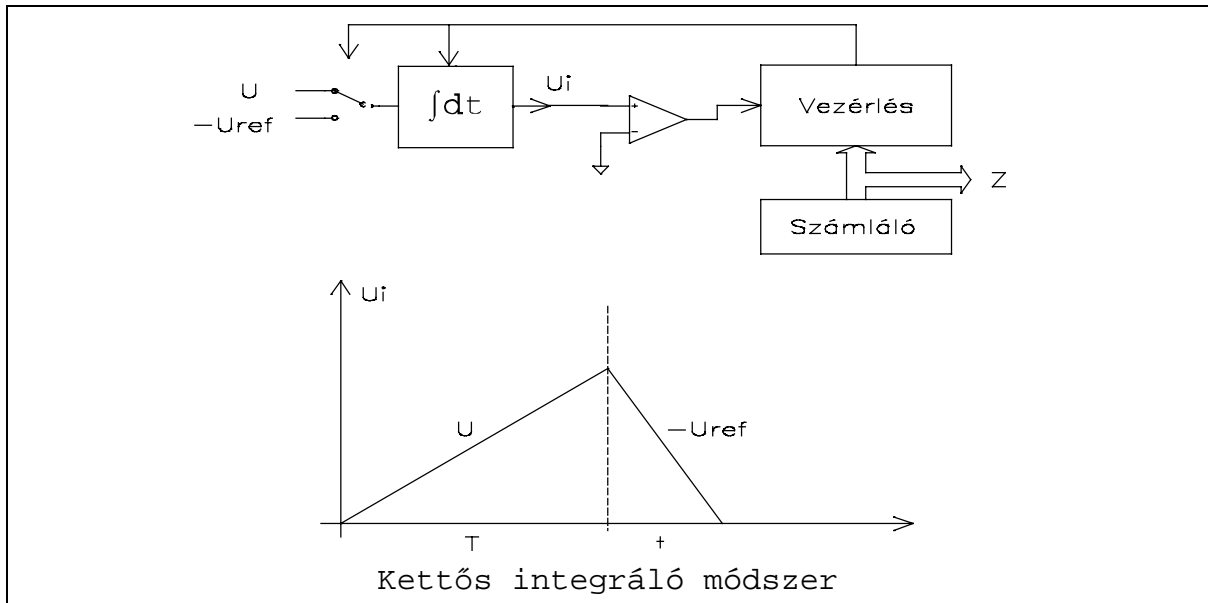
Egy másik igen gyakran használt módszer az úgynevezett *szukcesszív approximációs* módszer (successive approximation A/D converter).



converter). A konverzió során most nem állítjuk elő az összes

feszültség szintet egy időben, hanem egy időpillanatban egyszerre csak egyet, és a mérendő jelet ezzel vetjük össze. Ha például időben egymás után előállítjuk az $i \cdot \Delta U + \Delta U / 2$ szinteket, és összevetjük a mérendő jellel, akkor ugyanúgy megkapjuk a végeredményt, mint az előző esetben. Ennél sokkal hatékonyabb eljárást is találhatunk, ami a numerikus analízisből ismert bináris keresésnek a logikáján alapszik. A módszer szerint először az $i = N/2$ kódnak megfelelő szintet állítjuk elő. Ha a mérendő U feszültség ennél nagyobb, akkor a konvertált egész szám legfelső bitje (legnagyobb helyiértékű kettes számrendszerbeli számjegye) biztosan egy, ellenkező esetben nulla. Az első összehasonlításkor tehát megállapítjuk, hogy a teljes mérési tartomány melyik felében található a mérendő feszültség. A következő lépésben megfelezzük azt az intervallumot, amelyikbe esett a mérendő jel, és most is megvizsgáljuk, hogy ezek közül melyikbe esik a mérendő jel - természetesen úgy, hogy az intervallum felének megfelelő feszültséget előállítjuk, és ezzel hasonlítjuk össze az U feszültséget. Ebben a lépésben tehát vagy $i = N/4$ vagy $i = 3N/4$ kódnak megfelelő feszültséget kell előállítanunk az összehasonlításhoz. Ezzel beállítjuk a következő bitet. Ezt az eljárást addig folytatjuk, amíg az összes bitet be nem állítottuk. Látható, hogy b bites konverter esetén b számú lépés szükséges a konverzió befejezéséhez, szemben a közvetlen módszerrel, ahol csak egy lépés kellett.

A harmadik gyakori eljárás a *kettős integrálási* módszer (dual slope A/D converter). A konverzió során a mérendő jelet integráljuk úgy, hogy az integrálási konstanst nullának választjuk. Az integrált feszültség időfüggése ekkor a következő



formulával adható meg:

$$U_I(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^t U(t') dt'$$

ahol τ egy konstans. Ha a mérendő U feszültség időben állandó, akkor ez a formula $U_i = U \cdot t / \tau$ alakúra egyszerűsödik, tehát U_i az idő lineáris függvénye. A konverzió első fázisában a mérendő U feszültséget egy adott T ideig integráljuk, ekkor U_i értéke $U_i = U \cdot T / \tau$ lesz. A második fázisban az integráló áramkör bemenetére a $-U_{ref}$ referenciafeszültséget kapcsoljuk, és folytatjuk az integrálást egészen addig, amíg U_i értéke ismét visszatér nullába. Ha ezt a t_0 időt megmérjük, akkor igaz lesz, hogy

$$U = \frac{t_0}{T} U_{ref}$$

Az integrálási módszerrel tehát időmérésre vezettük vissza a feszültségmérést. A digitalizálás úgy történik, hogy időtartamokat digitalizálunk egy fix f frekvenciájú kvarc-

oszillátor segítségével. Az első fázisban $T=N/f$ ideig integrálunk (N fix egész szám, a konverzió maximális lehetséges értéke, pl. 4000), és a második szakaszban pedig megszámláljuk a t_0 idő alatt bekövetkezett oszcillációk i számát. A konverzió eredménye tehát az i egész szám lesz, amiből a mérendő jel

$$U = \frac{t_0}{T} U_{ref} \approx \frac{i}{N} U_{ref}$$

Ezzel a módszerrel persze lehet időben változó jelet is mérni, ekkor a mérés eredménye a feszültség T idő alatt számított átlagértéke lesz. Ez abból látható, hogy időfüggő jelre

$$\frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt = \frac{t_0}{T} U_{ref}$$

Ez az oka annak, hogy ezt a viszonylag bonyolultnak tűnő eljárást mégis gyakran alkalmazzák, hiszen átlagértéket mér, ami időben állandó, de időfüggő zavarjelekkel terhelt jelek esetén lényegesen pontosabb, mint egy időpillanatbeli mért érték.

A következő táblázat az egyes konverziótípusok jellemzőit foglalja össze.

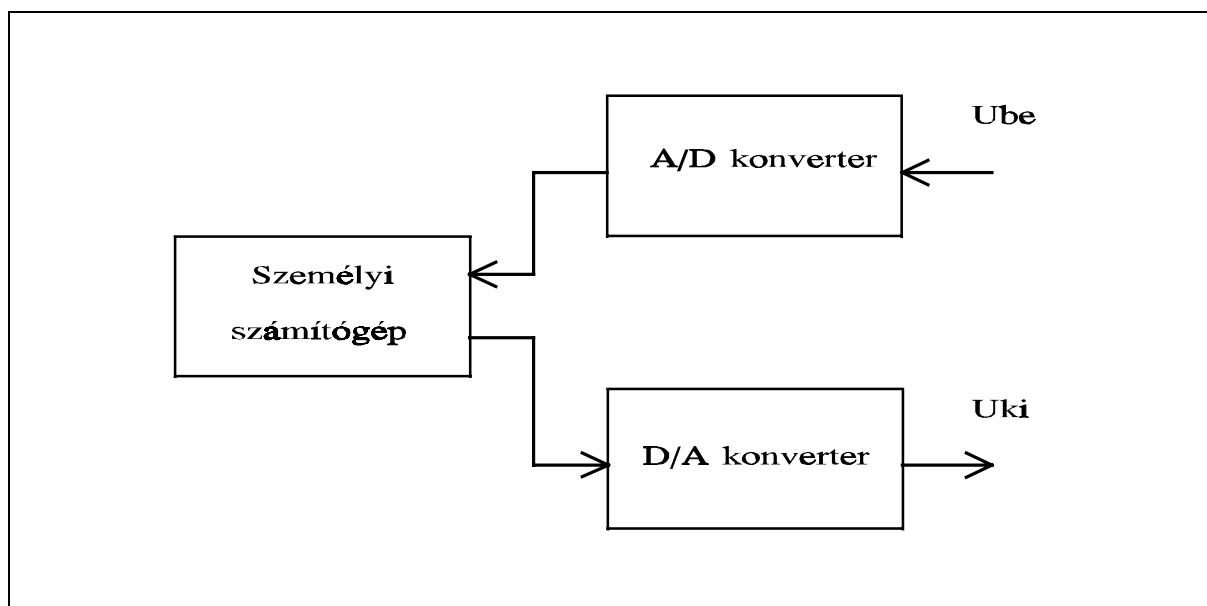
	közvetlen	szukcesszív approximáció	kettős integrálás
pontosság (bitek száma)	6-10	8-16	12-20
sebesség (konverzió/ sec)	10^6 - 10^9	10^4 - 10^6	1-10
előnyök	nagyon gyors	gyors, pontos, egyszerűbb technológia	pontos, jó zavarszűrés
hátrányok	pontatlan, sok elem, bonyolult technológia	zavarérzékeny	lassú
jellemző alkalmazási területek	gyors időfüggő jelek mérése video, digitális oszilloszkóp	általános időfüggő és állandó jelek mérése, PC-s mérőkartyak	időben állandó jelek mérése, kézi voltmérők, multiméterek

A/D és D/A konverterek alkalmazásai

A következőkben áttekintjük az A/D és D/A konverterek néhány alkalmazási lehetőségét. A felhasználások köre rendkívül széles, ezért a teljesség igénye nélkül csak a legfontosabb, elsősorban mérés-technikai alkalmazásokat említjük meg.

D/A konverterek alkalmazásai

A legegyszerűbb feladat az időben állandó jelek előállítás. Ilyenre lehet szükség például egy dióda karakterisztikájának felvételekor, ha a gerjesztő feszültséget vagy áramot digitális jellel szeretnénk beállítani a kívánt értékre. A mérés elvégzéséhez természetesen használhatunk A/D konvertert, így a gerjesztés és a mérés is digitálisan kivitelezhető.



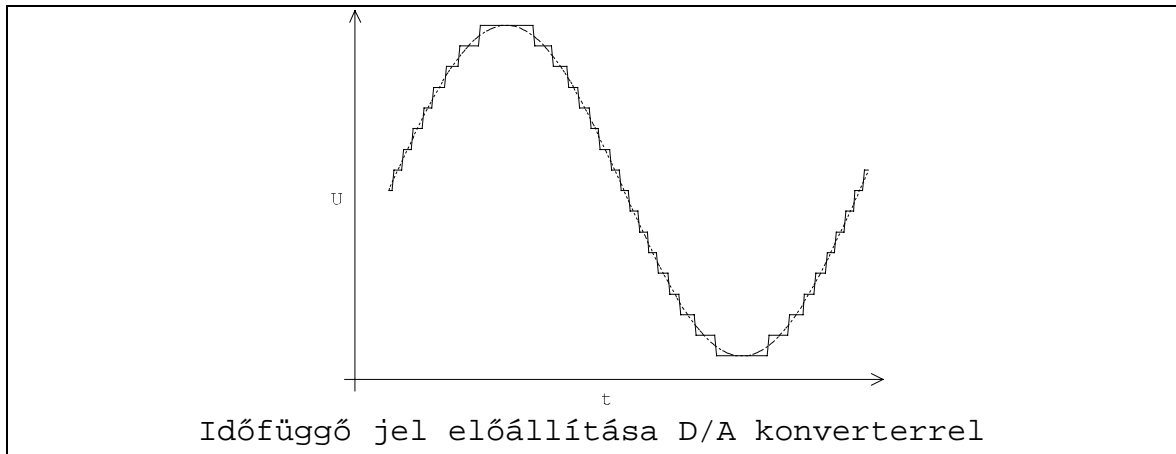
Ennél bonyolultabb feladatot is elvégezhető ugyanezzel az

elrendezéssel, például használhatjuk egy adott test hőmérsékletének szabályozására is: az A/D konverterrel mérjük a hőmérsékletet, a D/A konverterrel pedig szabályozzuk a fűtőszálban folyó áramot.

A D/A konverterek másik gyakori alkalmazása az időfüggő jelek előállítására. A D/A konverterek működési leírásánál láttuk, hogy a kimeneten levő áram vagy feszültség arányos a referenciafeszültséggel és a bemeneten levő digitális adattal. Ebből következően háromféleképpen lehet időfüggő a kimeneti jel: időfüggő referencia, időfüggő digitális bemenet vagy mindkettő esetén.

Ha a referenciafeszültség helyére időfüggő jelet kapcsolunk (szorzó típusú D/A konverterek esetében), akkor a kimeneti jel arányos lesz a bemeneti egész számmal és az időfüggő bemeneti jellel. Ilyen módon digitálisan vezérelhető potencióméterhez jutunk. Ennek egy mérés-technikai alkalmazása lehet például periodikus vagy más időfüggő gerjesztőjelek amplitúdójának digitális vezérlése. Egy másik gyakorlati alkalmazás a hangtechnikában a hangerősség digitális szabályozása, például digitális keverőpultokban és egyéb hangtechnikai eszközökben.

A digitális bemenőjelek időfüggése által szintén időfüggő jelek állíthatók elő. Ehhez rendszerint a kívánt jelalaknak megfelelő egész számokat egy memóriában tároljuk és adott időközönként a D/A konverter bemenetére juttatjuk. Ez természetesen csak egy közelítés lesz a szükséges jelnek, de elvileg nagy pontosság érhető el. Ennek a módszernek mérés-technikai alkalmazása lehet a speciális gerjesztőjelek előállítására (szinuszos, impulzus, négyszögjel, tranziens). Mivel



gyakorlatilag tetszőleges jelalak előállítható, így rendszerek jelének szimulálására is alkalmas, például EKG jeleket állíthatunk elő egy mérőberendezés tesztelése céljából, vagy fizikai rendszerek jeleit állíthatjuk elő a rendszerek jelenléte nélkül is. Gyakori a hangfrekvenciás jelek előállításának ez a módja is: digitális magnókban, CD-lejátszóknál, tetszőleges hangjelek generálására szintetizátorokban - ezekhez általában 16-18 bites átalakítót használnak. Mivel a digitális jelek analóg jelekké való konvertálása a gyakorlatban igen gyors lehet (akár 10^{-9} s alatt), így nagyfrekvenciás jelek is előállíthatók. Ilyen alkalmazás a számítógépek monitorait vezérlő jelek előállításának, ahol másodpercenként 50-70 alkalommal kell a képernyőpontokat analóg jellel előállítani. Egy 1024x768-as monitoron például 60Hz-es képfrissítés mellett másodpercenként több mint 47 millió képpontot kell előállítani, általában 8 bites D/A konverterek segítségével.

alkalmazás	pontosság	adat/sec
statikus gerjesztések, szabályozás	8..20 bit	-
digitális amplitúdó- szabályozás	8..16 bit	-
általános időfüggő jelek generálása	8..16 bit	$1..10^7$
beszédjelek generálása	6..12 bit	2000..10000
hangszerek jeleinek generálása	16..20 bit	40000..50000
Videojelek generálása	8..10 bit	$10^7..10^8$

A/D konverterek alkalmazásai

Az A/D konverterek legegyszerűbb alkalmazása az időben állandó vagy lassan változó jelek mérése. A kívánt pontosságnak megfelelő konvertert választhatunk ebben az esetben, mivel a konverziós idő nem korlátozó tényező. Célszerű a kettős integrálási elven működő eszköz használata a jó

zavarelnyomóképesség miatt. Ilyen méréseket végzünk például a digitális multiméterekkel.

Az A/D konverterek alkalmasak időben változó jelek mérésére is, mintavételezéses mérési eljárással. A legtöbb analóg-digitál konverziós eljárás esetén (pl. szukcesszív approximáció) a konverzió alatt az A/D konverter bemenetén a jelnek állandónak kell lennie, ellenkező esetben hibás adatot kapunk. Mivel a mérendő jelre ez a feltétel nem teljesül, ezért ezt egy úgynevezett mintavevő-tartó (sample and hold) áramkörrel biztosítjuk. Természetesen ezután a mintavevő-tartó áramkör fogja meghatározni, hogy milyen gyorsan változó jeleket digitalizálhatunk megfelelő pontossággal.

Az időfüggő jelek digitalizálását rendkívül széles körben alkalmazzák a fizikai méréseken kívül is, a lassan változó jelek mérésétől (pl. hőmérséklet változása) a hangfrekvenciás jelek és videojelek digitalizálásáig.

alkalmazás	pontosság	adat/sec	módszer
statikus jelek mérése	8..20 bit		DS
általános időfüggő jelek digitalizálása	8..16 bit	$10^1..10^6$	SA, HF
beszédjelek digitalizálása	6..12 bit	2000..10000	SA
hangszerek jeleinek digitalizálása	16..20 bit	40000..50000	SA, $\Sigma\Delta$
Videojelek digitalizálása	8..10 bit	$10^7..10^8$	F, HF

DS=dual slope A/D (kettős integráló)

SA=succesive approximation A/D

F=flash A/D (közvetlen)

HF=half-flash A/D (kaszád)

$\Sigma\Delta$ =szigma-delta A/D