

10. tétel

Horváth Benedek

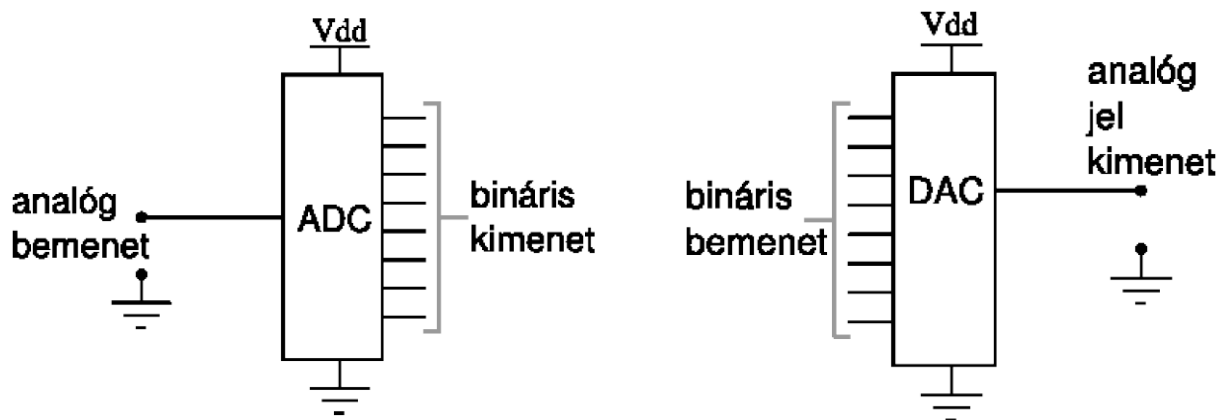
2019. június 21.

Kivonat

AD és DA konverterek – Digitális-analóg konverzió, AD-konverzió szukcesszív approximációval. A kvantálási zaj és a mintavételi törvény. Digitális jelek tömörítési módszerei: delta-moduláció és delta-sigma moduláció. Digitális számaábrázolás és műveletvégzés.

1. Bevezetés

A számítógépes rendszerek önmagukban csak számokat tudnak értelmezni és előállítani, a bemenő- és kimenőmennyiségeik mértékegység nélküli digitális értékek. A mérhető fizikai mennyiségek azonban túlnyomórészt folytonosak, és a mérőeszközök jelentős része analóg jelet ad ki magából. Ezért mielőtt bármilyen digitális jelfeldolgozási eljárást hajtánánk végre, a fizikai valóság releváns mennyiségeit szükségszerűen át kell alakítani a digitális rendszerek által értelmezhető számokká úgy, hogy a számok az eredeti mennyiségeket hűen tükrözzék. A másik oldalról pedig, a számítógép vezérelheti a külvilágot (mérőberendezést), jellemzően egy feszültségjellel. Ilyenkor tehát a digitális műveletek eredményeit kell valamilyen arányos módon visszaalakítani valódi fizikai mennyiséggé. Összességében tehát a digitális-analóg és az analóg-digitális irányú átalakítás egyaránt gyakori a mindennapokban. A legkézenfekvőbb, mindkét irányú konverziót tartalmazó hétköznapi példa a számítógépes hangrögzítés, tárolás, feldolgozás, illetve hangszórón történő lejátszás. Ezekre a feladatokra dedikált áramköri egységek, az analóg-digitális (analog digital converter, ADC) és digitális-analóg (digital analog converter, DAC) átalakítók szolgálnak. Az eszközök egyszerű vázlata az 1. ábrán látható.

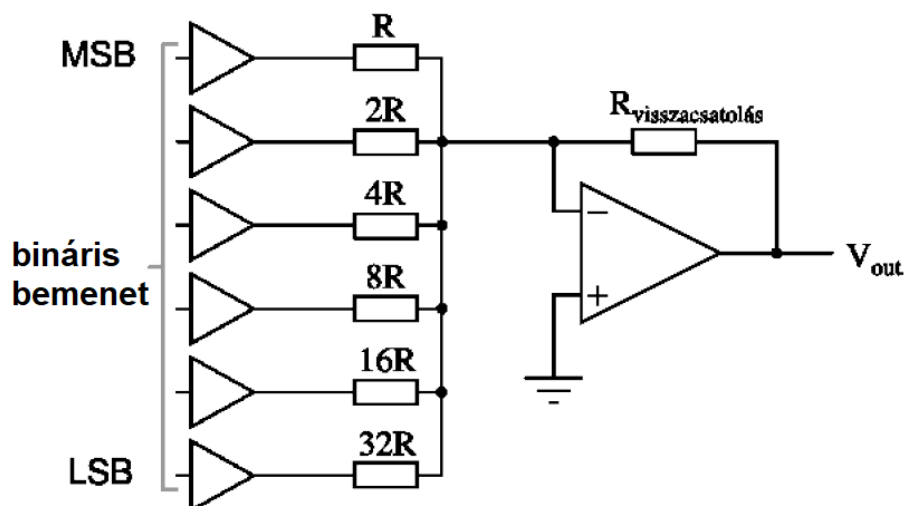


1. ábra. Analóg-digitál (balra) és digitál-analóg (jobbra) konverter általános vázlata.

2. Digitális-analóg konverterek

A digitális-analóg átalakítók (D/A konverterek) digitális jelek folytonossá alakítására használatosak. A D/A átalakítónak mind a bementi értéke, mind a kimeneti értéke az értékkészletében kvantált¹. Az alábbiakban két egyszerű elektronikai megvalósítását nézzük meg a digitális-analóg átalakítóknak.

¹Meg kell jegyezni, hogy ez az analóg oldalon természetesen csak elvileg igaz; a kimeneten fizikailag teljesen megjelenő feszültségérték időben folytonos. Nagy kvantumlépcső vagy alacsony mintavételi frekvencia esetén a kimeneti jelalak erősen torzított lesz az eredetihez képest, a felharmonikus tartalma igen magassá válik. Ennek jelentőségéről később ejtünk szót.



2. ábra. 6 bites bináris súlyozású digitális-analóg konverter áramköri vázlata.

2.1. Bináris súlyozású DAC

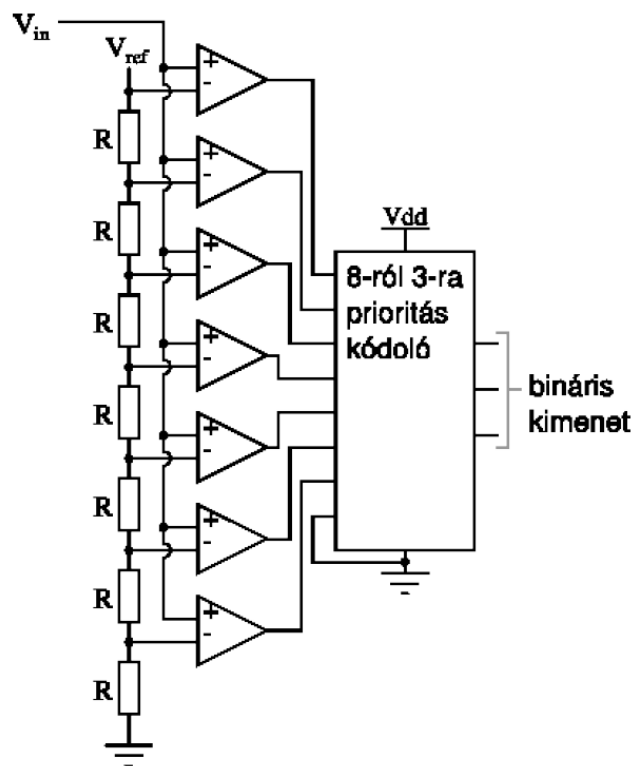
lkj

2.2. R/2R létra

fds

3. Analóg-digitális konverterek

Az analóg-digitális átalakítók a bemenetükre kapcsolt folytonos, analóg jelet egy órajel-generátor által meghatározott mintavételezési frekvencia szerint bináris számértékekké alakítják. Az áramkör kimenetén a jel feszültség szintjének digitális reprezentációja jelenik meg. Az A/D átalakítók általában a gyártó által előre meghatározott feszültségtartomány digitalizálására képesek, így a jel feszültség szintjét megfelelő analóg áramkörrel kell illeszteni az A/D konverter bemenetéhez. Az esetek többségében unipoláris A/D konvertereket alkalmaznak, amelyeknél a jeltartomány egyik széle általában a nulla, a mérés határ szélét végértéknek (Full Scale, FS) jelölik. A bipoláris pozitív-negatív átalakítók általában valamilyen szinteltolást alkalmaznak a bemeneten: a mérhető jeltartomány így közrefogja a nulla értéket, és általában szimmetrikus (FSR, Full Scale Range). Az átalakítók általában lineáris karakterisztikájúak, azaz a digitálisan megkülönböztetett szintek között egyenlő lépésközök vannak a bemenő analóg feszültségben. Egy ADC felbontóképességének azt az analóg jelváltozás nevezzük, ahol a kimenet vált, azaz ahol a változás megkülönböztethető a digitális kimeneten is. A felbontóképesség egy n bites bináris kódolású konverter esetén elvileg megegyezik a $q = FSR/2^n$ kvantum nagysággal, ahol 2^n a konverter lehetséges digitális kimeneteinek száma. A felbontóképességet általában bitekben adják meg, pl. 8, 10, 12, 16 stb. bites típusok vannak forgalomban. Az alábbiakban az A/D konverterek néhány gyakori típusát (elektronikai megvalósítását) vizsgáljuk meg.



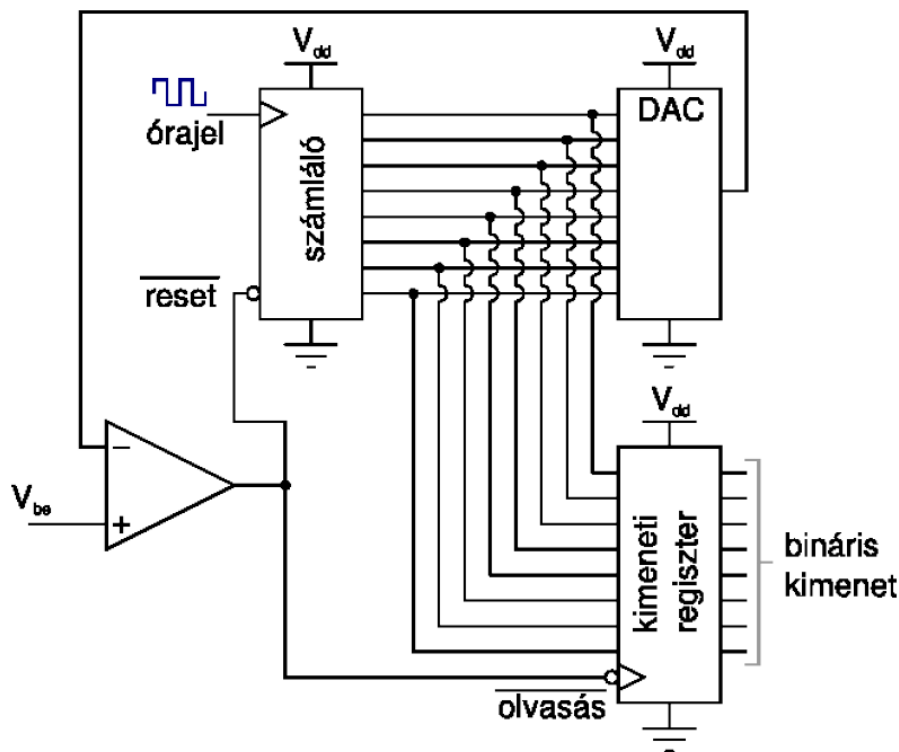
3. ábra. 3 bites párhuzamos (flash) A/D konverter vázlata.

3.1. Szimultán (flash) A/D konverter

A 3. ábrán egy $n = 3$ bites szimultán ADC áramkört láthatunk. A megvalósításához a digitális szintek számánál 1-gyel kevesebb, azaz jelen esetben $2^n - 1 = 7$ db azonos ellenállásra van szükség, amelyek sorosan kapcsolva egyenlően osztják a referenciafeszültséget. Így az egyes ellenállások közti csomópontokban (a földhöz képest) a digitális szinteknek megfelelő feszültségek állnak elő. A bemenő V_{in} analóg jelet komparátorok sorozata hasonlítja össze az ellenálláslánc V_{ref} -ből osztott referenciafeszültségeivel. Amennyiben a komparátor pozitív bemenetére kötött bemenő jel nagyobb a negatívra kötött referenciafeszültségnél, a kimenet logikai 1, ellenkező esetben 0. A komparátorok kimenetét egy kódoló áramkör alakítja át bináris jellé. A kimeneten végeredményül a legmagasabb logikai 1-et tartalmazó bemenet bináris címét kapjuk, azaz a bemenő feszültséget bináris értékké konvertálva. A kódoló áramkör felépíthető kizáró-vagy kapuk és diódás logika felhasználásával, ennek technikai részleteire itt nem térünk ki. A flash konverter a leggyorsabb ADC, mivel az átalakítás egy órajel alatt megtörténik, sok egyéb típustól eltérően (lásd később). További érdekes tulajdonsága a flash konverternek, hogy a digitalizálási szintek csak az ellenálláslánctól függenek, azaz igény esetén nemlineáris skálát is lehet alkalmazni az analóg-digitális átalakításnál az ellenállások megváltoztatásával.

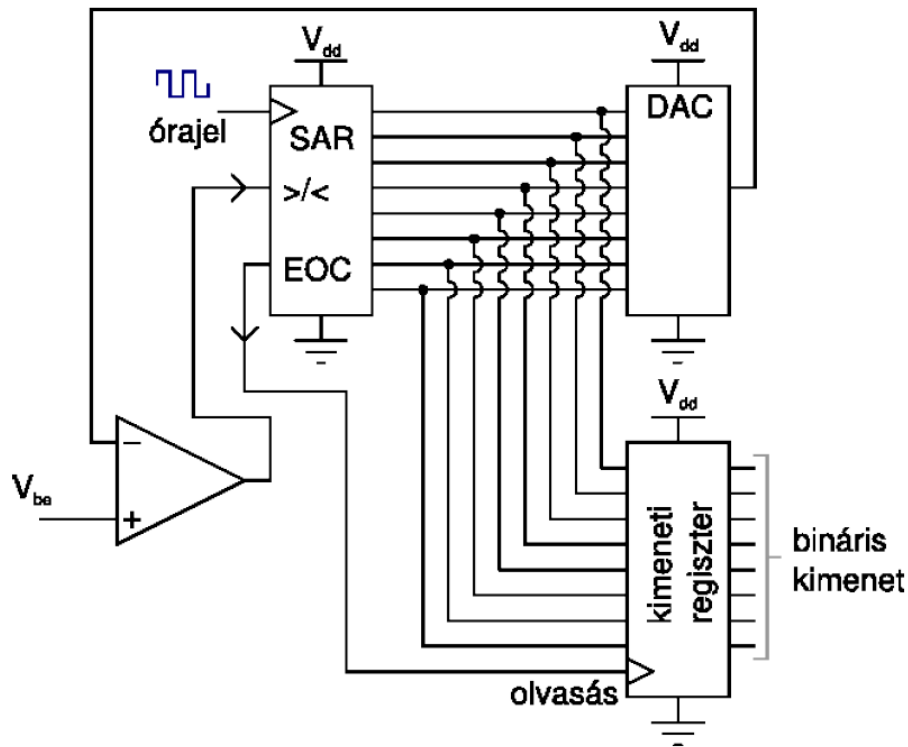
3.2. Számláló A/D konverter

A számláló A/D konverter az egyik legegyszerűbb átalakító, vázlatát a 4. ábra mutatja. A berendezés "lelke" egy órajellel vezérelt bináris impulzusszámláló. Ennek kimenetét minden órajelkor egy D/A (!) konverterre vezetjük, ami egy nagy pontosságú V_{ref} feszültségforrásból a számláló értékével arányos analóg feszültséget állít elő. Ezt egy komparátor segítségével

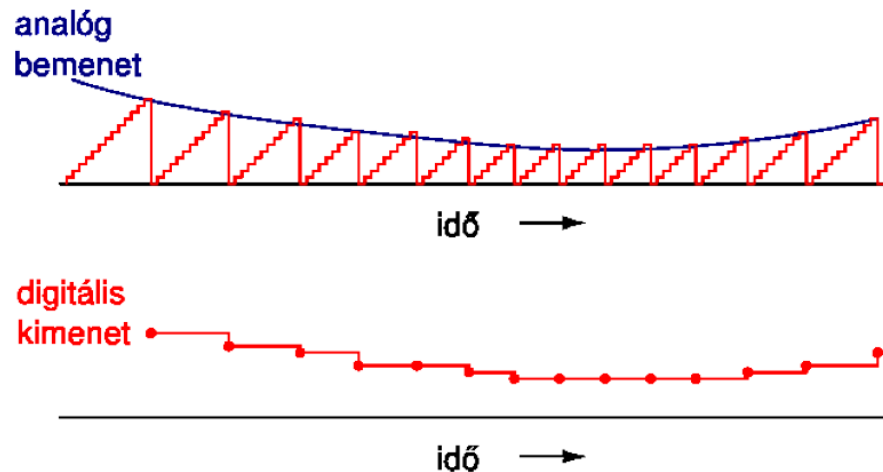


4. ábra. 8 bites számláló A/D konverter vázlata.

összehasonlítjuk a bemenő, mérni kívánt ismeretlen V_{be} analóg jellel. Amikor a DAC kimenő feszültsége eléri a V_{be} feszültséget, akkor a komparátor átbillen, és ez egyrészt beírja a számláló értékét a kimeneti regiszterbe (pl. D tárolókból építhetünk ilyen), másrészt nullázza a számlálót. A mérés során tehát a mérendő értékkel arányos számú impulzus kerül a számlálóba, a mért érték digitális formában rendelkezésre áll. A konverter nagy hibája, hogy a mérési (átalakítási) idő függ a mérendő feszültségtől (lásd: 5. ábra). Ez az ingadozás a számítógépes jelfeldolgozást (pl. teljesítményspektrum meghatározása) bonyolítja, a digitális szűrést pedig megakadályozza. Gyorsan változó jelek mérésére nem alkalmas.



6. ábra. 8 bites szukcesszív approximációs A/D konverter vázlata.



5. ábra. Számláló A/D konverterrel végzett konverzió szemléltetése. Jól látható a diszkrét lépések számának és az átalakítandó analóg feszültség nagyságának viszonya, illetve a konverzió közti időlépések különbözősége.

3.3. Szukcesszív approximációs A/D konverter

A szukcesszív approximációs konverter felépítésében és működésében hasonló a számláló A/D konverterhez, azonban annál összetettebb és hatékonyabb. A konverziót egy központi vezérlőlogika irányítja. A számláló helyett szukcesszív approximációs regiszter (SAR) található az áramkörben. A konverzió első lépéseként a SAR legnagyobb helyiértékű bitje (MSB, *most signi-*

ficant bit) logikai 1-be billen, míg az összes többi 0 marad. Ebből a számláló A/D átalakítóban is látott DAC egység analóg jelet állít elő, ami épp a mérési tartomány (V_{ref}) fele. Ezzel a referenciajellel hasonlítja össze a V_{be} mérendő analóg jelet a komparátor. Amennyiben MSB-nél nagyobbznak bizonyul a konvertálandó analóg jel², a bit értéke 1 marad, ellenkező esetben a vezérlő SAR törli a bitet. Ezáltal kiderül, hogy a mérési tartománynak melyik felébe esik a mérendő jel. A további órajelek során a SAR a bináris számrendszer csökkenő helyértékeinek megfelelő biteknél megismétli az előbbi eljárást, miközben a korábban beállított nagyobb helyiértékű bitek változatlanok maradnak. Egy ciklusban tehát mindig feleződik az előző lépésben vizsgált mérési tartomány. A komparátor megvizsgálja, hogy a mérendő mennyiség kisebb vagy nagyobb-e, mint az aktuális mérési tartomány fele: a bit értéke ennek megfelelően áll be. A legkisebb helyiértékű bit (LSB, *least significant bit*) meghatározása után a SAR a bemenő analóg jel digitális értékét tartalmazza (a konverzió pontossága LSB).³ A konverzió végét az áramkör jelzi (EOC, *end of conversion*), és a kimeneti regiszter ekkor olvassa be a SAR bitjeit. A következő átalakítást a külső áramkör a SAR törlésével indítja. Figyelemre méltó, hogy a mérési idő a SAR regiszter méretétől, azaz a konverter felbontásától függ, mivel az összehasonlítások száma megegyezik a AD bitjeinek számával (pl. 8 bit esetén 8 ciklus kell a teljes méréshez); a számláló A/D konverterrel ellentétben a konverziós idő a mérendő jel értékétől független. Megemlítendő még, hogy a szukcesszív approximációs ADC működtetéséhez szükség van gyors mintavevő és jelnyújtó (*sample and hold*) áramköri egységekre annak érdekében, hogy a szukcesszív approximáció több órajeles időtartama alatt stabil legyen a konvertált mennyiség. Összességében a szukcesszív approximációs A/D konverter az egyik legelterjedtebb átalakító a számítógépes mérésadatgyűjtő berendezésekben, viszonylag egyszerű felépítése, pontossága és a legtöbb gyakorlati alkalmazáshoz kellőképpen gyors sebessége miatt.

4. Mintavételi törvény

A Nyquist-Shannon-törvény kimondja, hogy egy f_B frekvenciájú tisztán szinuszos jel digitális reprezentációjához legalább $2 \cdot f_B$ frekvenciával szükséges mintavételezést végezni. Mivel az analóg jelek általában nem mentesek a mintavételezési frekvenciánál nagyobb frekvenciájú komponensektől (felharmonikusok), ezért az A/D konverterek bemenetét aluláteresztő szűrőn keresztül kell meghajtani. Ha ezt nem tennénk meg, akkor a mintavételezett jel jelentősen torzulna.

²Az MSB rövidítés egyaránt utalhat szó szerint egy bináris szám legnagyobb helyiértékű bitjére, annak decimális értékére, illetve az ennek megfelelő nagyságú analóggá konvertált feszültségre.

³Tekintsünk egy konkrét példát: 13.7 V analóg jel esetén egy 5 bites konverternél $MSB = 16$, ez tehát 0-nak adódik. A 32 V-ig terjedő mérési tartománynak mostantól az alsó felét vizsgáljuk. A következő helyiérték már 1, mivel $13.7 > 8$, tehát 8 és 16 közé szűkült a vizsgálandó tartomány. Így tovább, mivel $8 + 4 < 13.7$, $8 + 4 + 2 > 13.7$, $8 + 4 + 1 < 13.7$, a bitek értéke sorban, azaz a bináris szám: 01101. A mérés értéke 13 V-nak adódik, a tizedesjegy csonkolódik, mivel $13.7 < 14$. 0.7 V a konverziós hiba.

5. Kvantálási zaj

6. Δ -moduláció és Δ - Σ -moduláció

6.1. Tömörítés

7. Digitális számábrázolás és műveletvégzés

Hivatkozások