

Digitális jelfeldolgozás, analóg világban

"Indiai közösségekben fotózta el a híres amerikai riportfotós Steve McCurry a világ utolsó tekerés Kodachrome-ját. A legendás Kodak film, amely 1935-től kísérte végig a fotótörténelem nagy pillanatait, az analóg technika jelképe lett. Megszűnése egy korszak végét zárja le szimbolikusan." - CNN

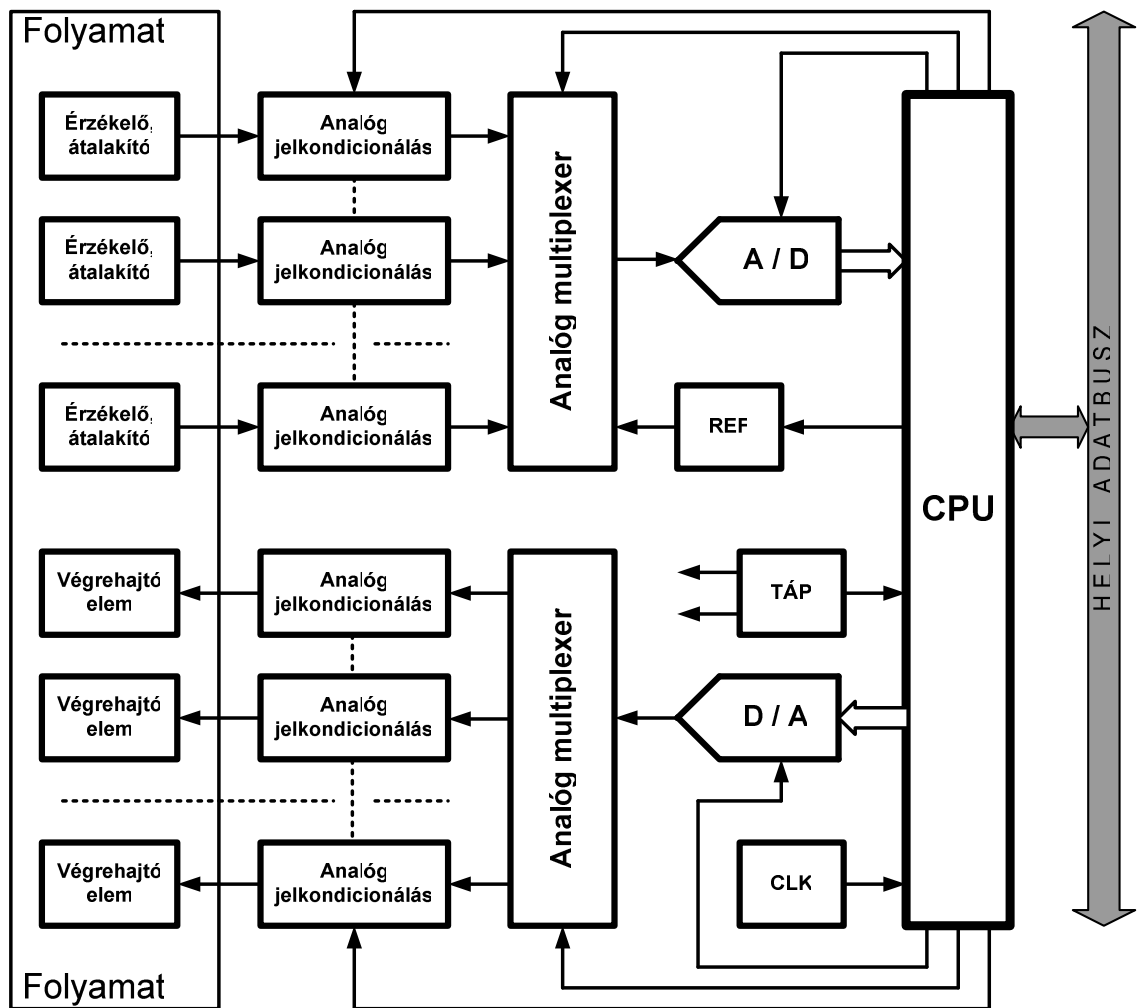
A való világ körülöttünk analógnak mondható változások sorozatából áll. Az emberi érzékelés, a látás, hallás, szaglás, tappintás, ízlelés mechanizmusa mind analóg technikákra alapul. Még az emberi felfogás mechanizmusa is analóg, habár az analóg digitális kettősség az emberi agy tevékenységében már felismerhető. A jobb agyfélteke szerepköréhez tartozik az analóg gondolkodás, a fogalmak összehasonlítása, párhuzamba (kapcsolatba) állítása, új fogalmak hozzárendelése korábbról ismert fogalomhoz. A bal agyfélteke a dolgokat részekre bontva analizálja, a részeket sorba rendezi, értékeli. Megkeresi a bonyolultságot a részletekben, de átlátni az egészet nem képes, mert erre csak a jobb agyfélteke alkalmas. A két agyfélteke együtt alkotja az agy-at, vagyis az egy-et. Íme egy példa arra, hogy maga a magyar nyelv is analóg szemléletű. Azt is tudjuk, hogy a gyermek az anyanyelvét utánzással sajátítja el, ami nem más mint tiszta analógia. Egy idegen nyelvet már a digitalizálás módszerével (könyvből) tanulunk meg (főleg ha a nyelvtanárnak sem anyanyelve a tanult nyelv).

Az analóg jel egyik legfontosabb jellemzője az időbeni folytonosság. De az analóg jel egy folyamatosan változó jelnek tekinthető amplitúdó szerint is. Az analóg jelek információ tartalma végtelen. Ha mintavételezéssel, kvantálással digitális jelet állítunk elő belőle, az információ veszteséggel jár. Miért van mégis az, hogy a műszaki világ egyre több téren igyekszik áttérni az analóg technikáról, a digitális rendszerekre, ha az analóg technikával - úgy tűnik - nagyobb pontosság érhető el? A magyarázat az ideális és a valós viszonyok különbségében rejlik. Az analóg jelfeldolgozás legnagyobb hátránya az, hogy minden analóg fizikai rendszerben létrejönnek véletlenszerű változások, úgynevezett zajok és torzítások ami a feldolgozás pontosságát behatárolja. Sőt, ha ezek a nem kontrolálható változások uralkodóvá válnak, az analóg jel teljesen elveszhet, vagy visszaállíthatatlanul eltorzulhat. Nyilvánvaló, hogy a digitális jelek zavarvédeltsége jóval nagyobb, hiszen az információt ebben az esetben két lehetséges (feszültség)értékkel írjuk le, és csak azt kell biztosítanunk, hogy a zaj ne érje el a tartományszélesség felét, vagyis a (szinte) egyetlen kritikus hibát. Az analóg világ legnagyobb hátránya érdekes módon mégse a digitális világ legnagyobb előnye. A digitális rendszerek ennél lényegesebb jellemzője, hogy a technológiai fejlődés eredményeképpen végtelen egyszerű elemekből - az 1 és a 0 kapcsolatának manipulációjaként - végtelen összetettségű rendszerek felépítésére vagyunk képesek. Az emberiség egyik forradalmi lépése (paradigmaváltása) volt, amikor megtanulta az analóg világot digitális úton tárolni, feldolgozni és továbbítani. Pont ez a három lépés jelenti a digitális jelfeldolgozás rettenetesen nagy előnyét az analóg világ egyre tökéletesebb másolásában.

Akkor nincs szükség ma már analóg áramkörökre? Nos, a digitális világban nagyon sok analóg áramkörre van szükség. Sőt az analóg technika is gyorsan változik, és ha nem is olyan - a digitális technikában megszokott - látványos, de lényeges fejlődésének vagyunk tanúi. Ne feledjük, hogy a félvezető eszközök alapvetően analóg alkatrészek, a digitális technika csak a működési paraméterek szélső értékeit, a kapcsolóüzemet használja ki. Ezen kívül, még a teljesen digitális rendszereknek is tartalmazniuk kell olyan interfészeket, amelyekkel a valós (analóg) világgal lépnek kapcsolatba. Úgy tűnik tehát, hogy analóg áramkörökre, analóg-digitális illetve digitális-analóg átalakítókra még jó ideig szükségünk lesz.

A valós világ folytonos jeleinek gépi úton bináris számsorozattá történő alakítása nem triviális feladat, a háttérben húzódó elmélet ismerete minden elektromos mérnök számára nélkülözhetetlen. Először is nézzük meg, hogyan épül fel egy digitális jelfeldolgozó rendszer. Az 1. számú rajzon egy mára már klasszikussá vált generikus folyamatirányító (vezérlő) rendszer tömbdiagramját látjuk. Bizony szép számban szerepelnek rajra az analóg elektronikus modulok, annak ellenére, hogy a tendencia mára már az, hogy csak az analóg amit nem lehet digitalizálni. (Sokáig ezt hittük a képekről meg a zenéről is, hát sikerült mindkettőt.)

A rendszer első eleme a folyamat jeleinek mérése, ezeket, ha elektromos jelek akkor az érzékelők, ha egyéb fizikai jelek akkor az elektromos átalakítók képezik az analóg jelkondicionálók bemenetére.



1. Rajz Digitális jelfeldolgozó rendszer tömbvázlata

A jelkondicionálás feladata, hogy egyrészt biztosítsa lehetséges legpontosabb mérést és átalakítást, másrészt hogy védje a mögöttes áramköröket a károsodástól. Az átalakítás pontosságának biztosításához az analóg jelet megfelelően illeszteni, erősíteni/csillapítani, szűrni, szintezni kell. Ha több mérőpontunk van, akkor gondoskodnunk kell az kondicionált analóg jelek megfelelő multiplexeléséről is. A mintavételezést, kvantálást, kódolást az analóg digitális átalakító oldja meg. Az átalakító paraméterei - felbontás, tartomány, mintavételi frekvencia, konverziós idő, sáv szélesség - adják az átalakítás pontosságát. Könnyen belátható, hogy az így kapott jel nem ugyanaz, mint az analóg jel, mivel időben nem lesz folytonos és értékészletében is véges felbontással rendelkezik. Azonban ez (általában) nem okoz számottevő problémát, ha megfelelő bitszámmal feleltetjük meg a jel pillanatnyi amplitudóját, továbbá a mintavételi frekvenciára egy olyan megkötést teszünk, hogy legyen legalább kétszer nagyobb mint a bemeneti jel legnagyobb harmonikusának a frekvenciája.

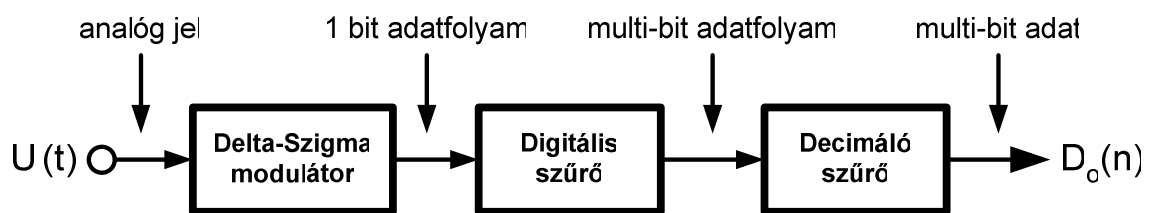
A kapott digitális jellel sok szép művelet végezhetünk ☺. Nagyszerű alul átértesztő, felül átértesztő, sávátértesztő vagy sávzáró szűrőket iktathatunk a jelfolyamba. Meghatározhatjuk (DFT), hogy a jel milyen frekvenciájú, mekkora amplitudójú és milyen fáziseltolású komponenseket tartalmaz. Különböző transzformációkkal (Hilbert) modulálhatunk illetve demodulálhatunk, frekvencia szelektíven keverhetünk (szorozhatunk), pillanatról pillanatra felfelé vagy lefelé, fázist tolhatunk vagy amplitúdót változtathatunk. Tömörítést végezhetünk, spektrális összetevőket emelhetünk ki, késleltethetünk, szabályozhatunk. A feldolgozási algoritmusok implementálása (klónozása, sorozatgyártása) rendkívül egyszerű, hiszen a digitális algoritmusok minden eszközben ugyanúgy működnek és nem kell az analóg áramköröknél megszokott "csavarhúzó" utánhangolásokat" elvégezni.

Láthatjuk, hogy a folyamat jeleinek mérésével és feldolgozásával jelentős információ birtokába kerültünk. Most nézzük meg az érem másik oldalát is, hogyan állítjuk elő a folyamatot vezérlő és szabályozó jeleket. A digitálisan előállított (generált) információt előbb át kell alakítanunk analóg jelekké. A digitális analóg átalakításnál véges időfelbontással egy lépcsős analóg jelet

kapunk. Ha a lépcsőket el szeretnénk tüntetni, akkor nincs más dolgunk, minthogy az átalakító frekvenciájának a felére analóg alul áteresztő szűrést alkalmazunk. Ekkor a lépcsős jel helyett visszkapjuk a folytonos analóg jelet. Ha több végrehajtó elemet szeretnénk vezérelni, vagy szabályozni, akkor megint gondoskodnunk kell a megfelelő multiplexelésről. Természetesen a kimeneti jeleket kondicionálnuk kell, ezáltal biztosítjuk a megfelelő (teljesítmény)erősítést, szintezést és adaptálást a megfelelő végrehajtó elem számára.

A következőkben egy jellemző példával próbálom szemléltetni, az elektronikus mérés technikában az utóbbi években történő átütő változásokat. Ugyanakkor fogalmat alkothatunk arról az új mérnöki filozófiáról (gondolkodásmódról) is, amely lehetővé tette (kirobbantotta) a valós és a virtuális világunk rohamos (rohanó) változását.

Láthattuk, hogy az elektronikus rendszerek kitüntetett eleme az analóg-digitális átalakítás. Többféle átalakító létezik, ezeknek rendszerint egymásnak ellentmondó követelményeket kell kielégíteniük: nagy sebességű átalakítás, nagy felbontás, ugyanakkor minél kisebb méret és fogyasztás, továbbá érzéketlenség a környezeti zajokkal szemben. Mindehhez még hozzáadódik, hogy a legtöbb analóg-digitális konvertert manapság a digitális jelfeldolgozó eszközökkel egy áramkörbe integrálják, ami további kihívást jelent a analóg áramköri részek tervezőinek, mivel a rendelkezésre álló gazdaságos digitális integrált áramköri technológia (CMOS), nem alkalmas analóg alkatrészek pontos elkészítéséhez (ellenállás, kondenzátor), amelyek kulcsfontosságúak a klasszikus átalakítók készítésében. A vázolt problémákra megoldást nyújtanak a Delta - Szigma átalakítók (Δ - Σ) amelyek a visszacsatolt analóg digitális átalakítók egy speciális csoportját alkotják. Ebben az esetben ugyanis nem egyszerűen a bemenő jelet hasonlítjuk össze a visszacsatoló konverter kimeneti jelével, hanem a visszacsatolt körbe szűrőt helyezve a kvantálási zaj formálásával a kvantálási zajt és a hasznos jelet elválasztjuk egymástól. Másik jellemzőjük, hogy igen magas bitszámot lehet velük elérni, de nem precíz analóg áramköri elemek (nagy felbontású analóg-digitális és digitális-analóg konverterek) felhasználásával, hanem csak egyszerű 1 bites konverterek alkalmazásával, és a bemenet igen gyakori, a kimeneti órajelnél lényegesen magasabb frekvenciájú mintavételezésével.

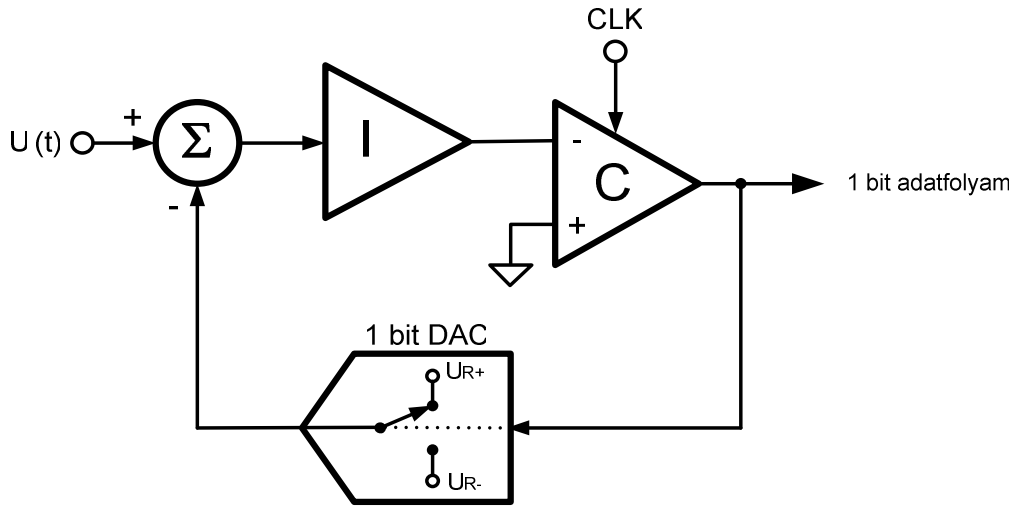


2. Rajz Delta-Sigma analóg-digitális átalakító tömbvázlata

Mint ahogy a 2. számú rajzon is látható, a Delta-Sigma átalakítók három fő funkciót egyesítenek magukban:

- Delta-Sigma modulátor: ez a fokozat oldja meg az analóg-digitális átalakítást, általában egy bites, de mindenképpen kis felbontású átalakítóval. A fokozat feladata a zajformálás is, olyan átviteli karakterisztika kialakításával, amely kisfrekvencián a hasznos jelet kis torzítással átviszi, míg a kvantálási zaj szempontjából igen nagy a csillapítása.
- Digitális alul áteresztő szűrő, amely kettős szerepet tölt be. Egyrészt kiszűri a magas frekvenciás jeleket, ahol hasznos jel nem, csak a kvantálási zaj található, másrészt átlapolás gátló szűrőként működik a decimáló fokozat előtt.
- Decimáló fokozat, amely a nagy mintavételi frekvenciájú digitális jelet újramintavételezi alacsonyabb frekvenciával.

A Delta-Sigma modulátor elvi felépítése a 3. számú rajzon látható. Látható, hogy tartalmaz egy bemeneti összegező áramkört, egy integráló tagot, egy tároló kimenetű komparátort, és egy nagy sebességű 1 bites digitális-analóg konvertert. Egy ciklus tartalma alatt az integrátor összegezi a pillanatnyi bemeneti jelet és az előző ciklus kimeneti jelének megfelelő referenciasfeszültség különbségét. Mikor az integrátor kimeneti jele keresztezi a komparátor zérópontját, a komparátor kimenete értéket vált, ezért a következő ciklus elején módosul a bemeneti jeltől kivont referencia feszültség polaritása. Tehát a kimeneti - sűrűn mintavételezett - bitfolyam igyekszik követni a bemeneti jel középértékét.

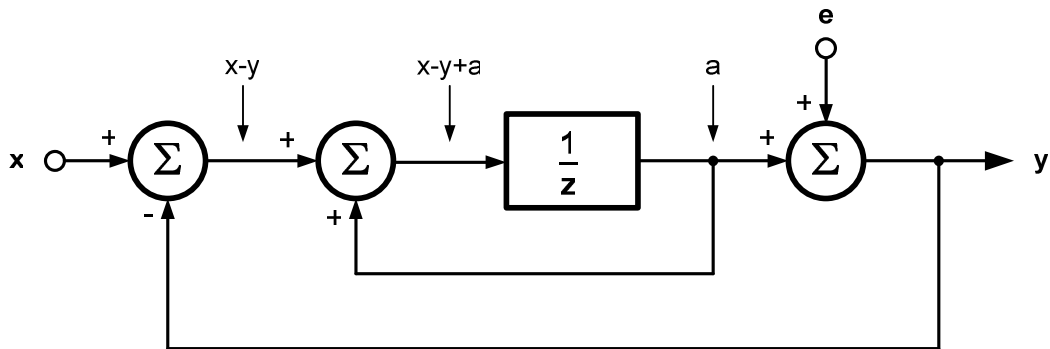


3. Rajz Delta-Szigma modulátor elvi felépítése

A következő rajz (4.) a Delta-Szigma modulátor z tartománybeli modelljét mutatja. Alkalmazva a kvantálási hiba additív zajmodelljét, a konverter közelítő lineáris modelljét kapjuk, amelyből levezethető, hogy a modulátor y kimeneti jele az i időpillanatban:

$$y_i = x_{i-1} + (e_i - e_{i-1}) \quad (1)$$

ahol e_i a kvantálási zaj az i időpillanatban, e_{i-1} pedig az előző időpillanatban.



4. Rajz Delta-Szigma modulátor z modellje

Valóban, ha az $\frac{1}{z}$ késleltető modul kimeneti jele "a", akkor felírható, hogy: $a = (x - y + a) \cdot \frac{1}{z}$,

tehát $a = \frac{x - y}{z - 1}$. Mivel $y = a + e = \frac{x - y}{z - 1} + e$, következik, hogy: $y = x \cdot \frac{1}{z} + e \cdot \left(1 - \frac{1}{z}\right)$, tehát az (1)

összefüggéshez jutottunk. A hasznos jel, valamint a kvantálási zaj transzfer karakterisztikája ebben az esetben:

$$STF(x) = \frac{1}{z}, \quad \text{illetve:} \quad NTF(z) = \frac{z-1}{z}.$$

Ez azt jelenti, hogy a bemeneti jel a kimeneti jelben többé kevésbé változatlanul jelenik meg, de egy mintavételezési periódussal később, a kvantálási zaj viszont eltolódik a magasabb frekvenciák felé. Ugyanerre a konklúzióra jutunk, ha a modulátor frekvencia tartománybeli modelljét vizsgáljuk (5.

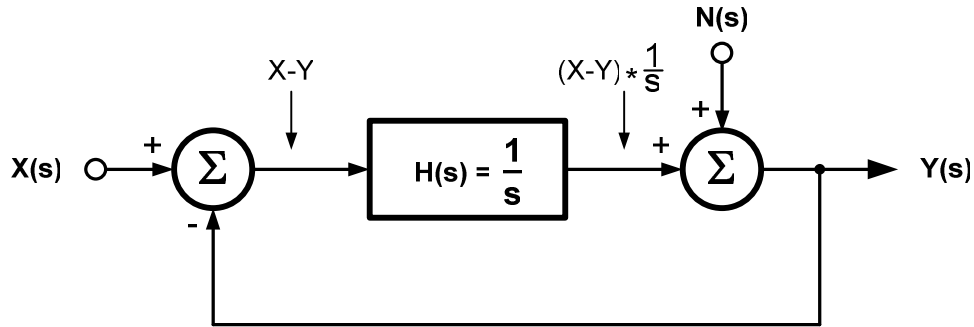
rajz). Megfigyelhető, hogy az integrátort egy $H(s) = \frac{1}{s}$ transzfer karakterisztikájú szűrővel

helyettesítettük, a kvantáló modult pedig egy $N(s)$ zajforrással. Mivel $Y(s) = (X(s) - Y(s)) \cdot \frac{1}{s} + N(s)$,

következik, hogy:

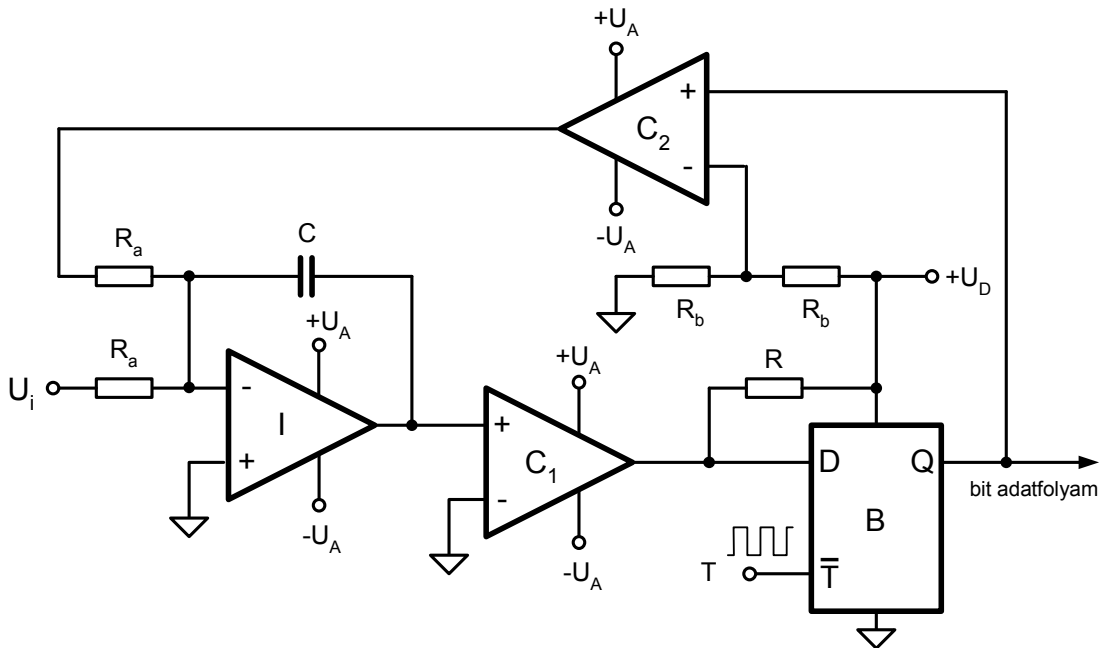
$$Y(s) = \frac{1}{s+1} \cdot X(s) + \frac{s}{s+1} \cdot N(s) \quad (2)$$

A modulátor tehát alul áteresztő szűrő hatással van a bemeneti jelre, és felül áteresztő szűrő hatással van a kvantálási zajra.



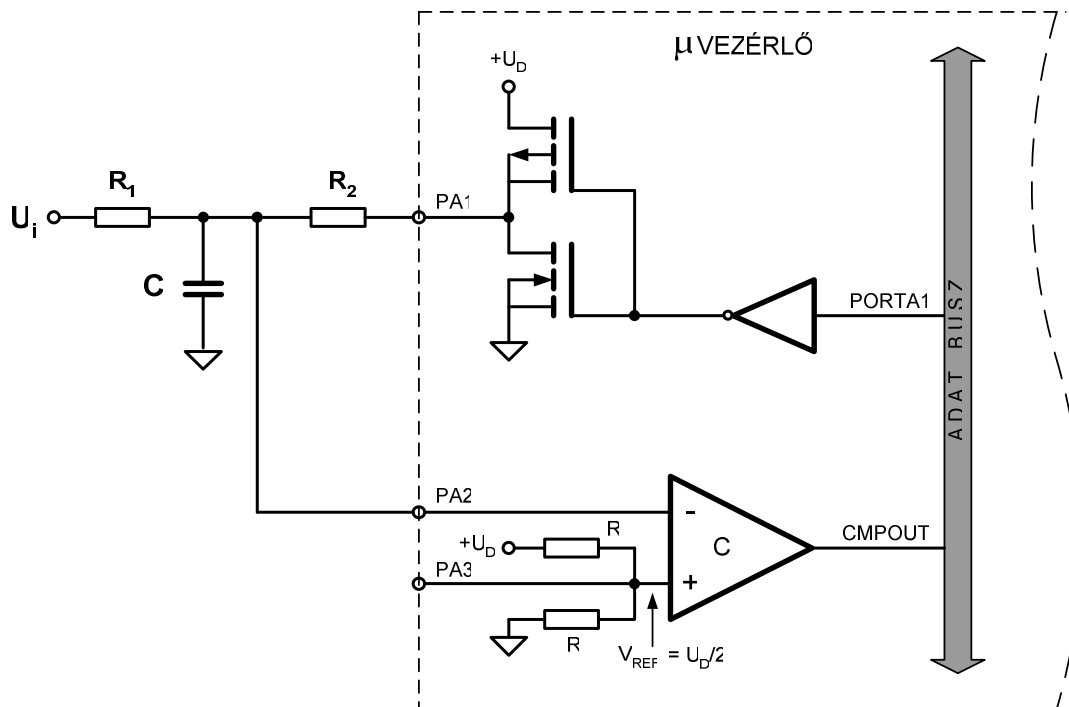
5. Rajz Delta-Sigma modulátor frekvencia modellje

Építsünk most meg egy elemi Delta-Sigma modulátort egy analóg elektronista nézőpontjából kiindulva. Ahogy a 6. rajzon látható, a bemeneti analóg jelet egy műveleti erősítővel kialakított integrátor bemenetére kötjük. Az integrátor kimenetén a feszültség növekedése arányos a bemeneti jel nagyságával, iránya fordított a bemeneti jeléhez képest. Ezt a feszültséget egy analóg komparátor segítségével hasonlítjuk össze a referencia (0V) feszültséggel. Ez játssza az 1 bites analóg-digitális konverter szerepét. A komparátor - nyitott kollektoros - kimeneti jelét egy D típusú bistabil tárolja a ciklikusan lefutó T órajel pillanatában. A bistabil kimeneti értékét - ami egyben a modulátor kimeneti jele is - visszavezetjük egy másik komparátor bemenetére. Ez az áramkör játssza az 1 bites digitális-analóg konverter szerepét, hiszen a föld aszimmetrikus (0V/+U_D) digitális jelet alakítja át szimmetrikus (+U_A/-U_A) analóg jellé. Ezt a jelet vezetjük vissza az integrátor másik (összegez) bemenetére.



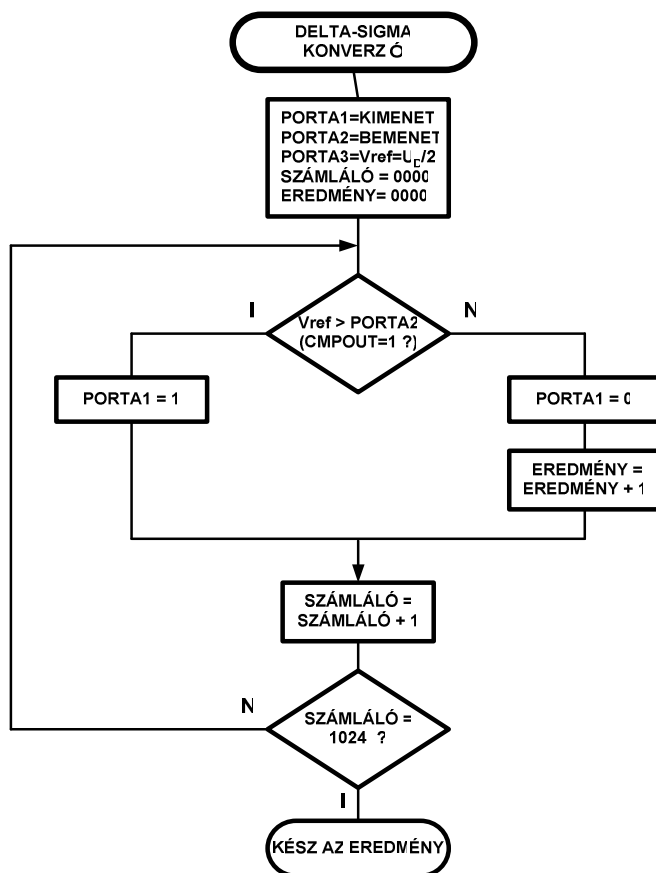
6. Rajz Delta-Sigma modulátor, analóg módon tálalva

Most egy digitális elektronikát pártoló elektronista szemszögéből próbáljunk megépíteni egy Delta-Sigma modulátort. A 7. rajzon egy alapkategóriás mikrovezérlővel és három passzív alkatrészsel megépített modulátor felépítése látható. A mérendő analóg jel az R₁ összegző ellenálláson keresztül kapcsolódik az integrátor szerepét betöltő C kondenzátorra. Az 1 bites analóg-digitális konverter funkcióját a vezérlő beágyazott komparátor perifériája látja el. A referencia feszültséget a tápforrás felére programozzuk. Az 1 bites digitális analóg konvertert program szinten implementáljuk és az egyik kimeneti kapu komplementer meghajtó tranzisztorait használjuk mint kapcsolóelemeket. A visszacsatolt jelet az R₂ ellenálláson keresztül vonjuk ki a bemeneti jelből. Természetesen az így kialakított rendszert egy rövid kis program fogja működtetni, ennek a folyamatábráját (organigramját) és gépi kódú utasítássorozatát a 8. rajzon láthatjuk.



7. Rajz Delta-Sigma modulátor, digitális módon tálalva

Két regisztert használunk: egy ciklusszámlálót és egy eredményszámlálót. A komparátor kimenetét minden ciklus elején teszteljük. Aszerint, hogy a C kondenzátor feszültsége nagyobb, vagy kisebb mint a megállapított referenciafeszültség értéke (például +2,5V), a negatív visszacsatoló hurkon keresztül (PORTA1) elvégezzük az 1 bites digitális-analóg konverter feladatát.



8. Rajz A digitális modulátor folyamatábrája

Az eredményszámlálót tartalmát eggyel növeljük minden olyan ciklusban, amikor a bemeneti jel nagyobb mint a referencia jel értéke. A konverzió 1024 ciklus elvégzéséig tart ebben az esetben, ez azt jelenti, hogy 10 bit felbontással dolgoztunk ($2^{10} = 1024$).

A bemutatott alkalmazásokból megállapíthatjuk, hogy a Delta-Szigma modulátor - felépítéséből adódóan - egyik része folytonos idejű rendszerként írható le, míg a másik része diszkrét idejű rendszerként modellezhető. A modellezést tovább nehezíti, hogy a folytonos és diszkrét idejű részek ugyanazon - negatív visszacsatolású - hurokban vannak. A helyzetet egyszerűsíti, ha az analóg áramköri részeket kapcsolt kapacitású (SC) áramköri elemek alkalmazásával valósítjuk meg, ilyenkor ugyanis a teljes rendszerre alkalmazhatók a diszkrét idejű rendszerek leírására szolgáló módszerek. Ezen kívül még a nagyfrekvenciás digitális áramkörök kapcsolásából eredő áthallás problémáját is megoldjuk.

A 9. rajzon egy kapcsolt kapacitású technikával megvalósított integrátort láthatunk. A C_1 kondenzátor töltését FET tranzisztorok segítségével váltakozva kapcsolgatjuk a bemeneti jel illetve a műveleti erősítő bemenete között, a T_1 és T_2 órajeleknek megfelelően. Az n időpillanatban, mikor $T_1=1$, a C_1 kondenzátoron felhalmozódó töltésmennyiség: $q_1(n) = C_1 \cdot u_{be}(n)$. Az $n+1$ időpillanatban, mikor $T_2=1$, a C_1 kondenzátor kisül a műveleti erősítő virtuális referenciapotenciálján keresztül. Következik, hogy a C_2 kondenzátoron megjelenő töltésmennyiség értéke: $q_2(n+1) = q_2(n) + q_1(n)$. Felírható tehát a következő összefüggés a ki- és bemeneti feszültségekre:

$$C_2 \cdot u_{ki}(n+1) = C_2 \cdot u_{ki}(n) + C_1 \cdot u_{be}(n) \quad (3)$$

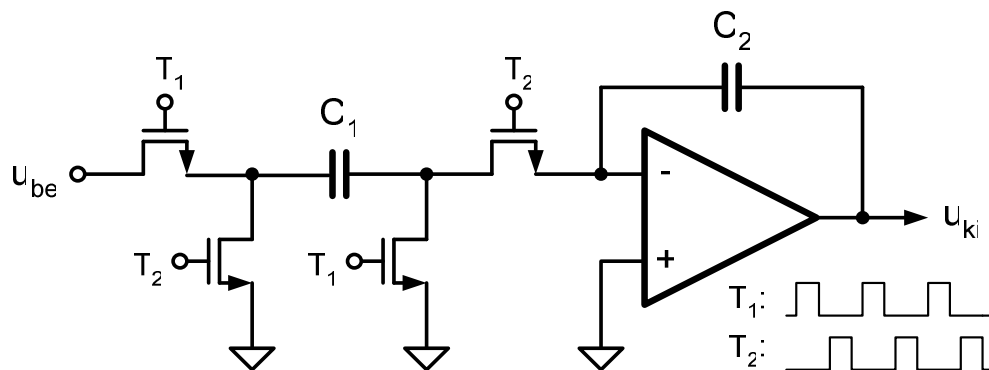
A (3) egyenletet átranzformálva z tartományba, kapjuk, hogy:

$$z \cdot C_2 \cdot u_{ki}(z) = C_2 \cdot u_{ki}(z) + C_1 \cdot u_{be}(z)$$

vagyis az áramkör transzferkarakterisztikája:

$$H(z) = \frac{u_{ki}(z)}{u_{be}(z)} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{z-1} \quad (4)$$

ami tényleg egy elsőfokú késleltető áramkör (diszkrét integrátor) karakterisztikája.



9. Rajz Kapcsolt kapacitású integrátor

Végül, a bemutatott példák alapján levonhatunk egy pár fontos következtetést. A technológiai fejlődés új játékszabályokat állapított meg az elektronikus rendszerek felépítése és működése között. Az új típusú mérnöknek is állandóan fejleszteni, képeznie kell magát, meg kell ismernie az új gondolkodásmódot, szemléletmódot. Egy egészséges mérnöki szemlélet a folyamatosan (át)értékelt technológia, eszközök, folyamatok, készségek helyes keverékét jelenti. Manapság már a jó elektronikai előadások sem egy adott áramkör, berendezés, rendszer használatát magyarázzák el, hanem alapelveket, gondolkodást tanítanak. A rendszerek megnövekedett információs szerepe, egyre fokozódó digitális intelligenciája, szükségessé tette a tervezői feladatok mindinkább funkcionális elektronikai szinten való megközelítését. Szinte naponta jelennek meg újabb, nagyobb kapacitású áramkörök, amelyekkel még nagyobb teljesítményű rendszerek fejleszthetők. Ebben az esetben a megfelelő elemzés, a tervezési technikák használata, a tervező felkészültsége, tapasztalata és kreativitása csodákat tehet.