



Bevezetés az analóg IC tervezésbe

2023. Október 12.

Marek Gábor
gabor.marek@indiesemi.com

Tartalom

- Bemutatózás
- Miért analóg?
- Analóg jelek
- Koncepionális alapok
- Szükséges ismeretek
- Tervezés
- Analóg áramkör szimuláció

BEMUTATKOZÁS

INDIE SEMICONDUCTOR

2000: Integration Hungary Kft. megalapítása

- ISM sávú (300-1000MHz) szintézeres (PLL) rádió chippek tervezése
- 3 generáció, +ZigBee, utolsó 130nm technológián

2008: Silicon Laboratories

- felvásárolta az Integration Hungary Kft-t a rádiós chipjei miatt
- újabb ISM rádió generációk, TV tuner

2012: a csapat átkerül a teljesítmény elektronikai divízióba

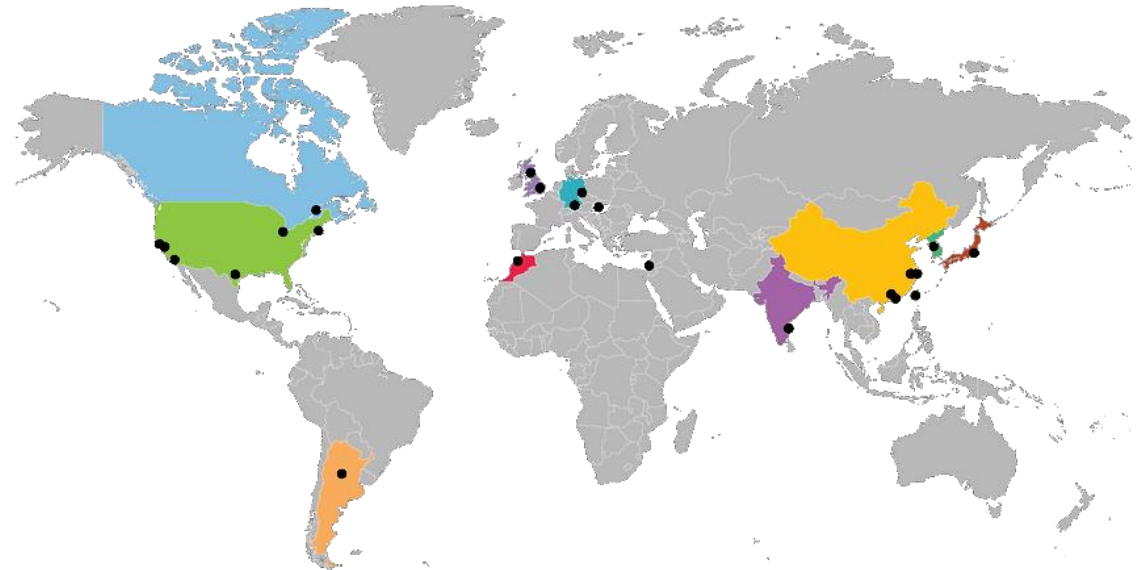
- kapacitív izolátorok, FET meghajtók
- PoE (Power-over-Ethernet)
- automotive

2021: indie Semiconductor Hungary Kft. megalapítása

- Los Angeles melletti központ (Aliso Viejo, CA)
- Tervező irodák: Austin, Boston, Edinbrough, Drezda, München, Cordoba, Rabat, Haifa, Budapest (18 fő + gyakornokok)
- Profil: autóipari ASIC, analóg IC + uC egy tokban

Termékek:

- LED meghajtók (fényszóró)
- vezeték nélküli töltő
- AIRPLAY
- LIDAR
- ultrahang
- ...



indie Semiconductor – portfólió ízelítő

indie



iND83301

Surya™ LiDAR SoC



iND87300

Highly Integrated Dual-Channel
USB Power Delivery System



GW5200

Automotive Camera Video
Processor.



iND83080

Precision Matrix LED Controller
for Exterior Lighting



iND83207

Sonosense™ an Ultrasonic
Parking Assist with
Transformer Drive



iND83211

Driver for High-power LEDs

Út az analóg tervezéshez

- Analóg tervezés önlab, szakdolgozat, diploma témák (BME-EET)
- Gyakornoki program (indie Semiconductor Hungary Kft.)
 - Jelentkezni:
 - tamas.marozsak@indiesemi.com
 - Angol CV

MIÉRT ANALÓG?

A múlt

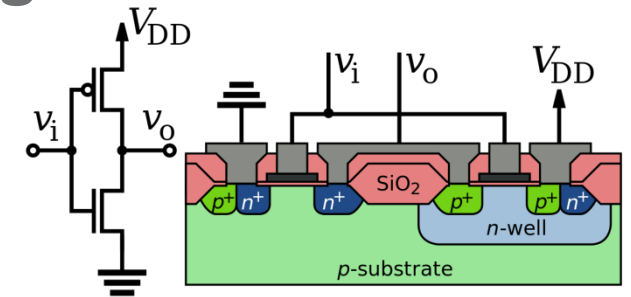
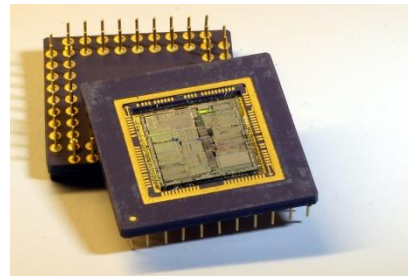
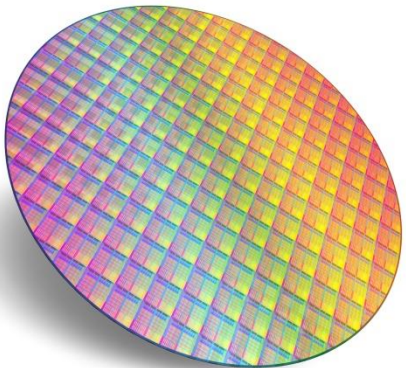
- A 80-as évek elején a szakma elkezdte temetni az analóg tervezést
- A digitális algoritmusok hatalmasat fejlődtek
- Az IC technológia egy hatékony implementációt biztosított ezeknek az algoritmusoknak
- A technológia fejlődésével egyre több korábban analóg jelfeldolgozás került át a digitális tartományba
- Sokan úgy gondolták ez a folyamat addig tart ameddig minden tervezés digitálissá nem válik
- Sok analóg tervező más területen kezdett munkát keresni

Miért van mégis hatalmas igény analóg tervezőkre napjainkban?

“Manapság már minden digitális a világunkban”
- hangzik el sokszor, de valóban így van?

Analóg integrált áramköri technológia majdnem olyan mértékben fejlődik, mint a digitális technológia. Egy mai okostévében jelentősen több az analóg elektronika, mint az analóg televíziókban volt évtizedekkel ezelőtt. Az analóg technológia sosem fog eltűnni, ennek alapvető oka az, hogy

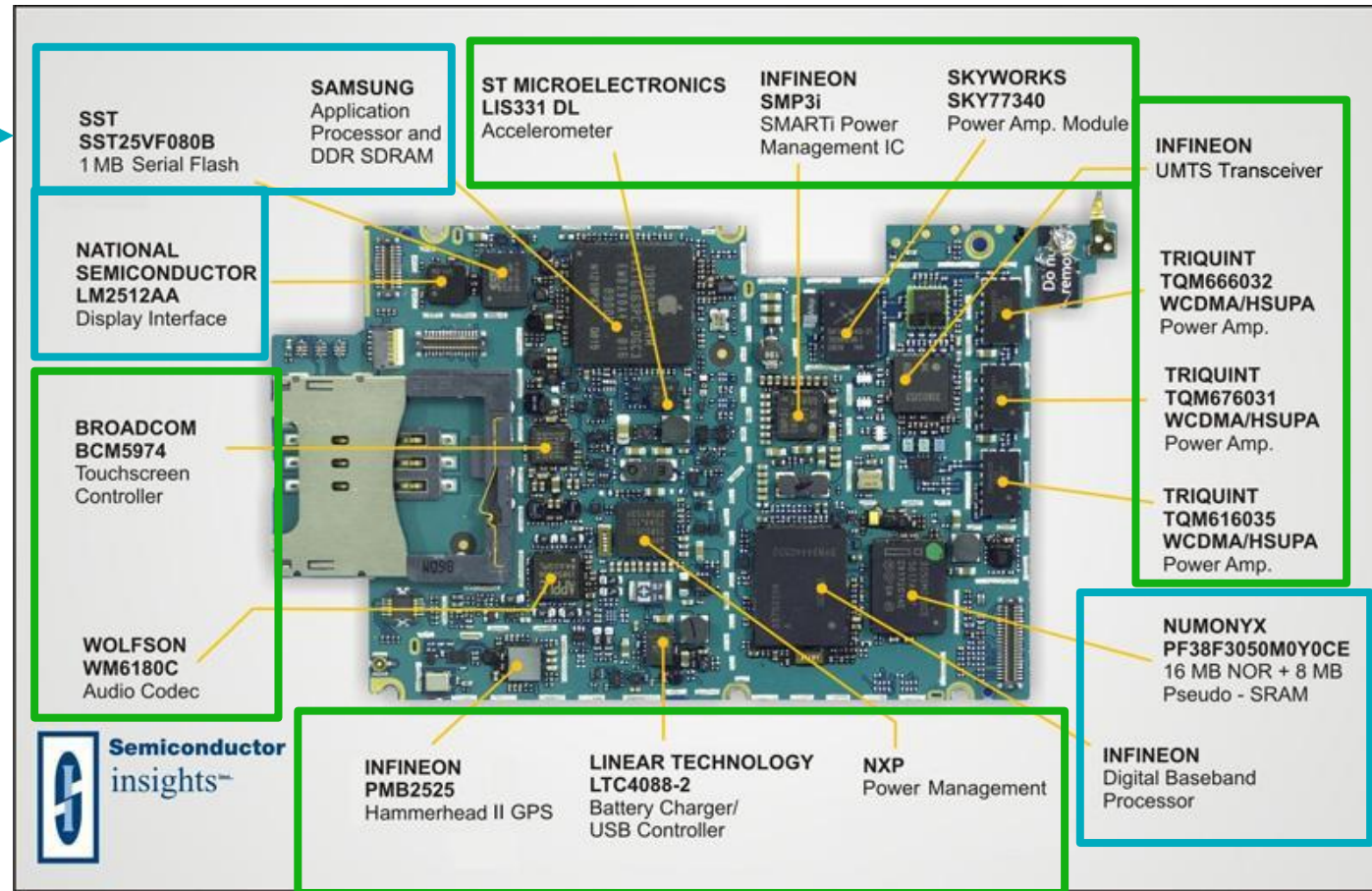
A világ valójában fundamentálisan analóg...



Analóg és digitális chipek az Iphone alaplapján

Manapság már ritka a csak analóg, vagy csak digitális IC. A legtöbb IC már rendelkezik egyaránt analóg és digitális tartalommal is, ezeket hívjuk kevertjelű IC-knek, viszont ha mégis különbséget kellene tenni...

Digitális Chipek →

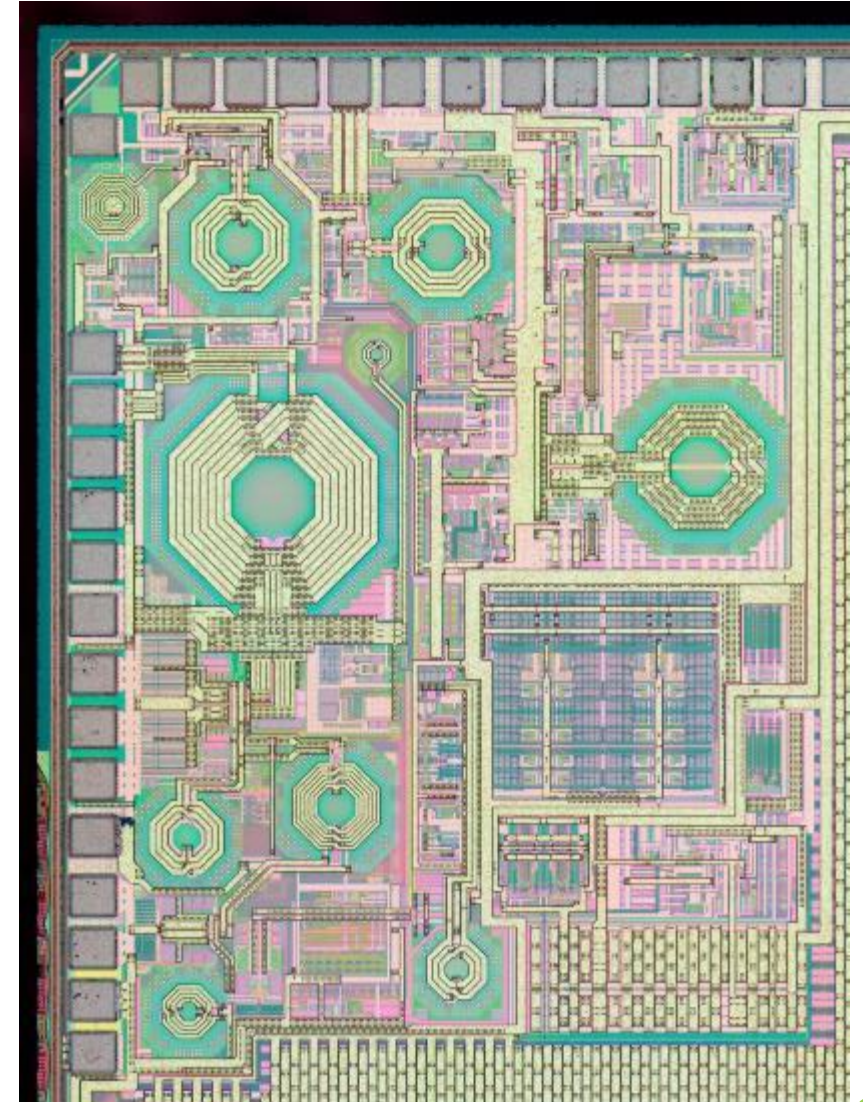
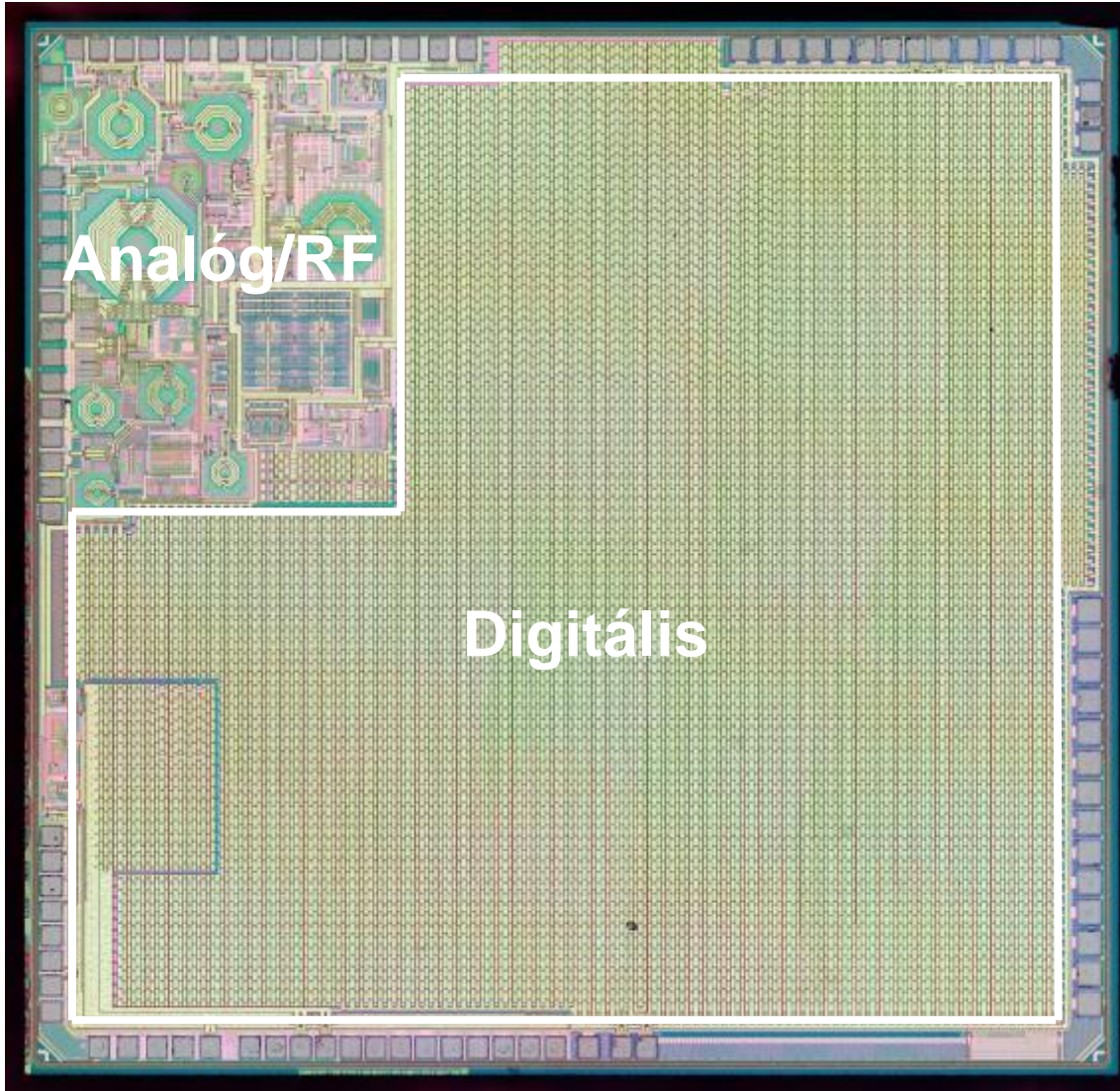


→ Analóg Chipek

Hogy néz ki egy modern microchip? ESP32

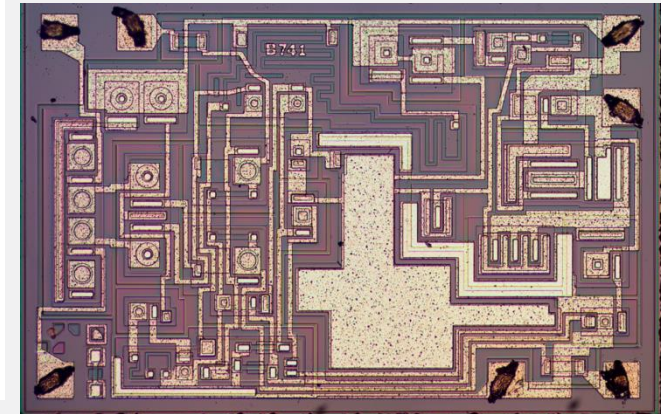
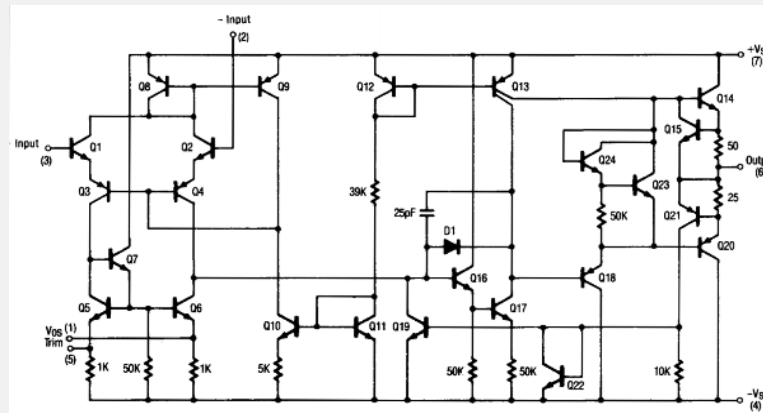
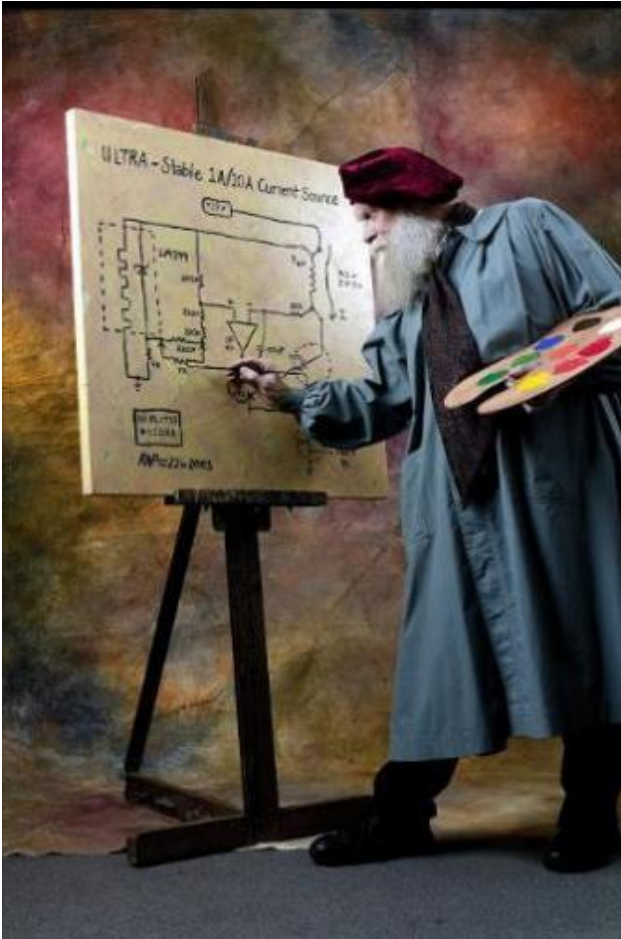


ESP32
32 bites system-on-
chip mikrokontroller
integrált
WiFi és Bluetooth
funkcióval



Analóg IC tervezés: tudomány vagy művészet?

uA741 – 1968 David Fullagar (Fairchild)

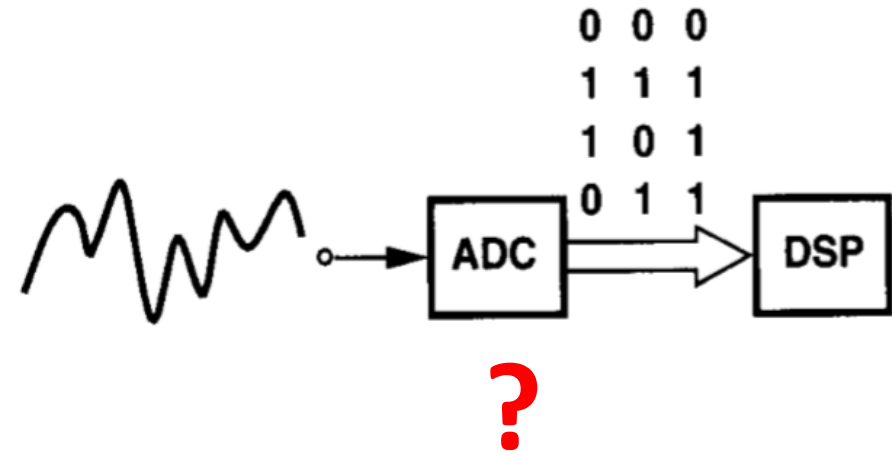


ANALÓG JELEK

Természetes jelek feldolgozása

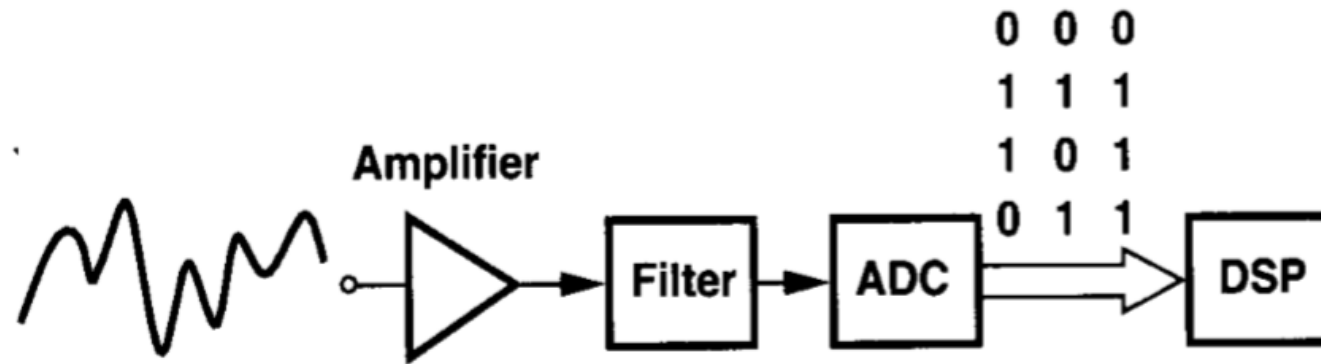
A természetben előforduló jelek analógok:

- mikrofon [μV – $n \cdot 100mV$]
- CCD cella [néhány $e/\mu s$]
- szeizmográf [μV – $n \cdot 100mV$]



Természetes jelek feldolgozása

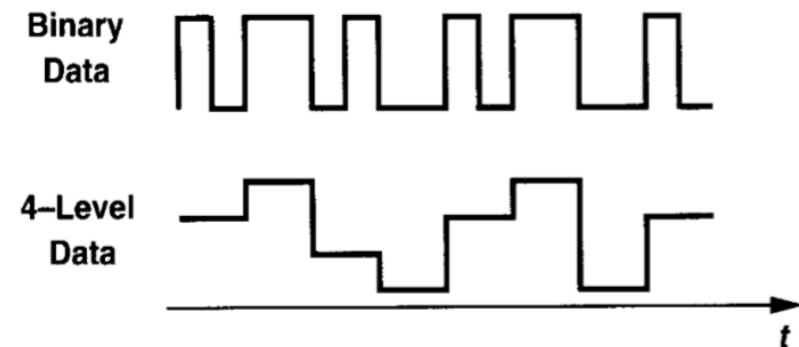
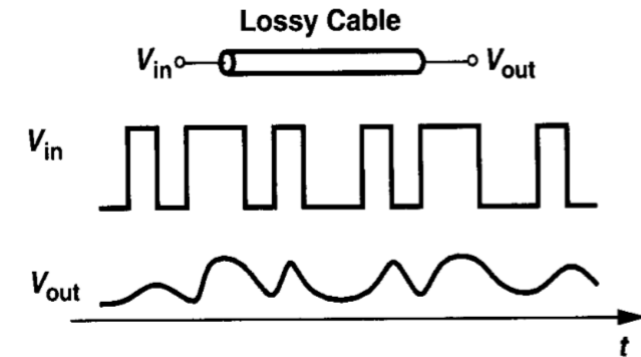
- Gyakorlatban a természetes jelek elektromos megfelelője túl kicsi direkt digitalizáláshoz
- A jeleket gyakran terheli sávon kívüli zavaró jel



- Erősítővel javítunk a jelszinten
- Analóg szűrővel elnyomjuk a sávon kívüli összetevőket

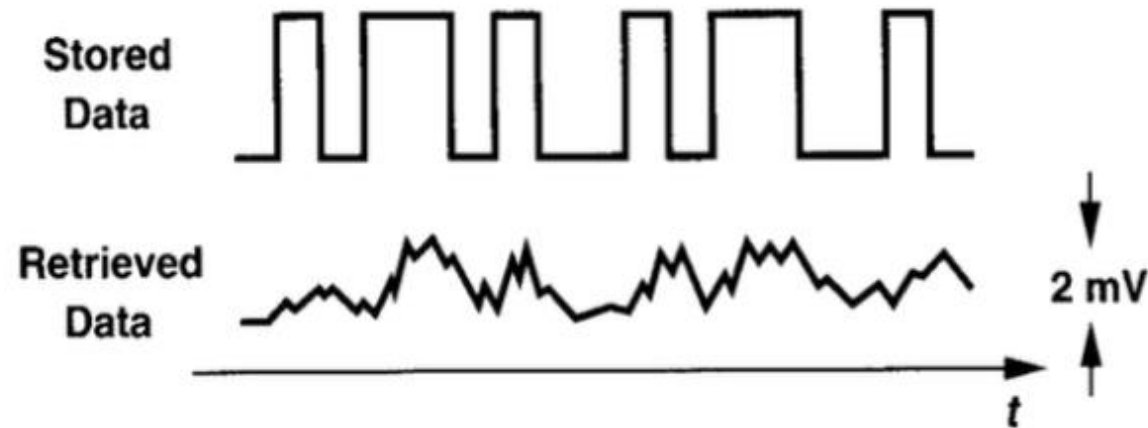
Az erősítő és szűrőtervezés egy aktív kutatási terület a mai napig.

- gyors bináris adatfolyam hosszú vezetőkön
 - csillapítás
 - torzítás
- vevő oldalon erősítés, szűrés szükséges
- "multi-level" használata
- Egymást követő biteket csoportosítva 4 szimbólum (jelszint) egyikét rendelhetjük hozzá
- sávszél igény feleződött, ADC, DAC precizitás igény növekedett



Merevlemez elektronika

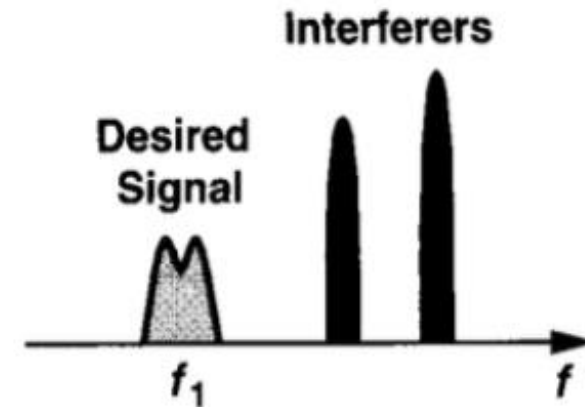
- Egy számítógép merevlemezén bináris adatot mágneses elven tároljuk.
- A mágneses fej a mágneses információt villamos jellé alakítja.



- A kis amplitúdó, nagy zaj és torzítás miatt a korábbi erősítő, szűrő digitalizáló architektúra szükséges
- Valamennyi blokk tervezése nagy kihívás, egy mai 10000 RPM HDD 1.1Gb/s-es sebességet is megkövetelhet.

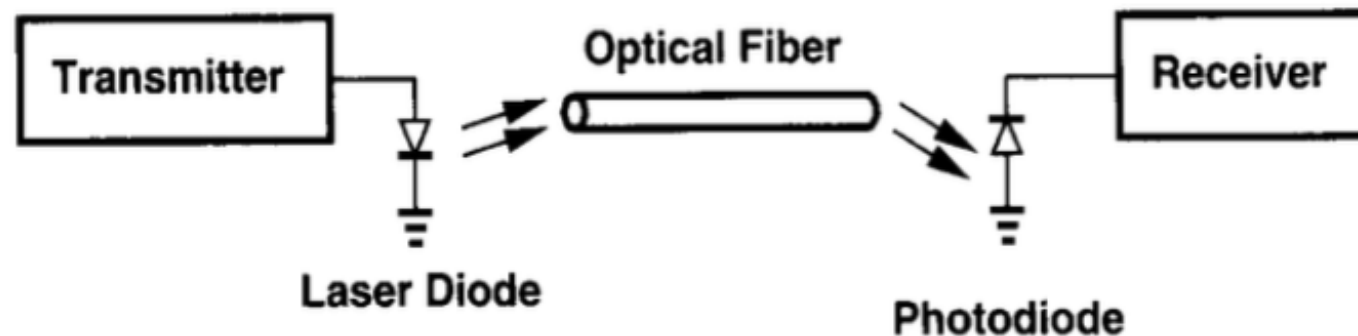
Wireless vevők

- Egy RF vevő antennája által vett jel (pl. mobil)
 - néhány μV ,
 - center frekvencia 1GHz vagy magasabb,
 - nagy zavaró jelek is jelen vannak.
- Trade-off
 - zaj
 - működési frekvencia
 - interferenciák toleranciája
 - teljesítmény disszipáció
 - költség



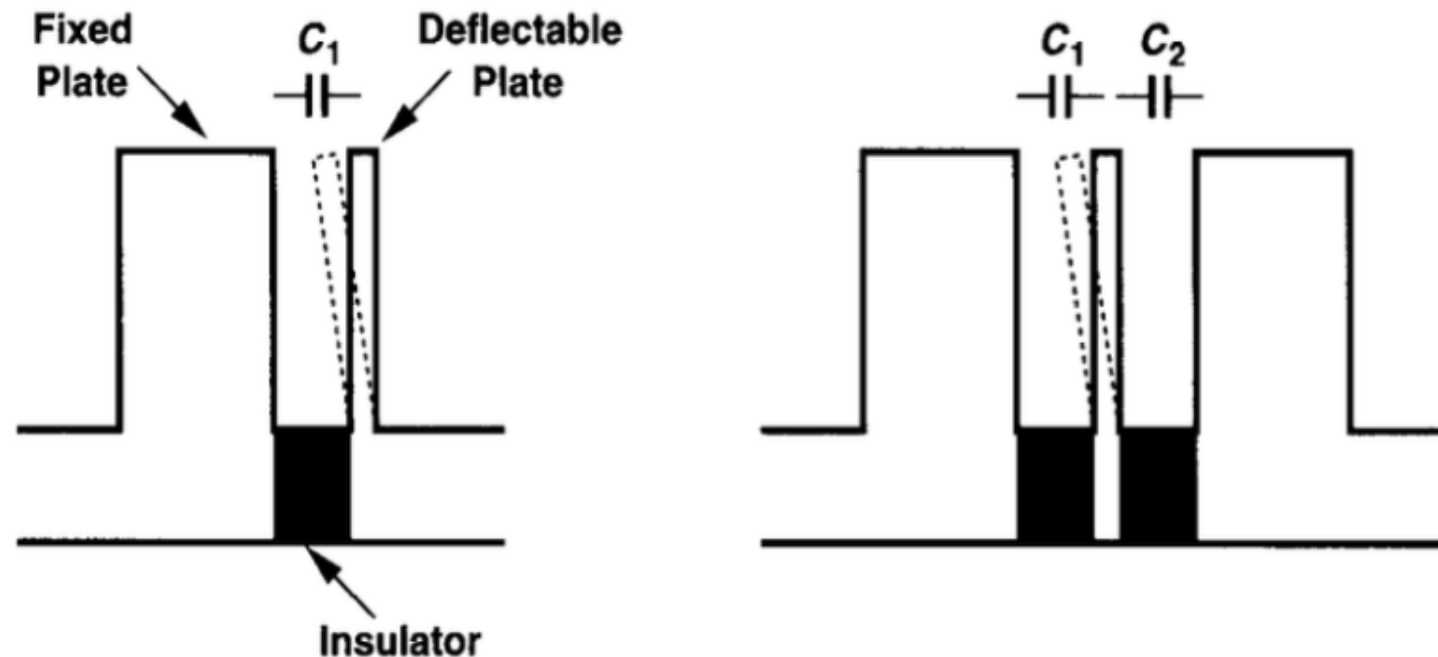
Optikai vevők

- Nagy távolság és adatátviteli sebesség esetén a hagyományos vezetők nem használhatók
- A jelet fénné alakítva (lézerdióda), optikai szálon tudjuk szállítani
- A vevő oldalon kis elektromos árammá alakítva (fotodióda) a jelet folytatódhat a feldolgozás
- A vevőnek kis jelszintet kell feldolgozni nagy sebességgel (alacsony zajú, nagy sávszélességű áramkörök)
- Ma optikai vevők 10-40 Gb/s tartományban működnek.



Szenzorok

- Kiragadott példa: gyorsulásérzékelő
- Változtatható kapacitáson alapul
- Pontosán kell mérni 1%-nál kisebb kapacitás változást



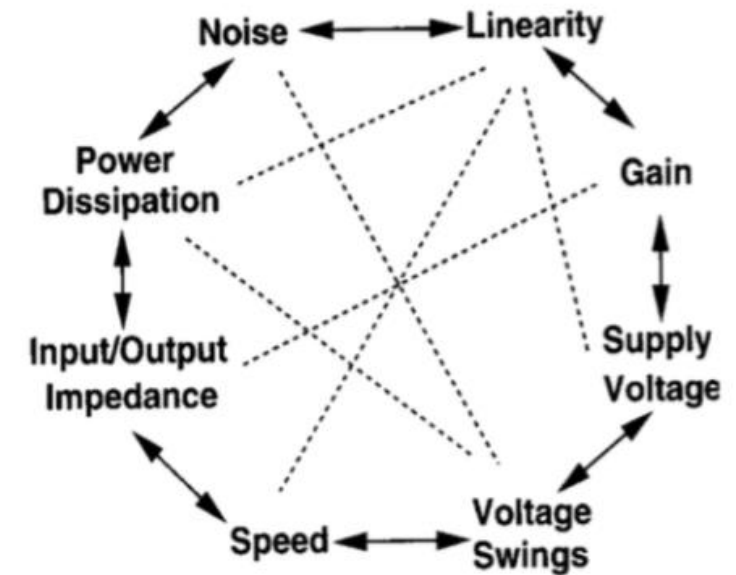
Processzorok, memóriák

- Egyre nagyobb analóg tudás szükséges hozzá
- A legtöbb időzíteni probléma az adat és órajel vonalak megfelelő elosztására vezethető vissza, különösen nagy chip vagy ahol nagy sebességet követelünk meg, a jeleket analóg hullámokként kell kezelni
- Nemidealitások
 - a jel és tápvezetők összeköttetésein (IR drop)
 - tokozás paraziták (bonding induktivitás, induktív csatolás, kapacitív csatolás)
- Félvezető memóriák nagy sebességű kiolvasó erősítőket használnak, ami számos analóg technikát követel meg

“A nagy sebességű digitális tervezés valójában analóg tervezés.”

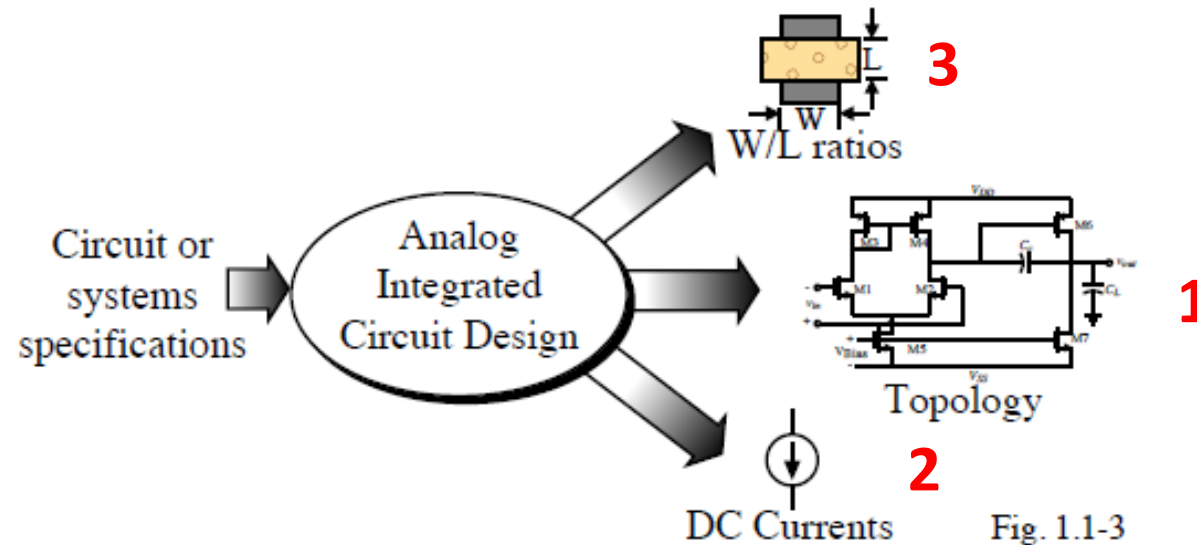
Mitől nehéz az analóg tervezés?

- A digitális áramkörök dominánsan egy trade-offal állnak szemben: sebesség vs disszipáció
 - analóg tervezésnél multi-dimenziós trade-off: sebesség, disszipáció, erősítés, pontosság, tápfeszültség, ...
- Analóg áramkörök érzékenyebbek zajokra, áthallásokra és más zavaró jelekre
- Másodlagos jelenségek (pl.: body effect, csatorna rövidülés) jobban befolyásolják az analóg áramkörök teljesítményét
- “Kihegyezett” analóg áramkörök tervezése nem automatizálható, valamennyi eszközt kézzel kell méretezni és layoutozni (nincs szintézis)
- Számos jelenség modellezése, szimulációja problémás, a tervezőknek a tapasztalatukra és intuíciójukra kell hagyatkozni egy szimuláció értelmezésekor



KONCEPCIONÁLIS ALAPOK

- Az áramkör tervezés a specifikációtól az áramköri megvalósításig tart. A tervezés be- és kimenetei:



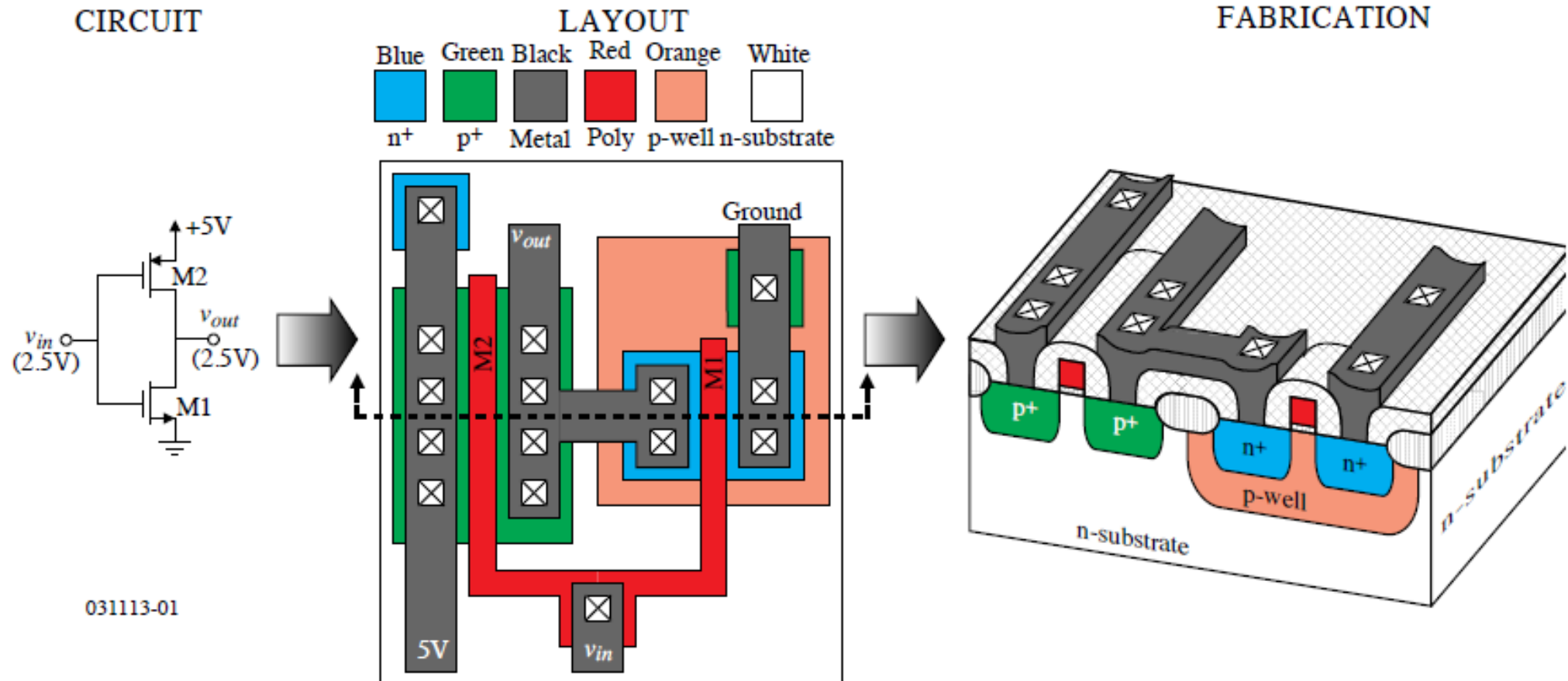
- A tervezéshez aktív és passzív eszközmodellekre van szükségünk, hogy
 - elkészítsük a terveket,
 - verifikáljuk a terveket,
 - meghatározzuk a terv robusztusságát.

A tervezés lépései

- Topológia kiválasztása
 - korábbi megoldások vizsgálata
 - olyan megoldást válasszunk, ami egyszerűen kezelhető
- A kiválasztott topológia vizsgálata
 - a várható tulajdonságok analízise számítógép nélkül
 - határozzuk meg az előnyeit, hátrányait a megoldásnak
- A kiválasztott topológia részletes implementálása
 - használjuk a legfontosabb alapelveket és technikákat az implementációhoz (karakterisztika egyenletek, Kirchhoff, ...)
 - vizsgáljuk meg ismét az áramkört CAD szimulációkkal és számításokkal
- Verifikáció
 - verifikáljuk a megoldást pontos eszköz modellekkel, minden technológia „corner”-ben, hőmérsékleten, véletlen szórásokkal (mismatch)
 - a kézi számításhoz képesti nagy eltéréseket nagyon meg kell vizsgálni

Fizikai tervezés

- Fizikai tervezés során a kapcsolási rajzot valósítjuk meg különálló geometriai alakzatokkal (layout). Ez a layout kerül felhasználásra, hogy legyártsuk a valódi három dimenziós IC-t.

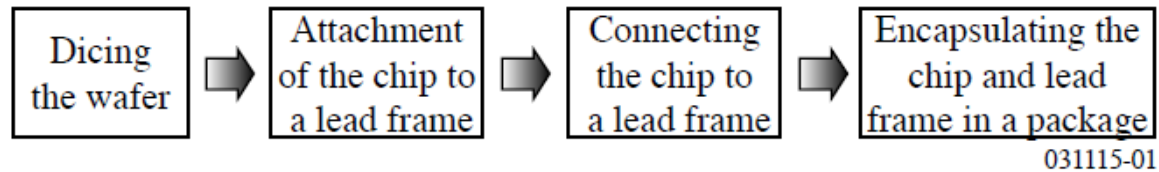


031113-01

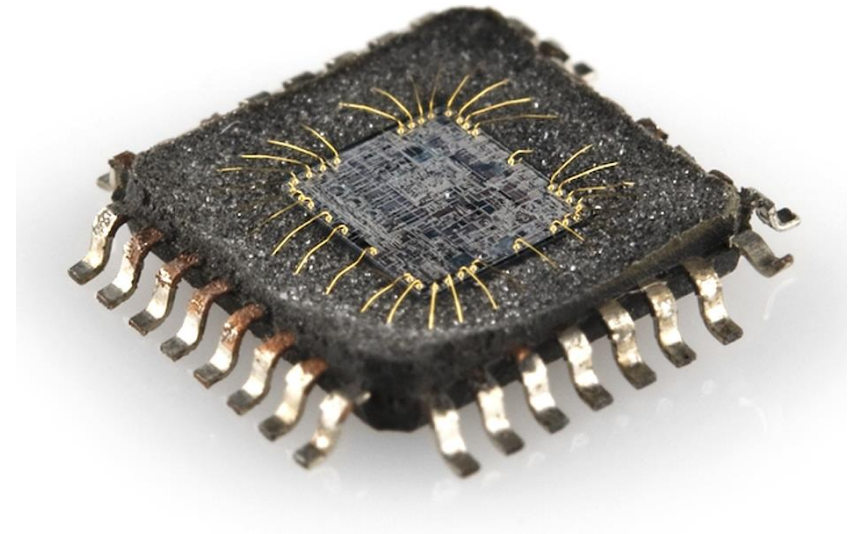
Layout

- A bemenetek eszköz méretek (pl. W/L) és a kapcsolási rajz
- A CAD tool segítségével különböző alakzatokat tudunk bevinni. A tervezőnek kell megadni a helyét, alakját és szintjét a különböző objektumoknak
- A layout rajzolása során a tervezőnek be kell tartani a tervezési szabályokat (design rules). Ezek biztosítják a technológia megbízhatóságát és robusztusságát
- Ha kész a layout összevetjük a kapcsolási rajzzal, ezt a *layout versus schematic* (LVS)
- Miután ezen a ponton a terv valamennyi fizikai dimenziója adott, a paraziták extraktálhatóak
 - vezető és föld közötti kapacitás
 - vezetők közötti kapacitás
 - vezetők ellenállása
 - bulk ellenállás
- A kinyert parazitákkal kiegészítve a terveket megismételjük a szimulációkat

- A fizikai tervezés egy fontos része a tokozás.
Ennek funkciója:
 - megvédeni az IC-t
 - meg táplálni az IC-t
 - hűteni az IC-t
 - biztosítani az elektromos és mechanikai kapcsolatot az IC és a külvilág között
- A tokozás lépései:



- További szempontok:
 - sebesség
 - paraziták (kapacitív és induktív)



SZÜKSÉGES ISMERETEK

Analóg IC tervezés jellemzői

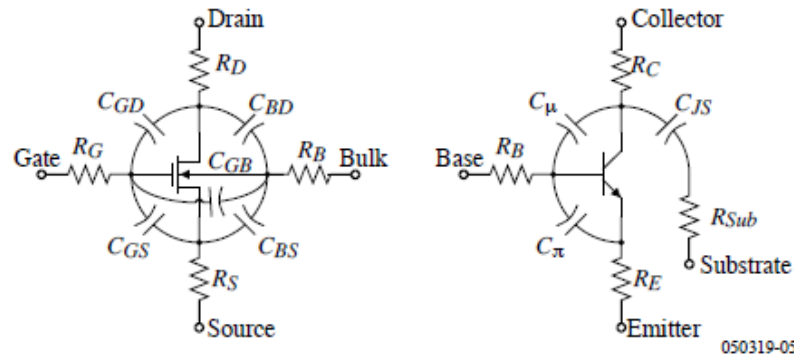
- áramköri absztrakciós szinten történik (nem félvezető fizikai egyenleteket oldunk)
- magas komplexitású
- új kihívásokkal kerülünk szembe ahogy a technológia fejlődik
- az alapelvek, koncepciók és technikák alapos ismeretét követeli meg
- a jó tervezők általában jó fizikai ismeretekkel rendelkeznek
- megfelelő egyszerűsítéseket és feltételezéseket kell tenni
- a modellezési és technológiai kérdések magas fokú megértése szükséges
- sok mindenhez kell érteni (csak analóg ritka)
- képesnek kell lennünk a hibáinkból tanulni
- a szimulációkat helyesen kell használni

Kapcsolódó ismeretek

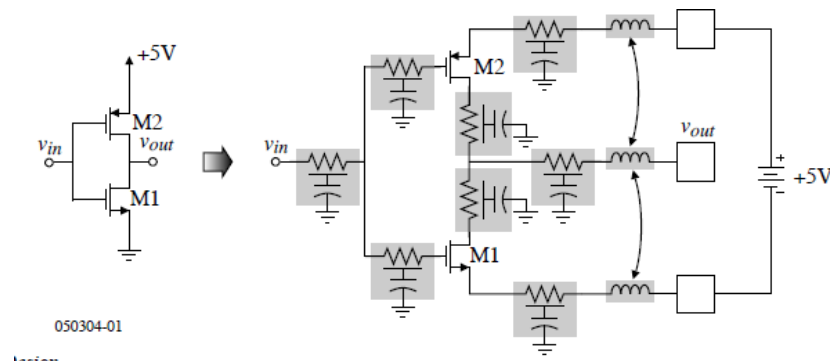
- Analóg áramkörök, kapcsolástechnika
- Áramkörszimuláció
- IC Technológia (félvezető fizika, anyagtudomány)
- Digitális áramkörök
- Jelfeldolgozás
- Szabályzástechnika
- Infokommunikáció / híradástechnika / RF tervezés
- Szoftveres ismeretek, programozás / scriptelés
- ...

A technológia megértése

- A technológiát megértve az analóg IC tervező képes megállapítani a technológia korlátait és hatását az áramkörre.
- Eszköz paraziták:



- Összeköttetés parazitái:



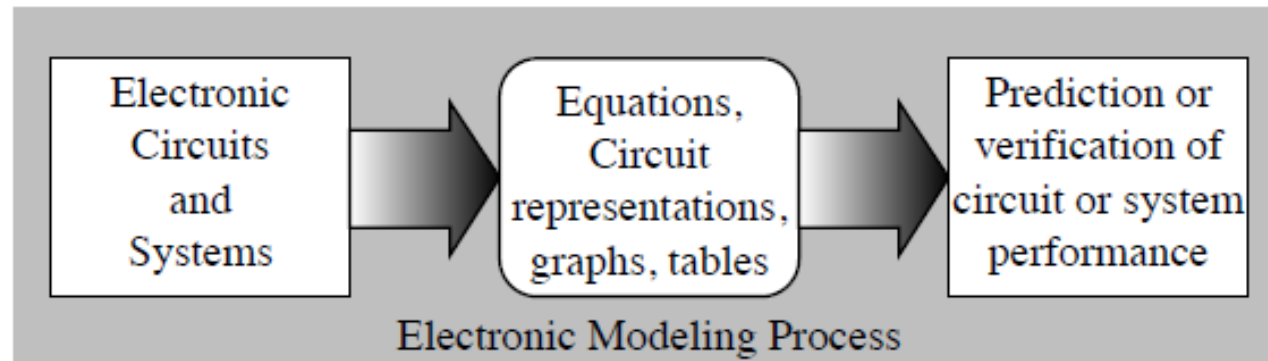
A kisebb csíkszélességű technológia hatása az IC tervezésre

- Pozitív
 - kisebb méret
 - kisebb paraziták
 - nagyobb transzkonduktancia
 - nagyobb sávszélesség
- Negatív
 - csökkenő feszültségek
 - alacsonyabb csatorna ellenállás (alacsonyabb gain)
 - több nemlinearitás
 - eltérés a négyzetes karakterisztikától
- Kihívások
 - mixed signal áramköröknél nagyobb substrate zaj
 - küszöbfeszültségek nem skálázódnak a tápfeszültséggel
 - csökken a dinamika tartomány
 - rossz matching minimum csatorna hossz esetén

Modellezés megértése

- Modellezés:

- egy villamos hálózat elektromos tulajdonságainak leképezése matematikai egyenletekre, kapcsolási rajzra, gráfokra vagy táblázatokra
- a modellek lehetővé teszik az áramkörök vagy rendszerek működési paramétereinek előrejelzését vagy verifikációját



- Példák:

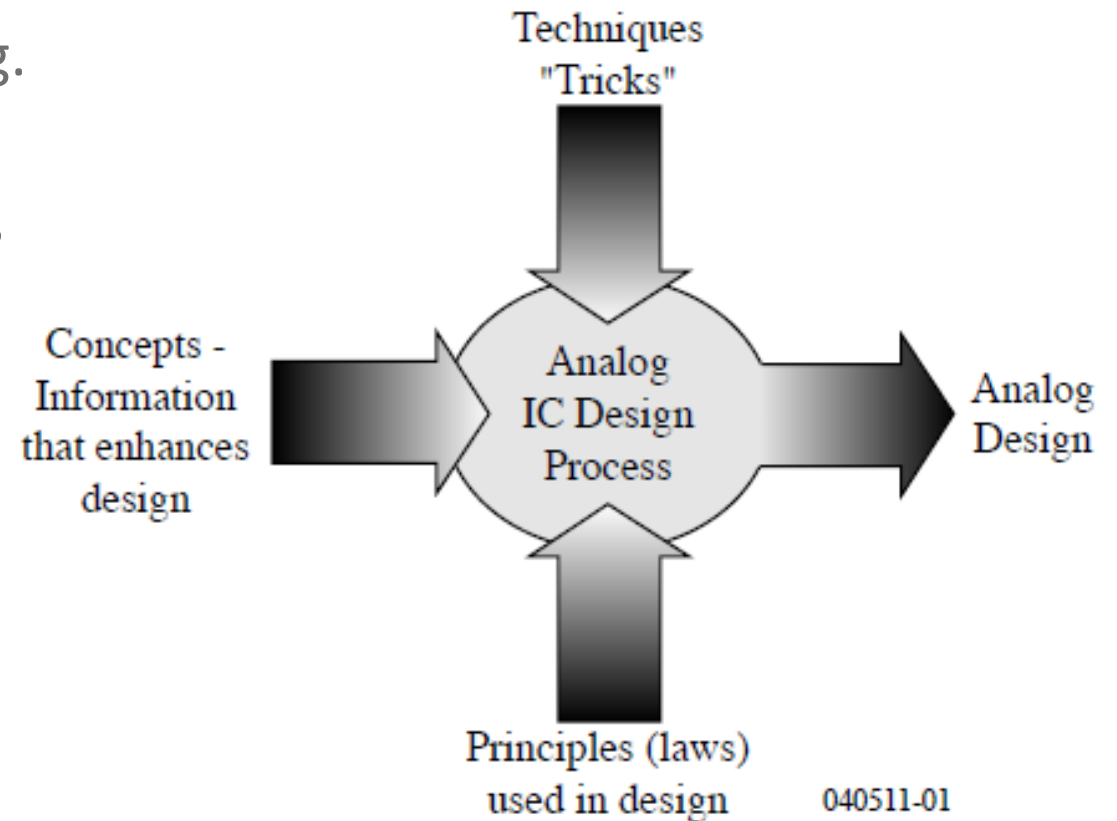
- Ohm törvény, MOSFET nagyjelű modell, dióda I-V görbéje, stb.

- Cél:

- Olyan modellek előállítása amik egyszerűek, és lehetővé teszik a tervezőnek az áramkör működési paramétereinek a megértését.

Alapelvek, koncepciók, technikák

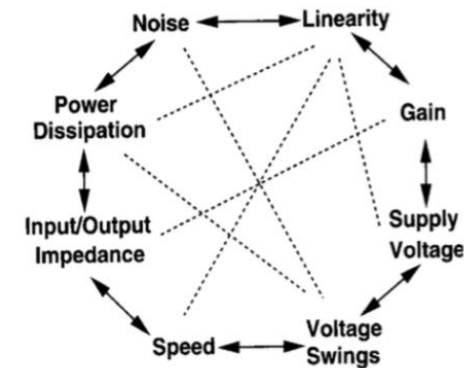
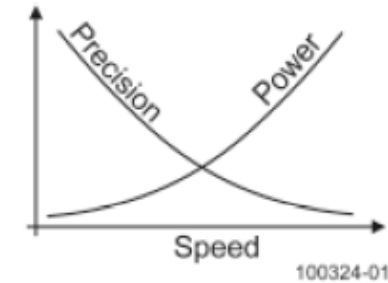
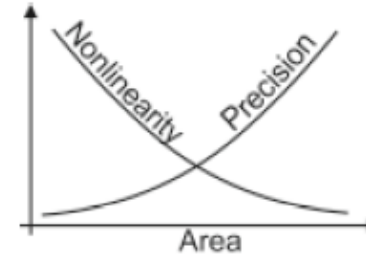
- Alapelvek alatt a fizikai törvényeket értjük amik egzaktak és soha nem változnak meg.
- Koncepciók alatt az „ököl szabályokat” (általában igazak), analitikai eszközöket és olyan dolgokat értünk amire érdemes emlékezni.
- Technikák alatt feltételezéseket, „trükköket”, eszközöket és módszereket értünk amikkel a megértéshez egyszerűsítéseket hajthatunk végre. (tudjuk miket hanyagolunk el, ezzel mi mennyire lesz igaz)



Feltevések

- Egy feltevés igaznak tekint valamit formális bizonyítás nélkül. Analóg tervezés során az analízis egyszerűsítését szolgálja. A cél a probléma létfontosságú információinak elkülönítése a nem létfontosságúaktól.
- Egy feltevés elemei:
 - meghatározni a feltevést, hogy anélkül egyszerűsítse a problémát, hogy létfontosságú információt elhanyagolnánk
 - alkalmazzuk a feltevést, hogy meghatározzuk a megoldást
 - igazoljuk, hogy a feltevés valóban jogos volt
- Példa:
 - Egy nagyértékű párhuzamos ellenállás elhanyagolása egy kisértékű mellett.
 - Miller hatás használata a domináns pólus meghatározásához
 - Másodfokú polinom gyökeinek meghatározása azzal a feltételezéssel, hogy a gyökök valósak és szétválaszthatók

- Technológia
 - Digitális áramkörök jobban skálázódnak a technológiával (scaling)
 - Analóg áramkörök nem annyira profitálnak a méretcsökkentésből
 - sebesség nő
 - erősítés csökken
 - matching csökken
 - nemlinearitás nő
 - új kihívások jelennek meg, mint gate szivárgás
- Analóg kihívások
 - Trade-off elkerülhetetlen a linearitás, sebesség, pontosság és felvett teljesítmény között.
 - Az optimumot sok paraméter között kell megkeresnünk, melyhez mély szakmai ismeretek szükségesek, nem elég a szimulátorokra támaszkodni („SPICE monkey”)

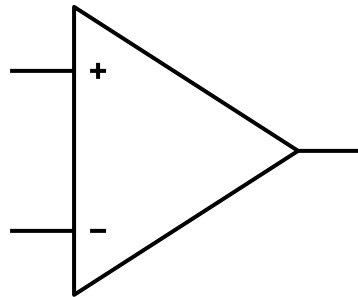


TERVEZÉS

Tervezés

Input

Specifikáció

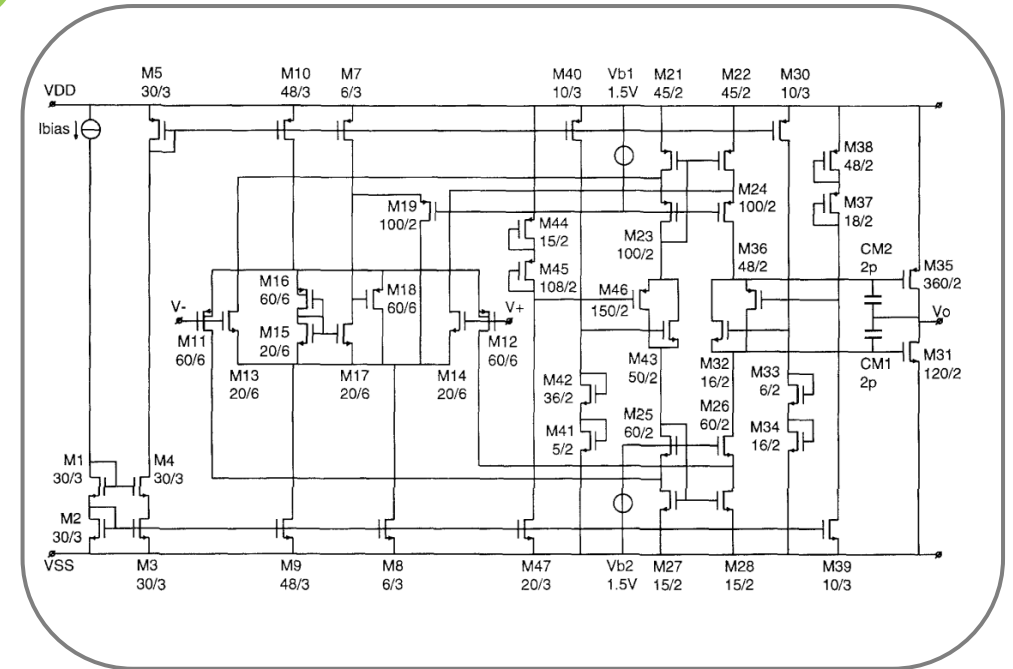


Opamp
Vdd=3 -5V
Iq=100uA
Rail-to-rail input, output
 $C_{load} = 10 \text{ pF}$
Rload = 10kOhm

Topológia választás
Implementáció
Verifikáció

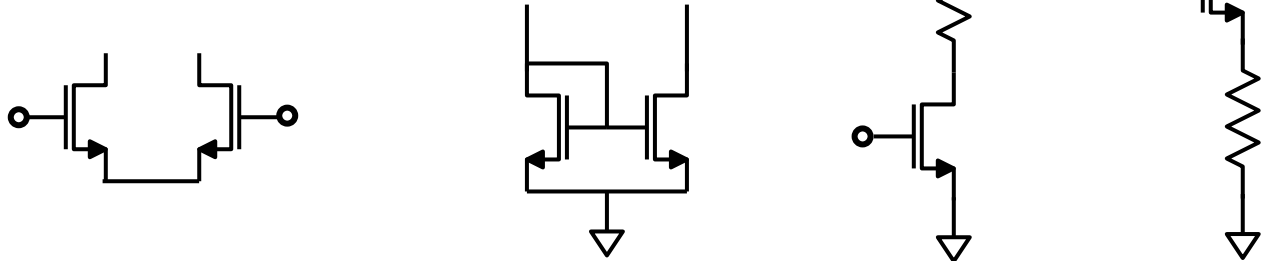
Output

Áramköri tervek



Analóg elektronikai tervezés

- Alap építőelemek:
 - Néhány áramköri elemből álló „alapkapcsolások”



- Villamosságtani alapösszefüggések (Kirchhoff, Ohm...)

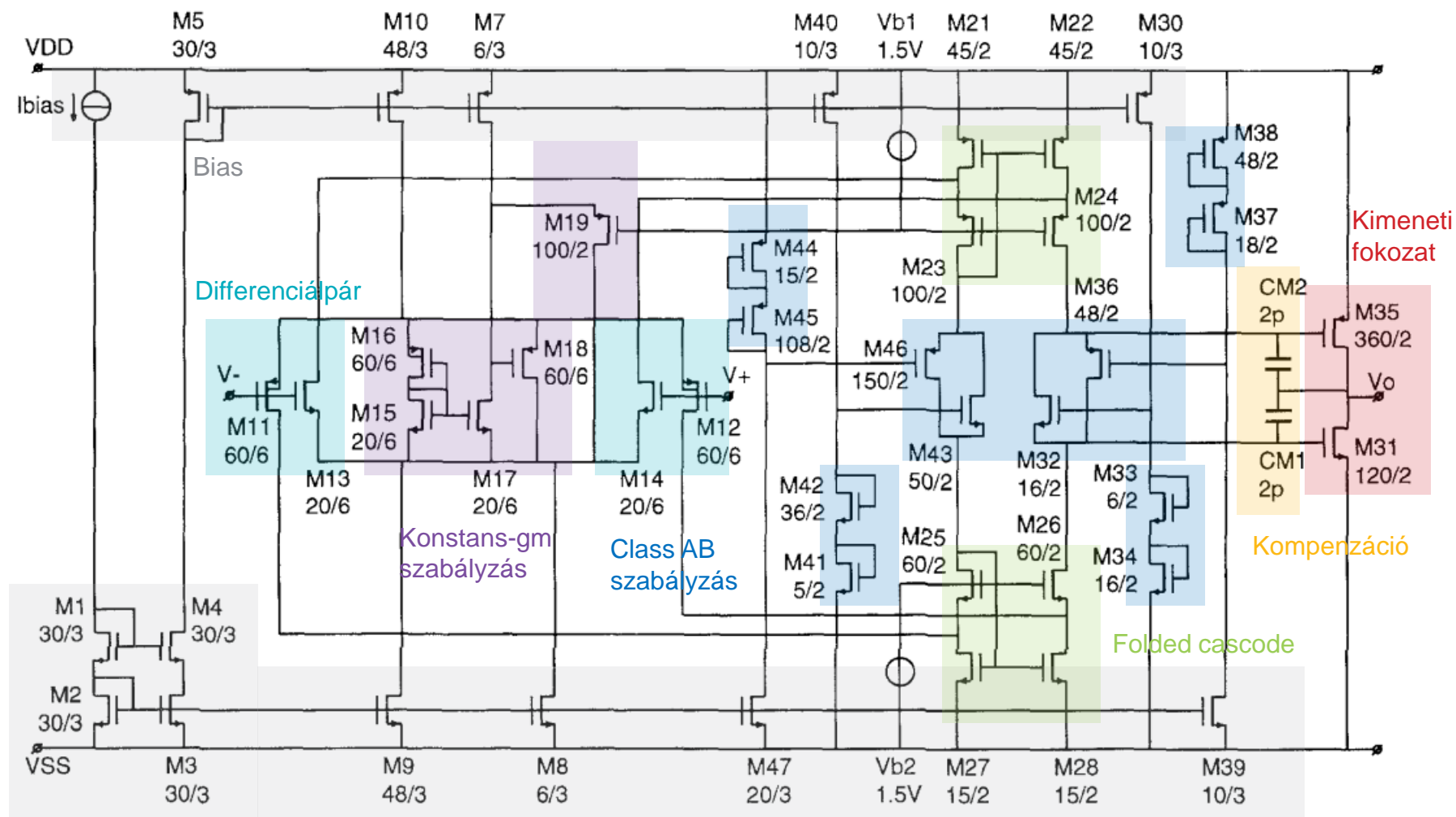
$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad \sum_{i=1}^j V_i = 0$$

- Eszközmodellek

$$Z_C = \frac{1}{sC}$$

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_F}{kT}} - 1 \right)$$

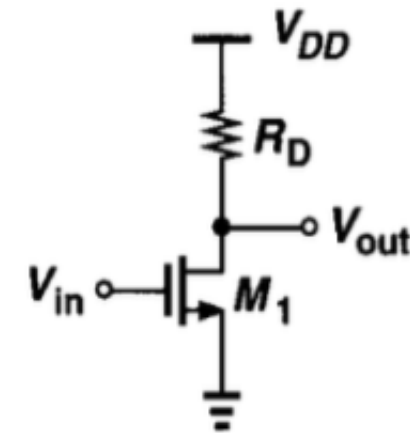
$$I_D = \frac{\mu C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2$$



Chip vs diszkrét analóg tervezés

- Abszolút pontosság nagyon alacsony
 - ellenállás $\pm 20\%$
 - kapacitás $\pm 20\%$
 - küszöbfeszültség $\pm 200mV$
 - $C_{ox} \sim t_{ox}$, oxid vastagság tech szórása
 - $L_{eff} = L - 2L_D$, oldal irányú diffúzió tech szórása
- Relatív pontosság rendkívül magas
 - nem tudjuk pontosan mekkora, de egy szeleten két névlegesen azonos értékű elem „garantáltan” egyforma
 - a relatív pontosság a vizsgált eszközök távolságával fordítottan arányos

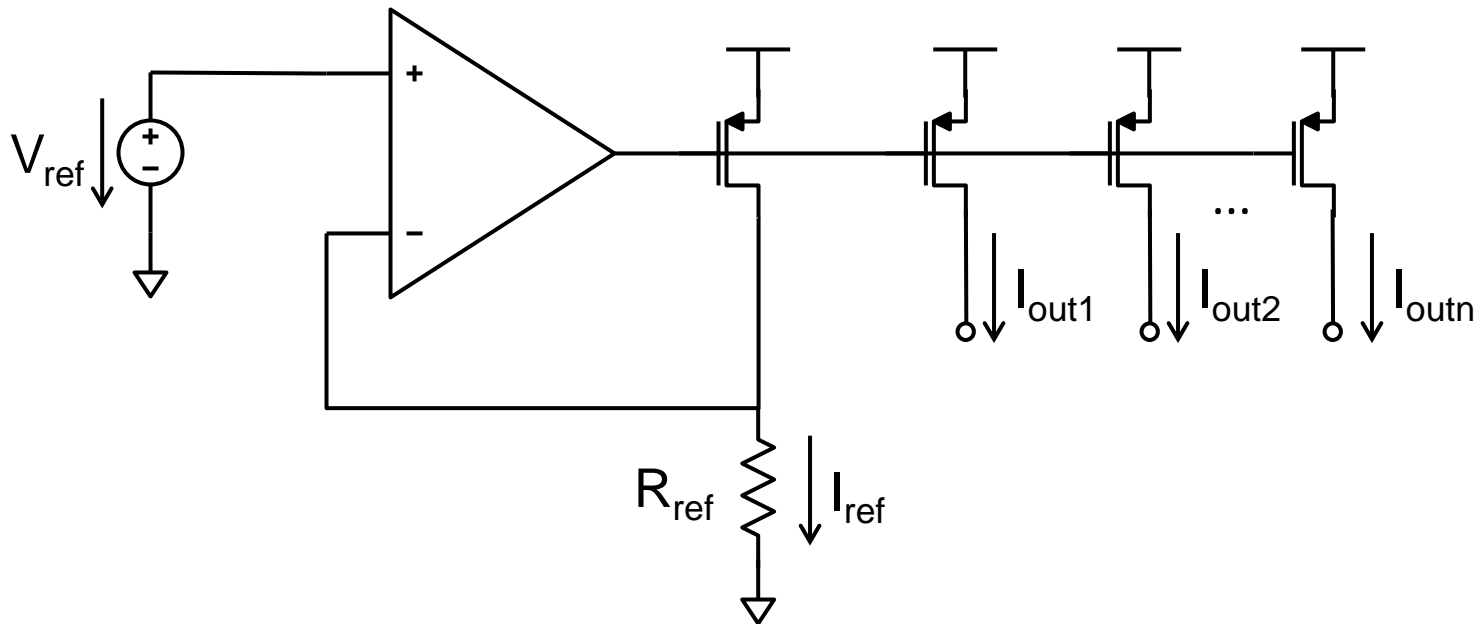
$$I_D = \frac{\mu C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2$$



Látszólag soha nem fogunk abszolút pontosságú áramköröket tervezni.

V2I áramkör

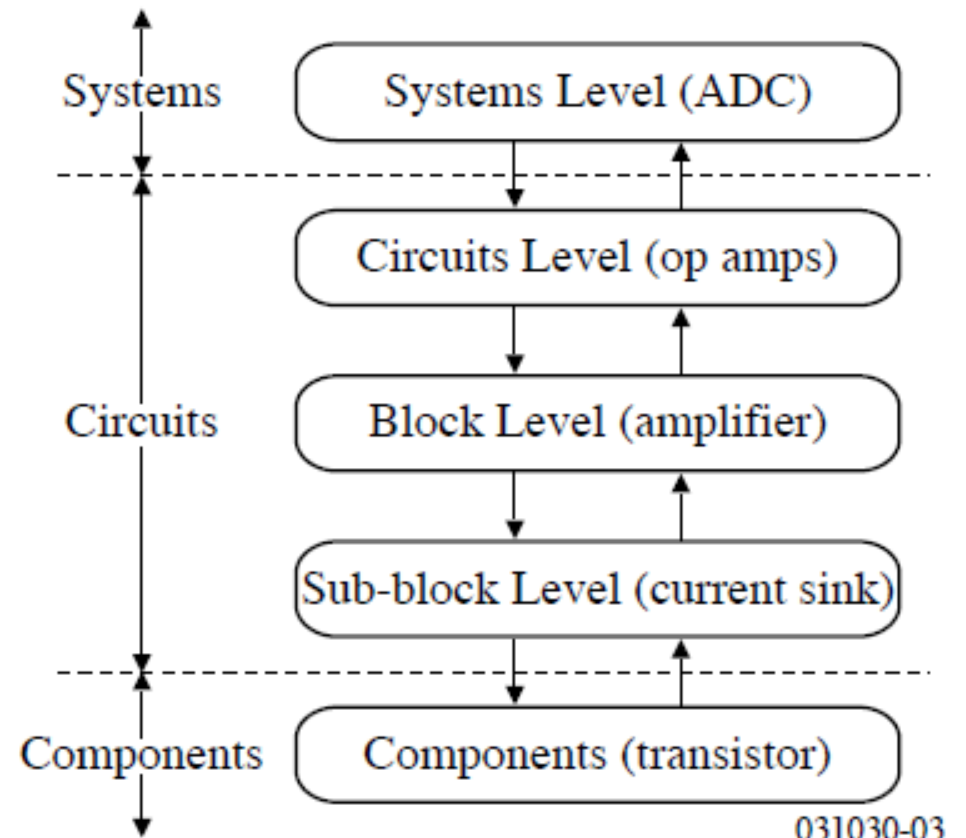
- Klasszikus feladat:
 - Rendelkezésre áll az IC-n egy pontos referencia feszültség
 - Szükség van egy referencia áramra, melyet a fenti feszültségből generálunk
 - A referencia áramból tetszőleges számú replikát generálhatunk
 - Áramot kisebb zajjal terhelten juttathatunk el a chip különböző részeibe, ahol akár a referenciafeszültség visszaállítható



$$I_{out;i} = I_{ref} = \frac{V_{ref}}{R_{ref}}$$

Komplexitás az analóg tervezésben

- Az analóg tervezés normál esetben nem hierarchikusan történik és ritkán kerül egy blokk többször felhasználásra. Ennek hatására egy analóg tervezés meglehetősen bonyolulttá tud válni.
- Hogy kezeljük ezt a komplexitást?
 - próbáljunk hierarchizálni amennyire lehet
 - használjunk megfelelő rendszerezési technikákat (ne random szórjuk le az alkatrészeket)
 - hatékony módon dokumentáljuk a tervezést
 - éljünk ahol lehet életszerű feltételezésekkel és egyszerűsítésekkel
 - használjuk a szimulátort megfelelően



ANALÓG ÁRAMKÖR SZIMULÁCIÓ

Szimuláció lépései

1. Hierarchikus sematikus kapcsolásból (akár az egész csipp!) netlista készül
2. Az eszközök modeljeit a szimulátor ismeri, a modell paramétereit a gyár adja
Pl. MOS tranzisztor modell paramétereit és model egyenleteit (elrettentésnek):

```
model an150 bsim3v3 {
  1: type=n
+ version=3.2      binunit=2      mobmod=1
+ capmod=3         ngsmode=0      lmin=0
+ lmax=1           wmin=0         wmax=1
+ tox=1.15e-8 + dtox_150vn      xj=3e-6
+ nch=1.7e17      wint=-4.8e-7   wl=0
+ wln=1           ww=0           wwn=1
+ wwl=0           lint=0          ll=0
+ lln=1           lw=0           lwn=1
+ lwl=0           dwg=0          dwb=0
+ xl=0 + dxl_150vn  xw=0 + dxw_150vn  vth0=0.983 + dvth0_150vn
+ k1=-0.53         k2=0.883164     k3=439.889805
+ k3b=0            w0=5.47925e-5   nlx=1.74e-7
+ dvt0=2.2         dvt1=0.53      dvt2=-0.032
+ dvt0w=0          dvt1w=5.3e6     dvt2w=-0.032
+ ngate=1e20       u0=1.10372e-2 * du0_150vn
+ ua=-1.568e-10    ub=-1.181724e-18  uc=1.6926e-10
+ vsat=7.357779e4 * dvsat_150vn
+ wvsat=-0.061867 * dvsat_150vn      a0=3.56531
+ ags=2.20754      wags=7.058756e-7   b0=0
+ b1=0             keta=-0.047         a1=0
+ a2=-0.203609     rdsw=5.8725e3 * drdsw_150vn
+ prvb=0           prwg=0.09          wr=1
+ voff=-2.14032e-2 nfactor=1.3        eta0=0
+ etab=0           dsub=0.56          cit=2.19e-4
+ cds=2.4e-4       cdsb=0             cdsd=0
+ pclm=-2.25559    pdiblc1=3.254007e-3 pdiblc2=1e-5
+ pdiblc=0         drout=0.56         pscbe1=8e8
+ pscbe2=1e-8      pvag=0.119638      delta=0.01
+ alpha0=0         alpha1=0          beta0=266.726
+ elm=0            xpart=1
+ cgso=-2.8e-10 * dcgso_150vn
+ cgdo=1.25e-10 * dcgdo_150vn          cgbo=1e-13
+ ckappa=0.28      cf=0              clc=1e-7
+ cle=0.6          dlc=-6.68e-7       dwc=0
+ vfbcv=1          cgsl=0 * dcgsl_150vn
+ cgdl=2.78e-9 * dcgdl_150vn          acm=12
+ ldif=0           hdif=0            rsh=0
+ rd=0             rs=0              rsc=0
+ rdc=0            cj=1e-5 * dcj_150vn  mj=0.48
+ mjsw=0.48        cjsw=3.5e-10 * dcjsw_150vn
+ dcjsw=3.5e-10 * dcjsw_150vn          mjswg=0.48
+ js=1e-7 * djs_150vn  jsd=2.488244e-11 * djsd_150vn
+ n=1.1            pbsw=0.8          pb=0.8
+ pbswg=0.8        tnrm=25           ute=-0.375683
+ wute=-6.566449e-6 kt1=-0.601131    kt1l=0
+ kt2=0.022        ua1=7.918024e-9    wua1=-2.991863e-14
+ ub1=-1.011534e-17 wub1=2.764046e-23 uc1=-5.51587e-10
+ at=6.963334e4    wat=-4.17723e-2    prt=0
+ xti=3            tpb=1e-3          tpsw=1e-3
+ tpswg=1e-3       tcj=5e-4          tcjsw=5e-4
+ tcjsw=5e-4
+ jth=1e20         vbox=1e10
}
```

~140 model paraméter
(gyárból)

~200 model egyenlet 25 ilyen
oldalon keresztül:
(szimulátor)

BSIM3v3 Level-11 Model (bsim3v3)

$$n = 1 + N_{factor} \frac{C_d}{C_{ox}} + \frac{(C_{dsc} + C_{dscd} V_{ds} + C_{dsob} V_{bseff}) \left(\exp\left(-D_{vt1} \frac{L_{eff}}{2l_t}\right) + 2 \exp\left(-D_{vt1} \frac{L_{eff}}{l_t}\right) \right)}{C_{ox}} + \frac{C_{it}}{C_{ox}}$$
$$C_d = \frac{e_{si}}{X_{dep}}$$

Mobility

For Mobmod=1,

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + (U_a + U_c V_{bseff}) \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{T_{ox}} \right) + U_b \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{T_{ox}} \right)^2}$$

For Mobmod=2,

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + (U_a + U_c V_{bseff}) \left(\frac{V_{gsteff}}{T_{ox}} \right) + U_b \left(\frac{V_{gsteff}}{T_{ox}} \right)^2}$$

For Mobmod=3,

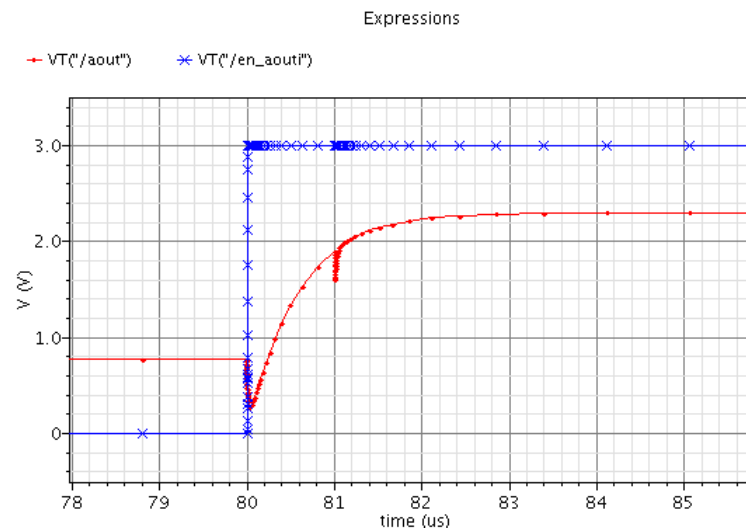
$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + \left[U_a \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{T_{ox}} \right) + U_b \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{T_{ox}} \right)^2 \right] (1 + U_c V_{bseff})}$$

Drain Saturation Voltage

For $R_{ds} > 0$ or $\lambda \neq 1$,

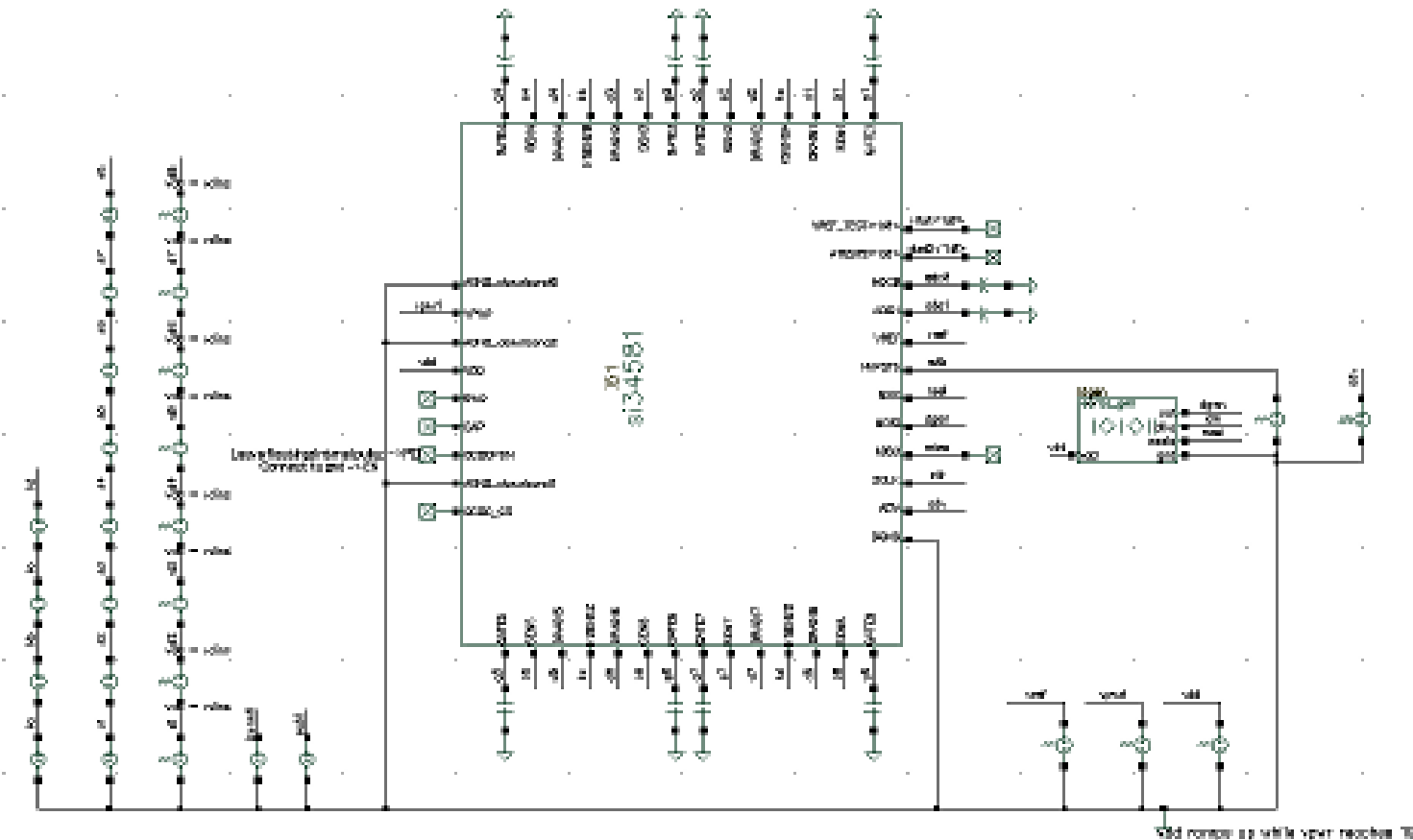
Szimuláció lépései

3. Nagy áramköröknél leginkább tranziens szimuláció (jelek az idő függvényében) jönnek szóba.
4. A szimulátor minden időpontra megoldja az eszközök modell egyenleteit az áramkör csomóponti egyenleteivel együtt!
5. Az idő lépésközt dinamikusán változtatja, ha nincs jel változás nyújtja, ha meredek változás van egyre sűríti:



Analóg szimuláció tranzisztor szinten

- Mekkora áramkörök szimulálhatók? – PoE HV csipp



Circuit inventory:

nodes 10200

assert 45

bjt 188

bsim3v3 20232

capacitor 3470

diode 480

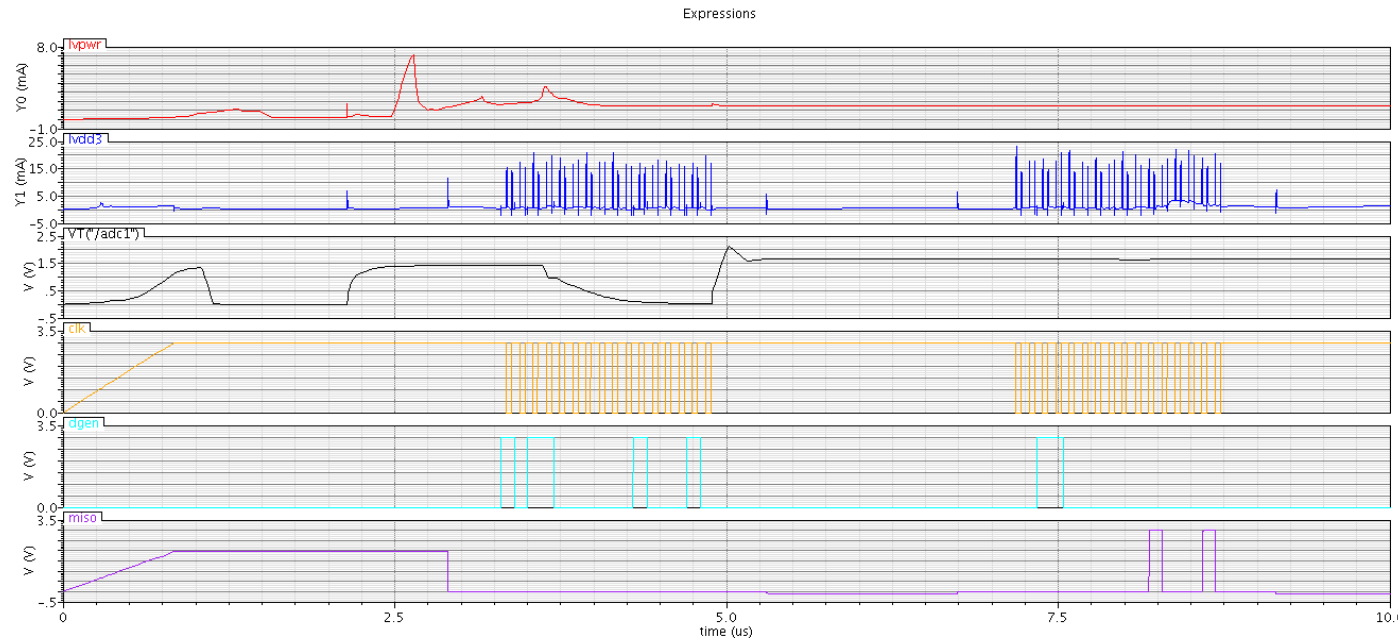
resistor 301

Ha csak a tranzisztorokat vesszük:

- 20000 MOS tranzisztor 200 modell egyenlete
- 10000 csomóponti egyenlettel
- Minden lépésben

Analóg szimuláció tranzisztor szinten

- Tranziens szimuláció: csipp start + 2x16 bit SPI parancs.



Memory available: 1.3591 GB physical:
33.6160 GB
CPU Type: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-
2695 v2 @ 2.40GHz

*****Transient
Analysis time = (0 s -> 10 us)
Ami fontosabb: 64 clk él.

Number of tran steps = 13809

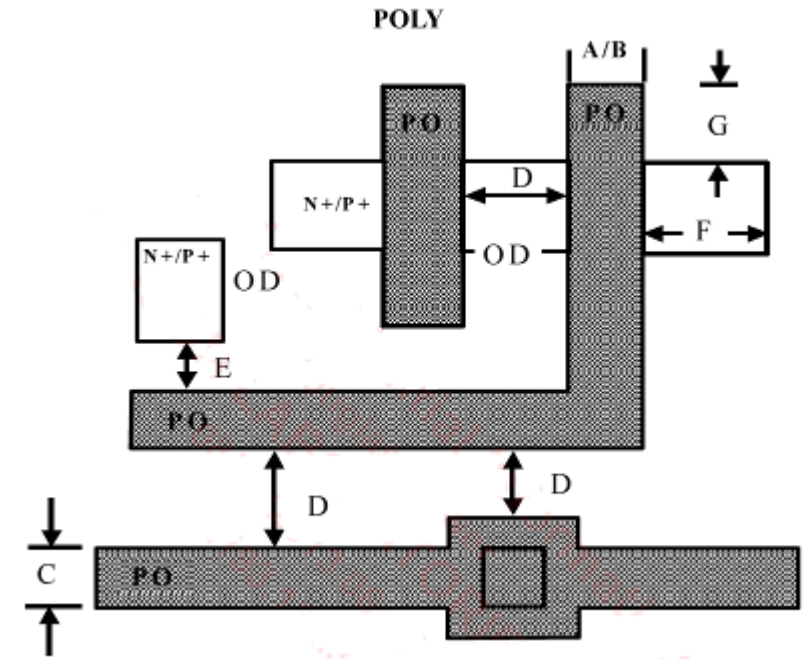
Total time required for tran analysis `tran`:
CPU = 4.91459 ks (1h 21m 55s), elapsed
= 4.96749 ks (1h 22m 47s). Peak resident
memory used = 353 Mbytes.

- Szimulátorok között nagy különbségek vannak, némelyik olykor x10 gyorsabb (akár ennél is).

Ellenőrzések: DRC, LVS

DRC: Design Rule Check.

- kb. 30 rajzolósi réteg (layers),
- technológiától függően akár > 1000 szabály ellenőrzése



LVS: Layout Versus Schematic

- A layout gyártási fájlból visszafejti az áramkört (szabályokat a gyár adja) és netlistát készít
- Összehasonlítja a sematikus terv netlistájával

Út az analóg tervezéshez

- Analóg tervezés önlab, szakdolgozat, diploma témák (BME-EET)
- Gyakornoki program (indie Semiconductor)
 - Jelentkezni:
 - tamas.marozsak@indiesemi.com
 - Angol CV

Köszönöm a figyelmet!