



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Szente-Varga Domonkos

Áramkör szimulációs laboratórium

Segédlet a Mikroelektronika laboratórium 2. méréséhez

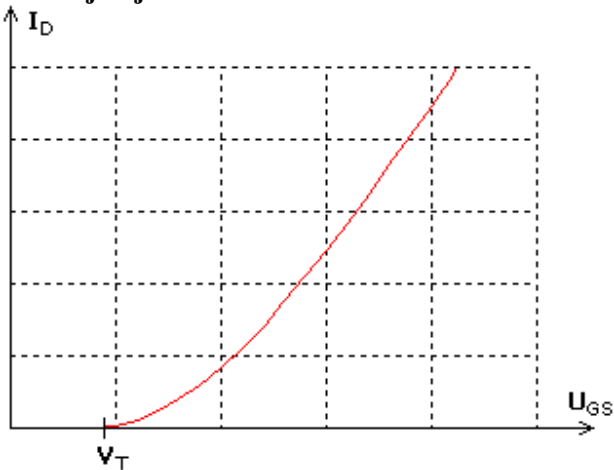
Budapest, 2009. szeptember

Beugró kérdések

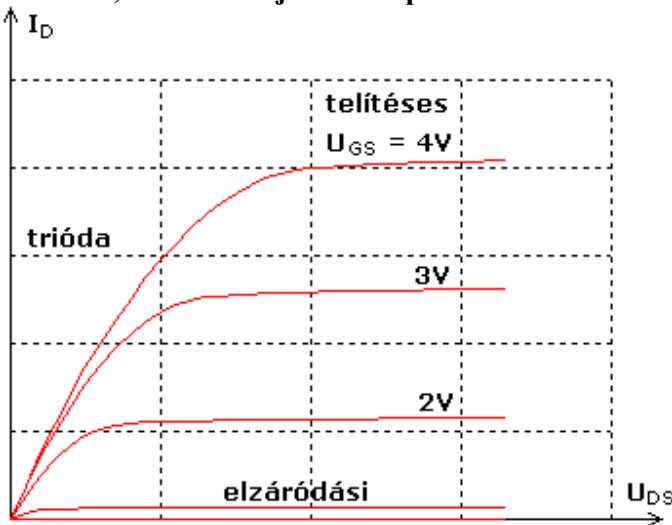
A labor beugróval kezdődik. A beugrón három kérdést teszünk fel az alábbiakból. A kidolgozásuk előre kiosztott lapon történik.

Tranzistoros kérdések

1. Rajzolja fel a MOS tranzisztor transzfer karakterisztikáját!



2. Rajzolja fel a MOS tranzisztor kimeneti karakterisztikáját a működési tartományok bejelölésével, valamint írja fel a képleteket!



Telítéses tartományban:

$$I_D = \frac{\mu \cdot C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L} (U_{GS} - V_T)^2$$

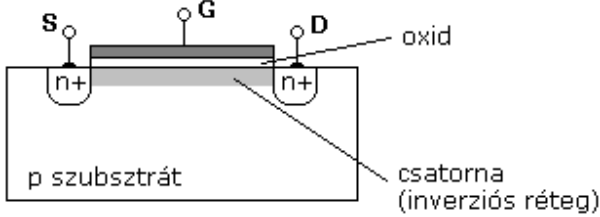
μ : mozgékonyosság
 C_{ox} : oxid kapacitás
 W : csatornaszélesség
 L : csatorna hosszúság
 V_T : nyitófeszültség

$$U_{DS} \geq (U_{GS} - V_T)$$

Trióda tartományban:

$$I_D = \frac{\mu \cdot C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L} \left[(U_{GS} - V_T) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]$$

3. Rajzolja le az nMOS tranzisztor keresztmetszeti képét!



4. Mi okozza telítési tartományban a kimeneti karakterisztika ellaposodását?

Amíg a drain-source feszültség elhanyagolható, addig a csatorna potenciálja végig a source elektródával egyező, ami állandó inverziós töltéssűrűséget indukál a csatorna mentén. Ha a drain feszültsége nagyobb, akkor a csatorna mentén feszültségesés áll elő, és a drain felőli oldalon a gate és csatorna közötti feszültség különbség kisebb lesz, ami az inverziós töltésmennyiség csökkenését okozza, gyakorlatilag elvékonyodik a csatorna, ami az ellenállását növeli. Emiatt a drain áram a lineárisnál gyengébben nő U_{DS} növelésével, és a karakterisztika kissé lefelé görbül. A feszültséget tovább növelve a hatás fokozódik, és előfordulhat az is, hogy a drain oldalon megszűnik az inverzió, és a csatorna elzáródik. Itt a karakterisztika vízszintesbe fordul, a drain feszültség további növelése mellett is állandó marad. Ez a telítési tartomány.

5. Mi a csatornarövidülés jelensége?

Az ideális MOS tranzisztor karakterisztikái a telítési tartományban vízszintesek, a kimeneti ellenállás végtelen (lásd a kimeneti karakterisztikán). A valóságban azonban a karakterisztikák mindig mutatnak kisebb-nagyobb dőlést, ennek oka a csatornarövidülés. Telítési tartományban, ha az elzáródást követően tovább növeljük a drain-source feszültséget, növekszik a drain oldali, elzáródott szakasz hossza. Emiatt csökken a csatorna geometriai hossza (effektív hosszúság), ami az I_D kifejezésben L néven a nevezőben szerepel, emiatt az áram növekvő drain feszültségnél nő, a karakterisztikák nem vízszintesek, hanem dőlést mutatnak.

6. Mit jelent a küszöb alatti áram?

Ideális esetben úgy számolunk, hogy a küszöbfeszültség alatt az áram zérus, mert az inverziós töltés teljesen eltűnik. A valóságban ez nincsen pontosan így. Az inverzió határának azt tekintettük, amikor a felületi potenciál a $2\Phi_F$ értéket vett fel, azonban inverzió egészen a Φ_F határig jelen van. A felületi betöltöttség exponenciálisan csökken U_F csökkenésével, ezért a küszöbfeszültség alatt véges, de U_{GS} -sel igen meredeken csökkenő áramot tapasztalhatunk, ez a küszöb alatti áram.

7. Foglalja össze táblázatosan a tranzisztor működési tartományait (üzemmódjait), V_{GS} , V_{DS} értékeivel, és hogy van-e csatorna?

| tartomány | V_{GS} | V_{DS} | csatorna |
|------------|------------|-------------------------|----------------------|
| elzáródási | $< V_{th}$ | nem számít | nincs |
| trióda | $> V_{th}$ | $0 < V_{DS} < V_{Dsub}$ | van |
| telítési | $> V_{th}$ | \geq | van, csat. rövidülés |

Spice kérdések

1. Soroljon fel három áramkörszimulációs programot!

SPECTRE, TRANS-TRAN, PSPICE, ELDO, Aplac, TINA, EWB, ANDI
(Orcad, Verilog nem!)

2. Milyen módszert használ a szimulátor a hálózati egyenletek előállítására?

A csomóponti potenciálok módszerét.

3. Mire szolgál a netlist?

A netlist tartalmazza a szimulálandó áramkör alkatrészmodell hivatkozásait és az összeköttetéseket, valamint a szimuláció vezérlő utasításait, ebből állítja össze a szimulátor a hálózati egyenleteket és a megoldást.

4. Mi a DC analízis?

Egyenáramú munkaponti analízis. Segítségével csomóponti feszültségek és transzfer karakterisztika számítható.

5. Mi az AC analízis?

Kisjelű analízis a frekvencia függvényében. Az áramkör frekvencia átvitelét és Bode-diagramját kapjuk meg segítségével.

6. Mi a tranziens analízis?

Az áramkör gerjesztésre adott időtartománybeli válaszát határozza meg. Kiszámítja és időtartományban ábrázolja az egyes csomópontok potenciálját egy meghatározott időintervallumra.

A gyakorlat célja

A mérés célja, hogy megmutassa azokat a módszereket, amelyekkel a digitális áramkörök DC, transzfer és tranzienis viselkedésének szimulációja végezhető. A számítógépes modellezést és szimulációt az iparban legelterjedtebb *Mentor Graphics Design Architect* és *Eldo* szimulációs rendszeren mutatjuk be.

A mérésen a *Mentor Graphics* alkalmazásával egy projectet hozunk létre. Ez a project tartalmazza a tervezett áramkörünkhöz tartozó összes információt; a kapcsolási rajzot, az abból generált netlistát és a szimulációs eredményeket is.

A gyakorlaton elvégzendő feladat három fő részre osztható.

- Elsőként az elképzelt kapcsolást megrajzoljuk a számítógépen is, ez az ún. schematic capture. Itt visszük be a programba a vizsgált áramkör alkatrészeinek paramétereit, a közöttük lévő összeköttetéseket és a gerjesztéseket is.
- A második lépés az így bevitt áramkör szimulációja. A szimuláció előtt állítható be a szimuláció típusa (DC, AC, tranzienis) és annak paramétereit (pl. időintervallum).
- A harmadik, utolsó lépés pedig a szimuláció eredményeinek megjelenítése és elemzése. Itt van lehetőség az eredmények kvalitatív és kvantitatív vizsgálatára: tényleg azt csinálja-e a kapcsolás, amit várunk tőle; megfelelően gyorsak a felfutási és lefutási idők stb.

A fenti három összetett, de jól elkülöníthető feladatot tulajdonképpen három különálló program végzi el, amelyeket az *IC Studio* nevű keretrendszer fog össze. A kapcsolási rajz bevitelére a *Design Alchemist*, a szimuláció az *Eldo*, az eredmények vizsgálata pedig az *EZWave* nevű programmal végezhető el. A szimulátorban a bevitt áramkörön módosítani nem tudunk, csak a szimuláció paraméterein: ha valamelyik tranzisztort rosszul huzaloztuk be, akkor a tervező programba kell visszamennünk és ott kijavítanunk a kapcsolást.

A három program közötti kommunikáció a projectben tárolt fájlokon keresztül történik – ez egyébként automatikus. Ilyen fájl a netlist, amelyet a tervező program generál a szimulátor számára. Ilyen adat a szimuláció eredménye is; az egyes egymás utáni szimulációk kimeneti adatai egy adatbázisba kerülnek, amelyeket a hullámforma megjelenítő program tud kirajzolni.

Tervezőprogram indítása

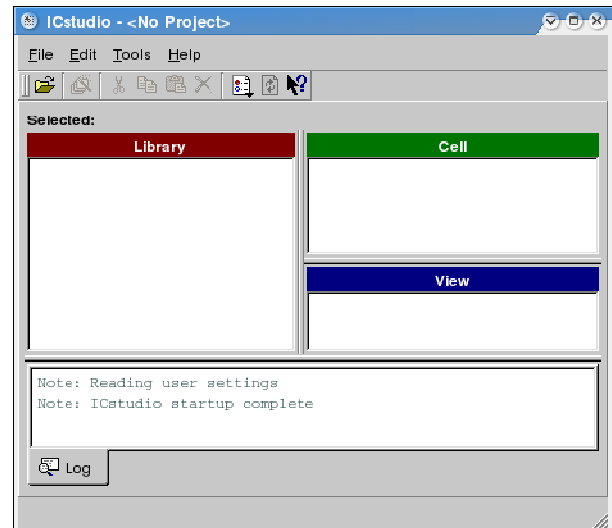


A számítógéphez történő belépés után az asztalon található ikonok közül a **IC Studio UMC 180...** parancsikont kell elindítani. Ha a belépéssel gondja támad, forduljon a laborvezetőhöz segítségért.

A program indítását követően megjelenhet egy üdvözlő ablak,

Welcome to ICStudio version v2006.2_3.1

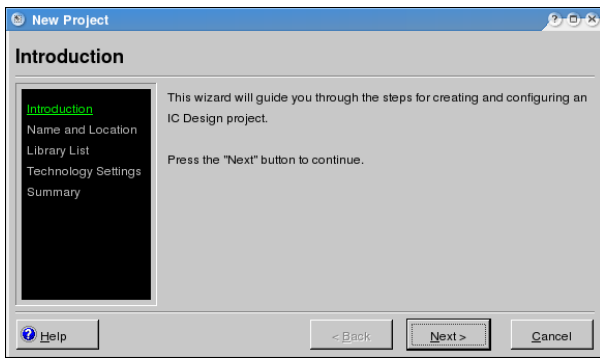
Ezt a **Close** gombbal zárjuk be. Ezt követően a következő kép kell, hogy fogadjon minket.



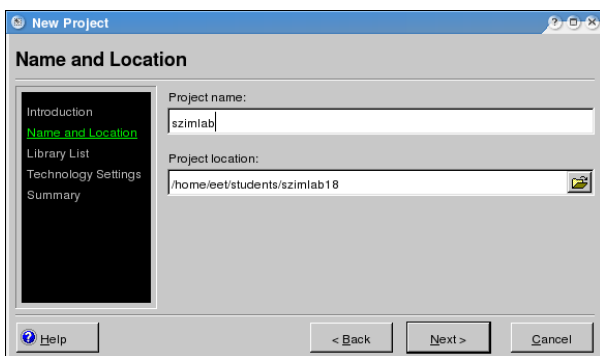
A képen három külön mező, bal oldalt a bordó fejlécű *Library*, jobb oldalt felül a zöld *Cell*, alul a kék színű *View* látható. A képernyő alján látunk még egy széles *Log* mezőt.

Új project létrehozása

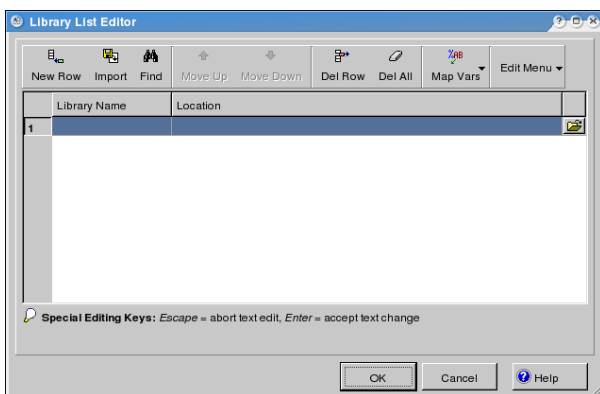
Válasszuk ezen a képernyőn a menüből a **File/New/Project...** pontot. Ekkor megjelenik egy *New Project* nevű ablak.



Az Introduction részt a **Next** gombbal lépjük át, ekkor a Name and Location részben a **Project Name** mezőbe írjuk be a projectünk nevét, például szimlab.



Ezután a Next gombbal menjünk tovább. A Library List pont alatt nyomjunk rá az **Open Library List Editor** gombra.

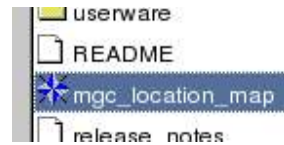


A megjelenő ablakban a jobb felső sarokban lévő **Edit Menu** gombot nyomjuk meg, a megjelenő me-

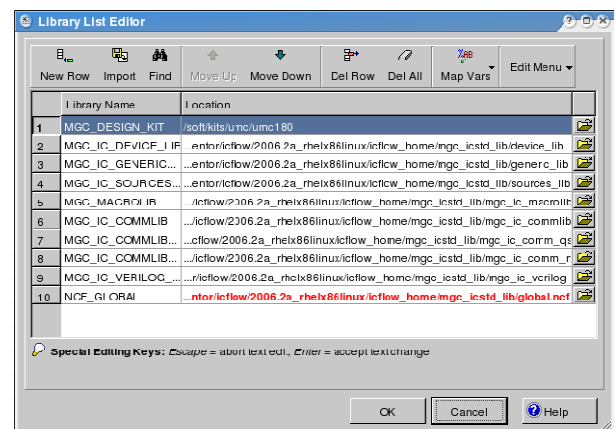
nüből először az **Import from Existing Library List** pontot válasszuk.

A megjelenő Select a Library List nevű ablakban navigáljunk a /soft/kits/umc/umc180 könyvtárba, ehhez először vissza kell lépkednünk egészen a gyökér könyvtárba.

Egy könyvtárral való feljebb lépéshez a Windows-hoz hasonlóan használhatjuk az egy könyvtárat feljebb léptető gombot. A /soft/kits/umc/umc180 könyvtárba eljutva válasszuk ki a **mgc_location_map** file-t (kis kék ikonnal),

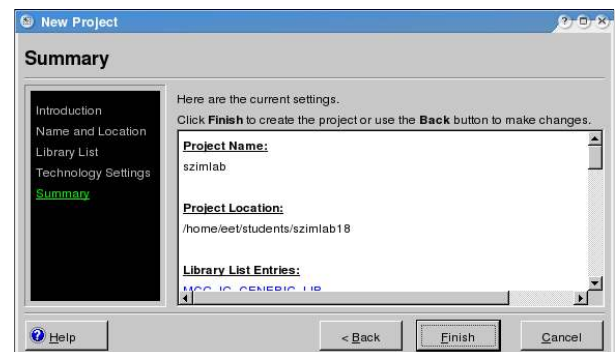


majd dupla kattintással vagy **Open** gombbal zárjuk be az ablakot. Ekkor a Library List Editor ablakban tíz elemmel töltődik fel a lista. Ezzel a projectünkhöz hozzáadtuk azokat a könyvtárakat, amelyek a majd használt tranzisztorokat és forrásokat tartalmazzák.

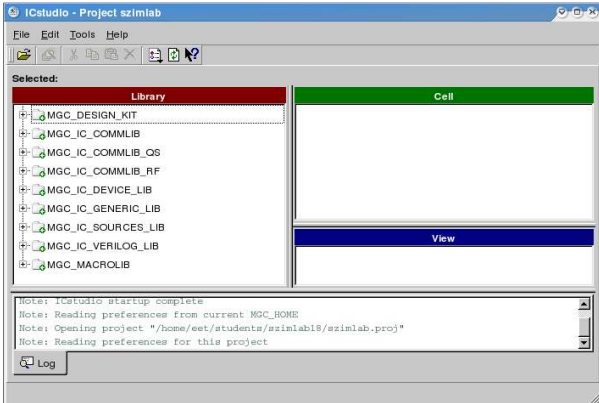


Az ablakot az **OK** gombbal zárjuk be.

Visszatérve a New Project ablakba a Library List pontról a **Next** gombbal lépünk tovább, a Technology Settings-re szintén **Next**, a Summary-ra pedig **Finish**.



A fenti lépésekkel létrehoztuk a projektünket, ami-
ben a labor során dolgozni fogunk. A képernyők
ekkor így kell, hogy kinézzen:

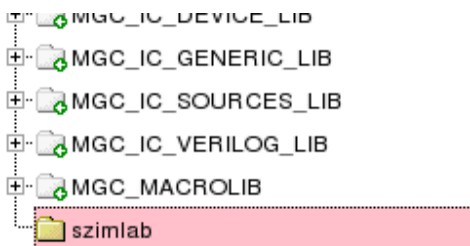


Ezután létre kell hoznunk egy saját könyvtárat. Vá-
lasszuk a fenti menüből a **File/New/Library...** pontot.

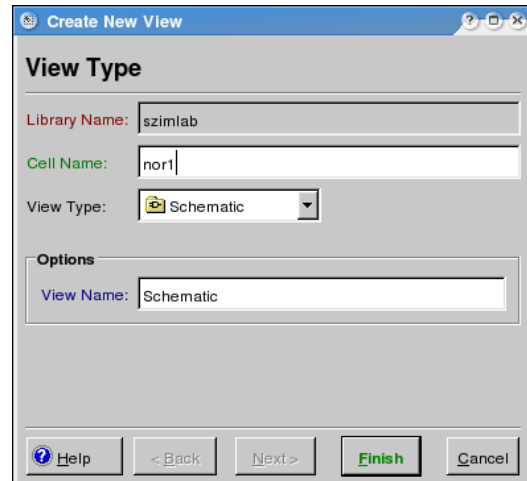
Ekkor megjelenik egy ablak, amelyben a létreho-
zandó új library (könyvtár) nevét adhatjuk meg,
például szimlab.



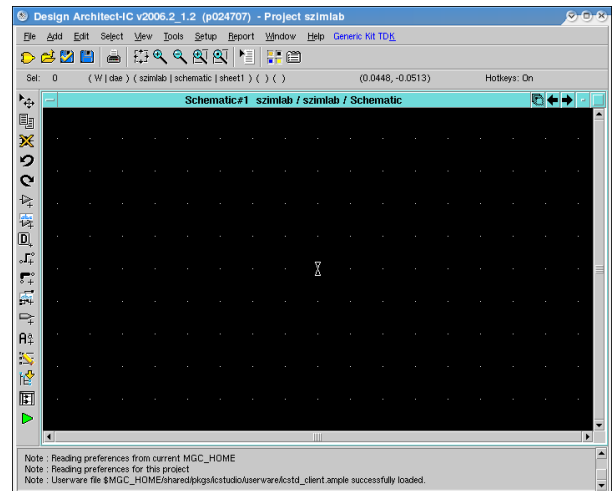
A név megadása után az OK-ra kattintva a könyvtár
létrejön, melyet a *Library* mező legalján láthatunk is.
Az újonnan létrehozott könyvtárunk rózsaszínnel
automatikusan kijelölődik, ha ez nem történne meg,
egyszeri rákattintással jelöljük ki azt.



Ezután válasszuk a menüből a **File/New/View...**
pontot. A megjelenő ablakban töltsük ki a létreho-
zandó kapcsolási rajzunk nevét (Cell name), például
nor1. A View Type alatt válasszuk **Schematic**-ot,
mert kapcsolási rajzot szeretnénk létrehozni.

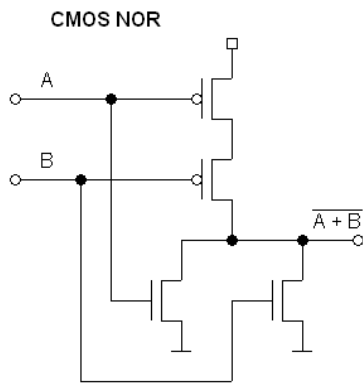


Ezután kattintsunk a **Finish** gombra, ekkor a prog-
ram egy új tervező felületet nyit, ennek jeleként egy
nagy fekete képernyő jelenik meg. Ezt a tervezőfe-
lületet fogjuk a továbbiak során használni.



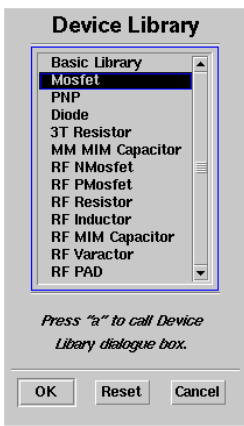
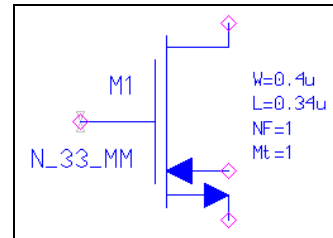
Kapcsolási rajz bevitelle

A mintafeladatban egy CMOS NOR kapu kapcsolá-
sát fogjuk elvégezni. A kapcsolást a következő áb-
ra szemlélteti:



elhelyeztük, ismét megnyílik ugyanez az ablak, amivel újabb tranzisztorokat tudunk elhelyezni, ezt most zárjuk be a **Cancel** gombbal.

Az új tranzisztor fehér színnel követi az egér mozgását, arra várva, hogy a megfelelő helyre pozícionáljuk azt és ott egy kattintással letegyük azt.



A kapcsolatban először a tranzisztorokat vesszük fel. A tervező felület fekete ablakában nyomjuk le a billentyűzet **A** (mint Add device) gombját.

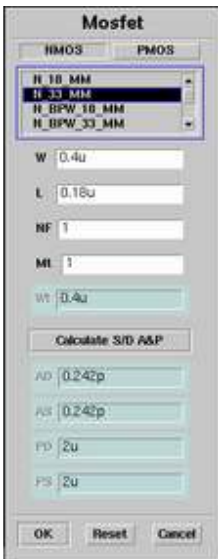
A megjelenő menü ablakban válasszuk a **Mosfet** sort.

Miután letettük a tranzisztort a megfelelő helyre, mellette türkizkék színnel megjelenik az elem azonosítója (neve, vagyis M1), típusneve, valamint szélesség és hosszúság értéke.



A beállított értékeket később is megváltoztathatjuk. Ehhez a tranzisztort vagy akár több tranzisztort egyszerre jelöljünk ki, majd kattintsunk az **egér jobb gombjával**, a megjelenő menüben pedig a **Device Props** kék színű pontot válasszuk ki. Ekkor viszont látjuk azt az ablakot, ahol az előbb az értékeket megadtuk, és az értékeket átírhatjuk. Módosítás esetén most se feledkezzünk meg róla, hogy az OK előtt megnyomjuk a **Calculate S/D A&P** gombot.

Ekkor megjelenik az alábbi ablak:



A legfelső gombok közül válasszuk az **NMOS**-t, alatta a listából pedig az **N_33_MM** elemet. Ez azt jelenti, hogy 3.3V-os tápfeszültségű nMOS tranzisztort szeretnénk elhelyezni. Ez alatt találjuk a tranzisztorra vonatkozó legfontosabb paramétereket, mezőket, úgymint csatornashélesség (W), csatornahosszúság (L), gate-ek száma (NF), és skálázó tényező (Mt).

Csatornashélességnek adjunk meg $W=0.4\mu\text{m}$ -t. Vigyázzunk, az értékek méterben értendők, ezért nem elég 0.4-et megadni, ki kell tenni a mikrométerre utaló 'u' jelet is, tehát **0.4u**!

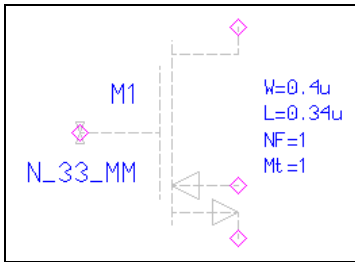
Ezek után meg kell nyomni a **Calculate S/D A&P** gombot, majd mehet az **OK**. Miután a tranzisztort

Másolás

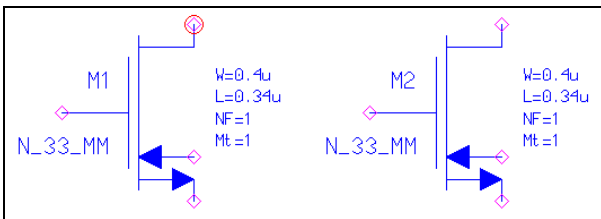
A CMOS NOR kapu kapcsolatában két darab nMOS tranzisztor szerepel, ezért szükségünk van még egy nMOS tranzisztorra. A második tranzisztort az elsőhöz hasonlóan is telepíthetjük, azonban lehetőségünk van a másolás-beillesztés funkció használatával az előbb letett tranzisztorból egy má-

solatot készíteni, és azt használni a második tranzisztornak.

Ehhez először kattintsunk a tranzisztorra, hogy kijelöljük azt. A tranzisztor kijelölt állapotát fehér színnel és szaggatott vonallal jelzi a program (ha nincs kijelölve, a vonalak türkizkék színűek). Elképzelhető, hogy a tranzisztor már korábbról ki volt jelölve, ugyanis miután letettük a tranzisztort, az automatikusan kijelölődik.



Miután kijelöltük a tranzisztort nyomjuk meg a billentyűzeten a **C** (mint Copy) betű gombját. A billentyű leütése után a másolat az egérrel együtt mozog, amíg kattintással nem határozzuk meg végleges helyét. Helyezzük el az új tranzisztorunkat az előző mellé!



Áthelyezés, forgatás, tükrözés

Ha a kattintás nem jó helyre sikerült, az elemeket utólag is mozgathatjuk. Egyik megoldás, ha az egyszerű fogd és vidd (Drag and Drop) módszerrel helyezzük át az elemeket. Másik lehetőség, ha kijelöljük a mozgatni kívánt elemet vagy elemeket, majd megnyomjuk a billentyűzeten az **M** betű gombját, akkor a kijelölt elemek a másolásnál már megismert módon az egérrel együtt mozognak, és kattintással tehetjük őket le kívánt új helyükre.

Forgatáshoz az **R** betűt, tükrözéshez az **F** betűt használhatjuk.

Tervezőfelület mozgatása

A készülő kapcsolási rajzunk, ha nem fér bele a képernyőbe, elmozgatható, kicsinyíthető vagy nagyítható. Nagyításhoz, kicsinyítéshez használjuk az

ikonmenü Zoom In és Zoom Out gombját, ezek kétszeresére növelik vagy csökkentik a nagyítást.



Ugyanezt érvük el a billentyűzet **Z** és **Shift-Z** billentyűinek leütésével.

Lehetőségünk van továbbá egy téglalap alakú terület kinagyítására is, ehhez kapcsoljuk be az ikonmenü Zoom in Area funkcióját, majd rajzoljuk téglalapot a tervezőfelületre az egér bal gombjának folyamatos nyomva tartásával. Amint elengedjük az egér bal gombját, a kijelölt terület nagyítva fogja kitölteni a tervezőfelület ablakát.

A tervezőfelület elmozgatására a képernyő jobb szélén található fel/le gombok illetve csúszka, illetve vízszintes irányban a képernyő alján lévő jobbra, balra gombok és a csúszka használható. Ugyanígy használhatjuk a billentyűzet kurzormozgató (Fel, Le, Jobbra, Balra) gombjait is, melyek az ellentétes irányba 1/4 képernyőszélességgel mozgatják el a tervezőfelületet.



Ha a kapcsolást teljes egészében, középre igazítva szeretnénk újra látni, nyomjuk meg a billentyűzeten **F** betű gombját (*Fit*).

pMOS tranzisztorok méretezése

Mivel a többségi töltéshordozók pMOS tranzisztor esetében a lyukak mozgékonyasága, az nMOS többségi hordozóihoz, az elektronokhoz képest kisebb, ezért ha a pMOS tranzisztor szélesség értékét ugyanakkorára választjuk, mint az nMOS-ét, a pMOS tranzisztoraink lassabbak lesznek. A gyorsaság arányos az elektronok és lyukak mozgékonyaságának arányával. Ha azt szeretnénk, hogy nMOS és pMOS tranzisztoraink megegyező gyorsaságúak legyenek, ezt a különbséget kompenzálnunk kell, amit a pMOS tranzisztorok nagyobb csatornaszélesség értékével tudunk elérni. A pMOS tranzisztorok csatornaszélességét ezért az nMOS tranzisztorok szélességénél mindig nagyobbra kell méretezni. Egy pMOS tranzisztor nagyjából akkor lesz ugyanolyan

gyors, mint egy egységnyi szélességű nMOS, ha annak szélességét 2.5-szeresére választjuk.

A CMOS NOR kapu kapcsolásában alul két nMOS tranzisztor helyezkedik el párhuzamosan kapcsolva, felül azonban a két pMOS tranzisztor sorba kapcsolva állnak (lásd a CMOS NOR kapu kapcsolási rajz ábráján). A két párhuzamosan kapcsolt nMOS, ha mindkettő nyitva van, megfelel egy darab, $2 \times 0.2 \mu\text{m} = 0.4 \mu\text{m}$ csatornaszélességű nMOS tranzisztornak. Felül, ha a mindkét pMOS nyitva van, a sorba kapcsolt elhelyezésük miatt azonban nem szélességük, hanem hosszúságuk adódik össze, így ez a két tranzisztor egyszeres szélességű, de kétszeres hosszúságú pMOS tranzisztorral helyettesíthető, ami, ha $0.5 \mu\text{m}$ alapszélességű pMOS-okat tételezünk fel (a két és félszeres szorzó miatt), $W=0.5 \mu\text{m}$ és $L=2 \times 0.13 \mu\text{m}$ -nek felel meg. És mivel igaz az, hogy működési sebesség szempontjából a W/L arány lényeges, a fenti tranzisztort normálva $0.13 \mu\text{m}$ alap-csatornahosszúságra, megfelel egy $W=0.25 \mu\text{m}$ szélességű pMOS tranzisztornak.

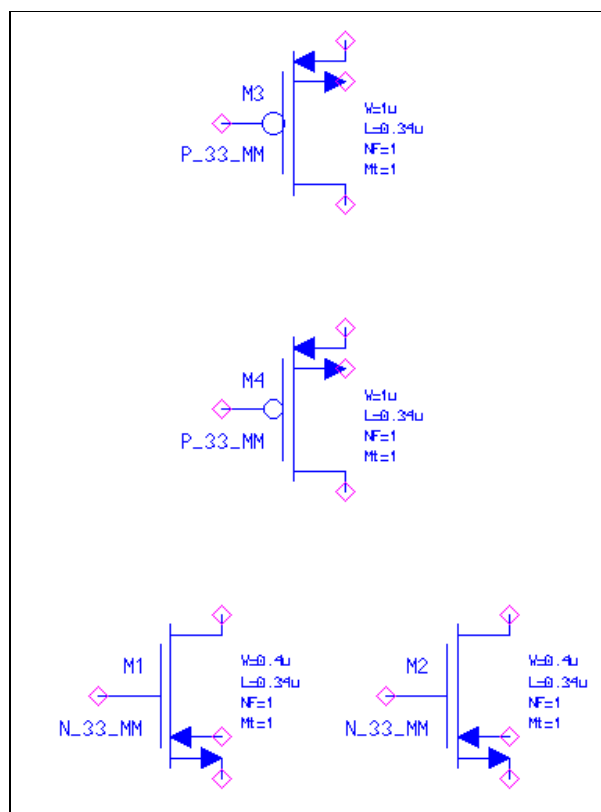
Ezért tehát szükséges a CMOS NOR kapu fenti pMOS tranzisztorait legalább még kétszer akkora csatornaszélességgel, azaz $1 \mu\text{m}$ -el tervezni.

pMOS tranzisztorok felvétele

Következő lépésben a két pMOS tranzisztort helyezük el a kapcsolási rajzban. Ehhez nyomjuk meg ismét a billentyűzeten az **A** betű gombját, a megjelenő ablakban fent most válasszuk a **PMOS** gombot. A fenti megfontolás nyomán a tranzisztor szélesség értékét írjuk át **1u**-re, nyomjuk meg a **Calculate S/D A&P** gombot, majd az **OK**-ra kattintással zárjuk be az ablakot, és helyezzük el a tranzisztort az nMOS-ok fölé.

Tipp: a tervezőfelület mozgatásához menet közben is használhatjuk a fel/le/jobbra/balra, ill. a kicsinyítő, nagyító gombokat.

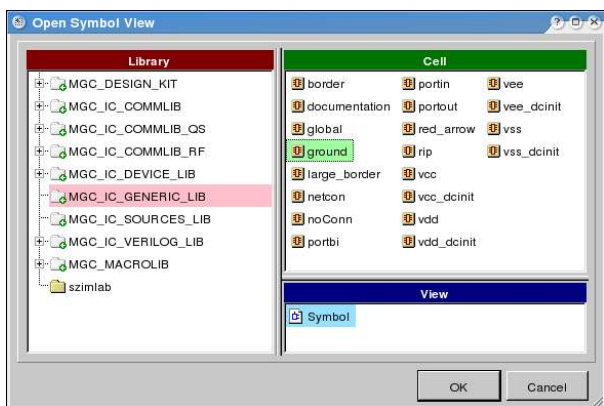
Az első pMOS elhelyezése után új elem létrehozásával vagy a most telepített pMOS másolásával egy második, szintén $1 \mu\text{m}$ szélességű pMOS tranzisztort tegyünk le az előző fölé. (Ha másoljuk az előzőt, annak paraméterei is másolódnak, nem szükséges azt még egyszer átírni). Az ily módon elhelyezett négy tranzisztort mutatja a következő ábra.



Fontos, hogy a tranzisztorokat ne tegyük túl közel egymáshoz, illetve ne húzzuk lábaikat egymásra az őket összekötő vezetékek minimalizálása végett, inkább szellősen, egymástól távolabb tegyük le azokat, mert akkor később könnyebb dolgunk lesz a vezetékvezéskor. Ha két elem lábai összeérnek, össze lesznek ugyan kötve, de mivel vezeték nem haladhat elemszimbólum felett a kapcsolási rajzban, az összenövesztett elemek nagy mérete miatt később más vezetéknek esetleg nagyon nagy kerülőutat kell majd tennie.

Földpont és tápfeszültség elhelyezése

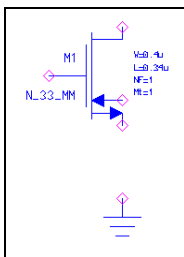
Nyomjuk meg megint az **I** gombot és a megjelenő Add Instance ablakban a **Browse...**-ot.



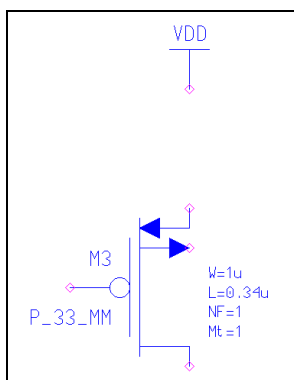
A földpontot szimbolizáló elemet az MGC_IC_GENERIC_LIB könyvtáron belül találjuk **ground** néven.

Helyezzünk el egy földpontot az egyik nmos tranzisztor alá! Most is ügyeljünk rá, hogy az nMOS Source (alsó) lába és a föld csatlakozási pont között hagyjunk szabad helyet, a két elemet később vezetékekkel fogunk összekötni.

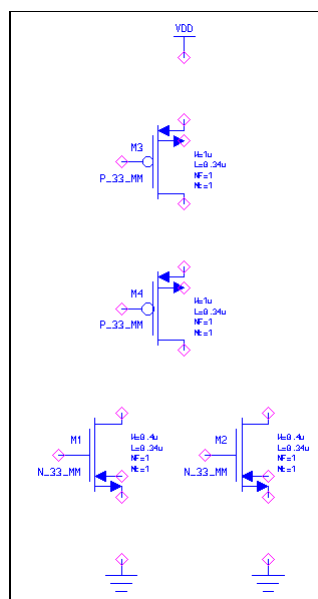
Miután letettük egyik föld pontunkat, a másik nMOS tranzisztor alá is tegyünk le egyet. Ezt megtehetjük az előző földpont másolásával vagy egy új földpont letételével.



Tápfeszültség csatlakozási pontot elhelyezéséhez ismét: Add Instance, Browse..., és ugyanezen (MGC_IC_GENERIC_LIB) könyvtáron belül a **vdd**-t válasszuk ki. Helyezzünk el egy vdd-t a felső pMOS tranzisztor fölé.



Ezt követően a kapcsolásunk nagyjából így néz ki:



Huzalozás

Kössük össze a már félkész alkatrészeinket, hogy kapcsolást kapjunk belőle!



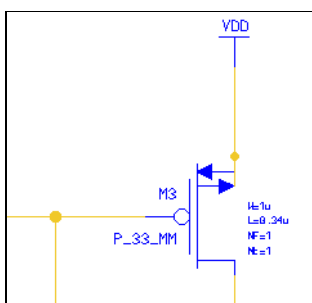
A csatlakozási pontok összekötéséhez *wire* (huzalozás) üzemmódba kell váltanunk. Ezt megtehetjük a bal oldali ikonmenü **Add Wire** menüpontjának kiválasztásával, vagy a billentyűzet **W** betű gombjának lenyomásával. A huzalozás módból az Esc billentyű leütésével tudunk kilépni.

Kössük össze az utoljára elhelyezett vdd-t a felső tranzisztor Source lábával. Először kattintsunk arra a csatlakozási pontra, ahonnan a vezeték indítani szeretnénk (vdd egyetlen, alsó csatlakozója), húzzuk az egeret a végső pontba (pMOS felső, azaz Source láb csatlakozója), majd itt kattintsunk duplán. A dupla kattintás jelzi a vezeték végét. Ha csak szimplán kattintunk, töréspontot iktathatunk be a vezetékbe, amely hosszabb, bonyolultabb kapcsolások esetén szükséges. Az elemek csatlakozási pontjait lila élére állított négyszöggel jelöli a program.

Kössük össze a kapcsolásnak megfelelően a tranzisztorokat és a táp és föld pontokat!

Figyelem!

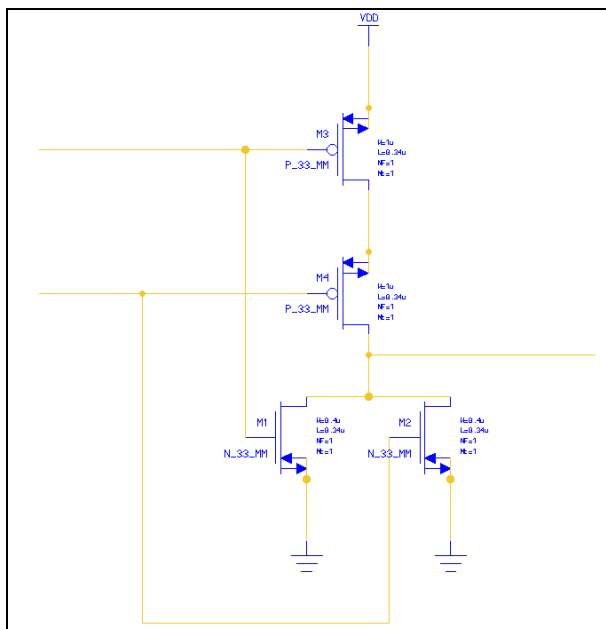
nMOS tranzisztor szubsztrátját mindig a földre, pMOS tranzisztorét tápfeszültségre kell kötni.



A már elhelyezett huzalok áthelyezésére is lehetőségünk van. Egy vagy több huzaldarab kijelölése után az M betű billentyűjének leütésével, vagy a Drag and Drop módszert alkalmazva arrébb húzhatunk vezetékeket, vezetékdarabokat. A Mentor program néha automatikusan is átrendez egy-két vezetékdarabot rajzolás közben, ha az átrendezés nem tetszik, felülbírálnak az elhelyezéseket, tehát azok a vezetékek is elmozdíthatók. A program mindig egy csomópont és/vagy a 90°-os sarok közötti egyenes szakaszt tekint egyetlen, egy darabban mozgatható vezetékdarabnak. Több vezetékdarabot is mozgathatunk (vagy másolhatunk is) egyszerre, ha előtte kijelöljük azokat.

Szükségtelemen vált vezetékdarab törléséhez jelöljük ki a vezetékdarabot vagy vezetékdarabokat, és használjuk a billentyűzetet a Del gombot.

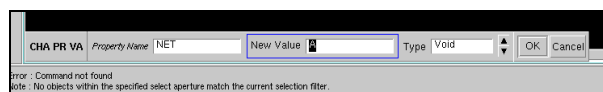
A behuzalozott, félkész kapcsolási rajzunkat a következő ábra szemlélteti.



Vezetékek elnevezése

A CMOS NOR kapunak két bemenete (A és B) ill. egy kimenete (Y) létezik. A szimulációs eredmények áttekinthetősége kedvéért a bemeneteket, kimeneteket, valamint lényegesebb belső jelvezetéseket célszerű elnevezni.

Kattintsunk az elnevezendő vezeték egyik szakaszára, hogy kijelöljük azt (ha kijelöltük, fehér színű). Ezután a billentyűzet L betű gombjának megnyomását követően megjelenik egy csík alakú paramétermező, ebben az ablakban a **Value** mezőbe írjuk be az általunk kitalált nevet.



Adjunk nevet minden be és kimenetnek, bonyolultabb kapcsolás esetén a belső jeleknek is!

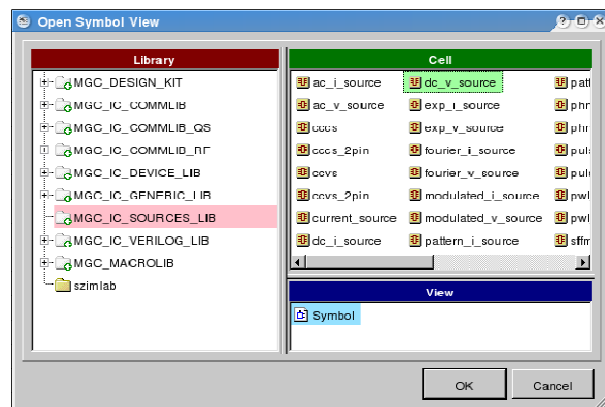
Mentés



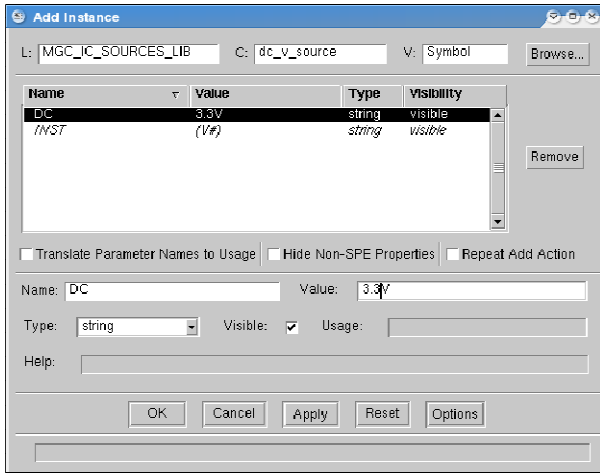
Hogy az eddig elvégzett munkánk ne vesszen el, használjuk a fenti menü Mentés (Save) gombját. A mentés funkció elérhető a menü File/Save Sheet pontjának kiválasztásával is.

Tápfeszültség forrás elhelyezése

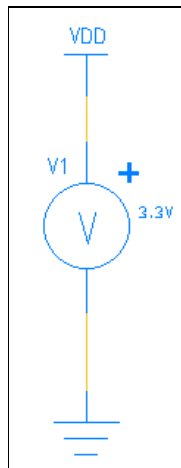
Az I gomb lenyomásával (Add Instance), a **Browse...** menüponton belülről adjunk hozzá új elemet a kapcsolásunkhoz, amelyet most az **MGC_IC_SOURCES_LIB** könyvtárból keressünk ki, itt találhatóak a különböző feszültség- és áramforrások. Tápfeszültség forrásnak válasszuk a **dc_v_source** elemet (az elemek abc sorrendben rendezve találhatóak).



Az **OK** gombra kattintás után megváltoztathatjuk a forrás paramétereit. Alapértelmezésben 1V-ot ajánl fel a program, mi 3.3V-os tápfeszültséggel fogunk dolgozni, ezért az **DC** nevű paramétert kiválasztva a listában, értékét változtassuk meg **3.3V**-ra. Az érték módosítása után mindig nyomjunk az Apply gombra, ezzel tudjuk érvényesíteni a módosítást.



Ez után **OK** gombbal zárjuk be az ablakot, a forrást pedig helyezzük el a kapcsolási rajz mellé baloldalra. Tegyük a forrás alá egy föld csatlakozási pontot, fölé pedig egy vdd-t, majd a forrás két kábelét kössük be huzalozással.



Tesztjelek megtervezése

Fontos a szimulációhoz előre megtervezni, hogy hogyan akarjuk saját magunk számára bizonyítani, hogy a megépített áramkörünk működik. A szimulációban szereplő áramkörnek adott gerjesztésekre megfelelő választ kell adnia. A legegyszerűbb módszer a vizsgálatra egy olyan gerjesztés létrehozása, mely időben egymás után az összes bemeneti kombinációt végigpróbálja. A feladatunk egy ilyen jel megtervezése, amelyet aztán meg is valósítunk a szimulációhoz.

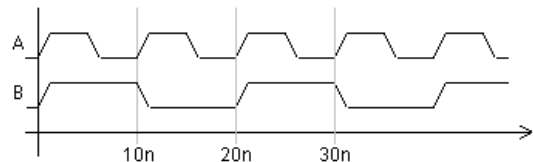
A CMOS NOR kapunak két bemenete van, A és B, összes lehetséges bemeneti kombináció négy darab: 00, 01, 10, 11. A két bemenethez két darab négy-

szögimpulzus generátorra van szükség. A négyszögimpulzus generátor periodikus négyszögjelet lehet előállítani, ebből kell a gerjesztésünket megtervezni.

Legyen a leggyorsabb bemeneti jel két jelváltása közötti idő 10nsec. A két bemenet közül a gyorsabban változó négyszögjelű váltson minden 10nsec-ban értéket, vagyis kimenetén a 1-0-1-0-1-0 bitsorozat jelenik meg.

A másik, B generátor jelét úgy kell beállítani, hogy adjon nulla logikai értéket arra az esetre is, amikor A generátor nullát ad, és akkor is, amikor egyest, illetve ugyanez teljesüljön B logikai egyes értéke mellett is.

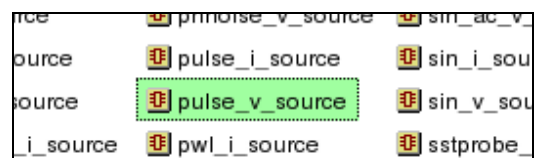
A B generátor kimenetén (B bemeneten) ezért a váltást csak minden második időpillanatban váltjuk, tehát a 0-0-1-1-0-0-1-1 jelsorozatot ad periodikusan. Ezzel elértük, hogy minden jelkombináció megjelenik a NOR kapu A és B bemenetén.



A megtervezett négyszögimpulzusok előállításához pulzusgenerátorokat fogunk használni. A pulzusgenerátor egy olyan feszültségforrás, mely periodikus négyszögjel előállítására képes. A jel paramétereit: a pulzus szélessége, periódusideje, a felfutási idő, lefutási idő, a nulla időpillanathoz képesti késleltetés (delay), illetve a kisebbik és nagyobbik feszültségérték beállíthatók.

Négyszögimpulzus generátor hozzáadása

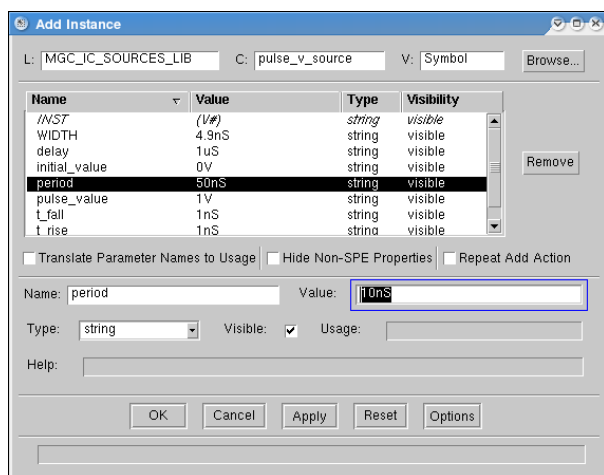
A már megszokott módon I gomb a billentyűzeten, Add Instance, Browse..., és most ismét a MGC_IC_SOURCES_LIB-ből válasszuk a **pulse_v_source** elemet, majd nyomjunk az **OK** gombra.



Minden külön bemenetre külön pulzusgenerátorra lesz majd szükségünk. Ha van a kapcsolatban ponált és negált jel is (például a Transzfer gate-es D-tároló igényli a fázisjelet és negáltját is), letehetünk két külön pulzusgenerátort

a ponált és a negált jel számár külön, de működik az is, ha a ponált jel a pulzusgenerátorról megy, a negáltat pedig a ponált invertálásával (egy plusz inverter beépítésével) generáljuk.

Programozzuk fel ezután az újonnan letett pulzusgenerátor paramétereit úgy, hogy az a megtervezett A bemenő jelet állítsa elő!



Periódusidő

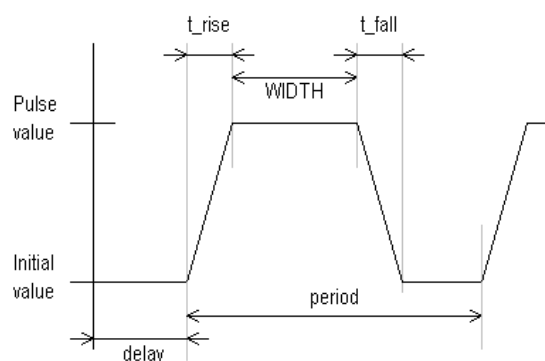
Tudjuk, hogy az A jel periódusideje 10nec, ezt rögtön be is állíthatjuk. Válasszuk ezért a paraméterek listájából először a **period** listaelemet, és a lista alatt megjelenő Value mezőben értékét írjuk át **10nS**-re.

Felfutás és lefutás

A fel- és lefutási idő legyen minden esetben 0.1nsec. A felfutási időt a **t_rise** paraméter, a lefutást a **t_fall** jelképezi, írjuk be mindkettőhöz **0.1nS**-t.

Pulzusszélesség

Ha a jelünk szimmetrikus, 50%-os kitöltési tényezőjű, az azt jelenti, hogy egy periódus alatt ugyanannyi ideig kell nullában lennie a jelnek, mint egyben. A teljes periódusidő a felfutási, lefutási időkből, valamint az egyes logikai érték és nullás logikai érték idejéből áll össze.



Ezt képletben kifejezve a következőt kapjuk:

$$period = t_rise + t_fall + t1 + t0$$

Ha a kitöltési tényező 50%, akkor $t1 = t0$.

A jel pulzusszélessége lényegében a jel logikai egyes értékének időtartama.

$$t1 = WIDTH$$

$$period = t_rise + t_fall + 2 \cdot WIDTH$$

Az egyenletben egy ismeretlen van csak, könnyen látható, hogy a pulzusszélesség a következő lesz minden 50% kitöltési tényezőjű jelle:

$$WIDTH = \frac{period - t_rise - t_fall}{2}$$

Konkrét számértékekben gondolkodva, a 10nsec periódusidőből levonva a 0.1nsec felfutási és ugyanennyi lefutási időket, 9.8nsec marad. Ennek felében lesz a jel értéke logikai egyes, másokban nulla az 50% kitöltési tényező miatt. Ezért a pulzusszélesség értéke 4.9nsec.

A paraméterlistában a **WIDTH** paraméter jelöli a pulzusszélességet, értékét írjuk át. Az Apply gombot most is használni kell minden paraméter módosítása után.

Eltolás

Lehetőségünk van a pulzusgenerátor jelét időben eltolva, késleltetve indítani. A késleltetés mértékét a **delay** paraméterrel állíthatjuk be. Ha nem teszünk késleltetést, a periódus a felfutó éllel kezdődik. Mi azt szeretnénk, ha jelünk először nullából indulna, és egy fél periódus idejére nulla lenne. Ezért a paraméter értékét a pulzusszélesség értékével meg-

egyezőre, azaz **4.9nsec**-re kell állítani (a fél periódusidőből itt is lejön a felfutó/lefutó él ideje).

Ha ponált jelhez akarunk negált jelet előállítani, egy lehetséges megoldás az, ha a ponált jelet 180°-al, azaz fél periódusidővel eltolva vesszük, ez éppen a negált jelet adja. A fél periódusidejű eltolást a ugyanígy a delay paraméterrel értékének megfelelő megválasztásával valósíthatjuk meg.

Feszültség szintek

A pulzus további két paramétere, hogy a logikai nulla és egyes mekkora tényleges feszültségértéknek felelnek meg. A logikai nulla értékét az **initial_value** paraméter tartalmazza, értéke legyen **0V**. A logikai egyes feszültségértékét (**pulse_value**) állítjuk tápfeszültségre, azaz **3.3V**-ra.

A megváltoztatott paraméterek még egyszer, felsorolás szintjén:

```
delay=4.9nS
initial_value=0V
period=10nS
pulse_value=3.3V
t_fall=0.1nS
t_rise=0.1nS
width=4.9nS
```

Ha ezzel végeztünk, az ablakot az **OK** gombbal zárjuk be.

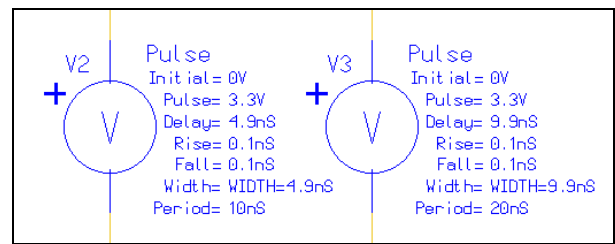
A második, B jelű négyszögjel generátorunkat az előző másolataként hozzuk létre. Más elemek, pl. tranzisztorok másolásához hasonlóan itt is először kattintsunk a generátor áramköri képére, majd nyomjuk meg a billentyűzet a **C** betűt. Ezt követően az egérrel mozgassuk el a másolt generátort az előző mellé jobbra, és kattintsunk, hogy letegyük az új generátort a végső helyére.

Az új generátor kijelölt állapotában nyomjuk meg a **Q** betűt a billentyűzet, hogy átszerkesszük paramétereit. Mivel az előzőleg beállított pulzsgenerátort másoltuk, a paraméterek is másolódtak, így csak a különbözőeket kell átírni. A fenti idődiagram tervről leolvassa, a következő rekeszek értékét írjuk át:

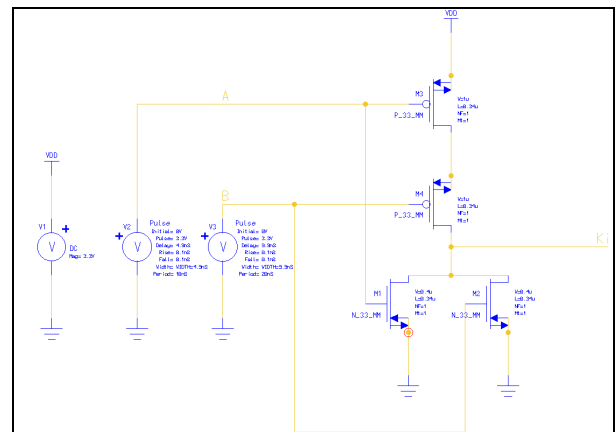
```
delay=9.9nS
period=20nS
width=9.9nS
```

Fontos, hogy most is minden érték átírása után nyomjuk meg az **Apply** gombot, mielőtt új sorba kat-

tintunk a felsorolásban. Ha készen vagyunk, most is az **OK** gombbal zárjuk be az ablakot.




Ezután kössük be a két négyszöggenerátor alsó kivezetéseit földpontra, felső kivezetéseit pedig rendre az A és B vezetékhez. A kapcsolási rajzunk elkészült, melyet a következő ábrán láthatunk.



Hasznos gombok a billentyűzet:

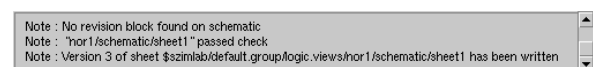
| | |
|-----------|---|
| F2 | elem kijelölését megszünteti |
| F | flip, kijelölt elem tükrözése |
| M | kijelölt elem mozgatása |
| R | kijelölt elem forgatása |
| Q | elem paraméterértékeinek változtatás (kivéve tranzisztorok) |

Ellenőrzés és mentés

 Elkészült a CMOS NOR kapu kapcsolása, ellenőrzéshez és mentéshez a fenti ikonmenü **Check and Save** gombját használjuk.

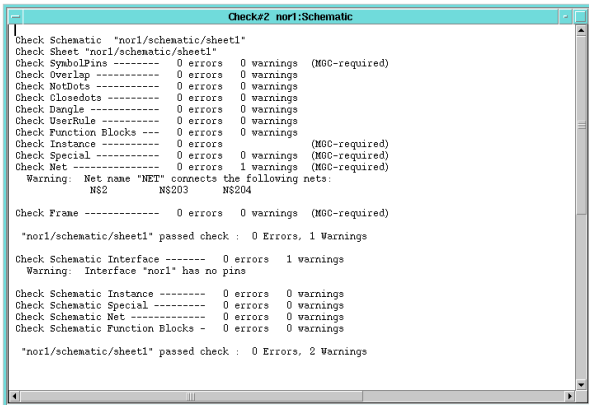
Ha az ellenőrzés mindent rendben talál, az ablak alján lévő kis, háromsoros állapot csíkban a következő üzenetnek kell olvashatónak lennie:

Note: „nor1/schematic/sheet1” passed check.



Amennyiben hibák vannak a kapcsolási rajzban, a hibák kinyomozásához a menü **File/Check** pontját választva kaphatunk részletes beszámolót. (Ha a File menü alatt nem találunk ilyen menüpontot, először kattintsunk egyet a fekete tervezői felületbe.)

Egy hibátlan CMOS NOR kapu kapcsolási rajzról adott beszámolót mutat a következő ábra. A beszámoló külön ablakban jelenik meg, melyet a jobb felső sarokban található bezárás gombbal (kisebbik négyzet) zárhatunk be.



Az ablakban a legelső sorban látjuk, hogy összesen hány hiba és hány figyelmeztetés található a kapcsolási rajzban. A szimuláció futtathatóságának feltétele, hogy nulla darab hibánk legyen. A figyelmeztetések (warning-ok) még önmagában nem jelentenek hibát.

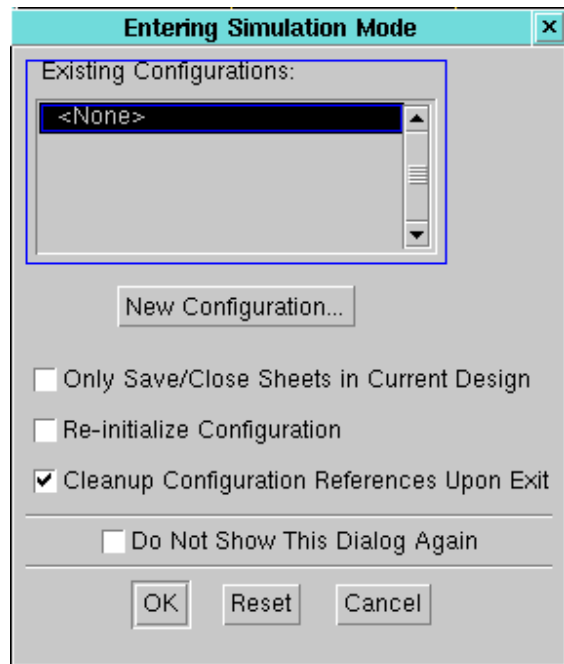
Az ablakot zárjuk be a bal felső sarokban lévő kicsi gombbal, dupla kattintással.

Belépés a szimulációs módba



A baloldali ikonmenü zöld háromszög alakú (lejátszás gombra hasonlító) ikonjára kattintsunk (Enter Simulation Mode).

Ekkor megjelenik egy ablak, kattintsunk az **OK**-ra.



Ekkor, kis várakozás után a program átlép *szimulációs módba*. Eddig tervező módban voltunk, szimulációs módban a fenti menü, ill. a baloldali ikon-sor is megváltozik, továbbá a kapcsolási rajz tervezőfelületéről eltűnik a rács.

A szimulációs módban már nincs lehetőségünk az áramkörön módosítani, ha mégis módosítani akarunk, ahhoz előbb vissza kell lépni a tervezés módba, ezt a jobb oldali menü legfelső End Sim (nagy piros) gombjával tudjuk megtenni. (Most ne lépünk vissza.)

Analízis kiválasztása



Szimuláció előtt ki kell választanunk, hogy milyen analízist végezzen a program. A jobb oldali menü **Analyses...** pontját kiválasztva megjelenik a Setup Simulation Analysis ablak.

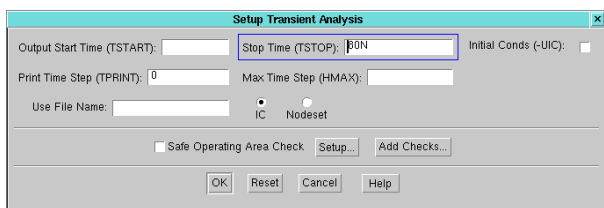
Tranziens analízis beállításához a **Transient** melletti négyzetbe tegyük pipát, a többitől, ha van, szedjük le.

Kattintsunk a Transient felirat melletti **Setup...** gombra. A megjelenő ablakban állíthatjuk be, hogy milyen időintervallumra szeretnénk vizsgálni az áramkör működését.



A kezdő időpillanat alapértelmezés szerint 0s, a szimuláció leállításának időpontja azonban tőlünk függ. Célszerű olyan időtartományt választani, hogy az ne legyen se túl rövid, tehát néhány ciklus azért beleférjen, de ne is legyen túl hosszú, mert a periodikus ismétlődésektől a későbbi ciklusok új információt úgysem hordoznak, a szimuláció pedig feleslegesen fut hosszabb ideig. Ha a leglassabban változó jelünk periódusideje mondjuk 20nsec, akkor 60-80nsec hosszúságú analízis bőven megteszi.

A CMOS NOR kapu esetén 80nsec értéket választottunk tranziens időnek, ezért a **Stop Time (TSTOP)** rekeszbe **80N** értéket írtunk. Más beállításon nem kell változtatni, ha ezzel megvagyunk, **OK** gombbal zárjuk be az ablakot.



Visszatérve a Setup Simulation Analysis ablakba, itt nincs már más teendőnk, ezért itt is **OK**-t nyomjunk a beállítások eltárolásához és az ablak bezárására.

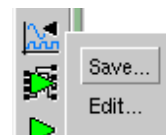
Vizsgált jelek felvétele

Ezután meg kell mondani a program számára, hogy mely vezeték jeleit szeretnénk látni a szimulációs végeredményben. **Jelöljük ki** azokat a vezetékeket a kapcsolási rajzon, amelyeket meg szeretnénk jeleníteni. A kimenetek mindenképpen szük-

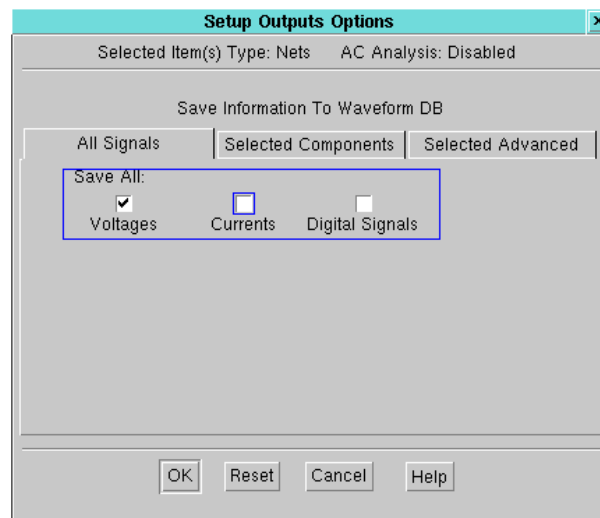
ségesek, de hogy ellenőrizni tudjuk a bemeneteket, célszerű a azokat is megjeleníteni.

A CMOS NOR kapu esetén három vezeték jeletöltünk ki, ezek a két bemenet (A és B), valamint egyetlen kimenete (Y). Egy vezeték kijelöléséhez kattintsunk a (sárga színű) vezetékekre. A vezeték kijelölt állapotát fehér színnel és szaggatott vonallal jelzi a program. További vezeték kijelöléséhez tartsuk lenyomva a **Shift** gombot a billentyűzetten.

Ha a kívánt vezetékeket kijelöltük, kattintsunk a jobb oldali menüben a **Setup Outputs** gombra, a megjelenő almenüben pedig a **Save...** gombra.



A megjelenő Set Output Options ablakban az All Signals fül alatt lévő **Voltage** négyzetet be kell pipálni, ha nem lenne, a Currents pipát azonban le kell szedni, áramokat most nem számolunk. Ezután a Selected Components fül alatt a bal oldalon lévő Save pont alatt a **Voltage** jelölőnégyzetét válasszuk ki. Végül **OK**-val zárjuk be az ablakot.



Szimuláció indítása



Nyomjunk a bal oldali ikonmenü Netlist & Run gombjára. A program előállítja a netlistet és indítja a beállított szimulációkat.

Először megjelenik egy ablak, melyben a netlista elkészítésének menetét láthatjuk. Ezután megnyílik a másik ablak, amelyben a szimuláció futásáról láthatunk eredményt.

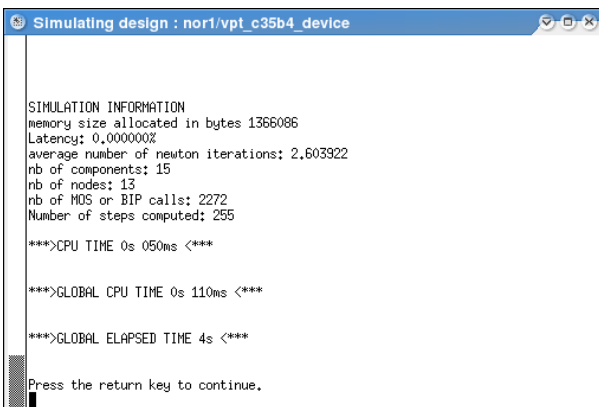
A szimuláció akkor futott le helyesen, ha a második ablakot följebb tekerve (egér scroll gombjával) a

GENERATION pontnál a 0 error(s). bejegyzést megtaláljuk. Amennyiben itt nullától eltérő számú hibát jelez a program, a szimuláció sikertelen. A warningokkal (figyelmeztetésekkel) most sem kell foglalkozni.

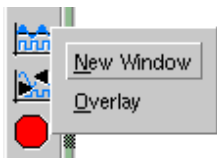
```
***** GENERATION ...

***** 0 error(s).
***** 18 warning(s).
```

Ha minden rendben van, az **Enter** leütésével zárjuk be a második, majd újbóli **Enter**-rel az első ablakot is.



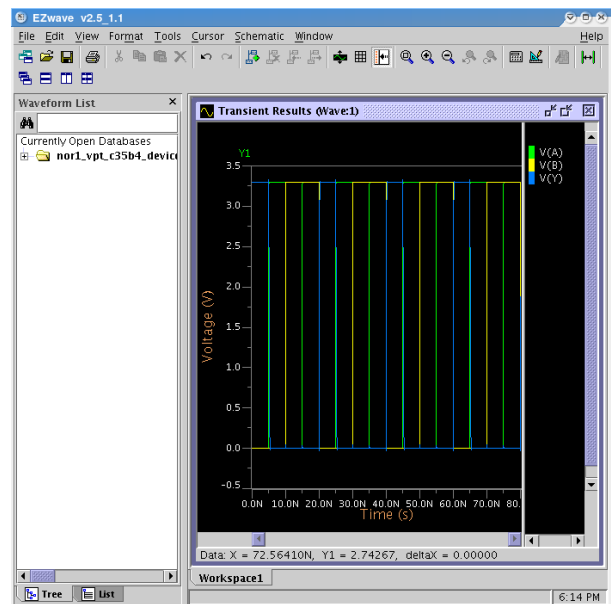
Szimulációs eredmények megtekintése



Kattintsunk a jobb oldali menü **View Outputs** gombjára. Ha megjelenik a menü, a New Window pontot válasszuk.

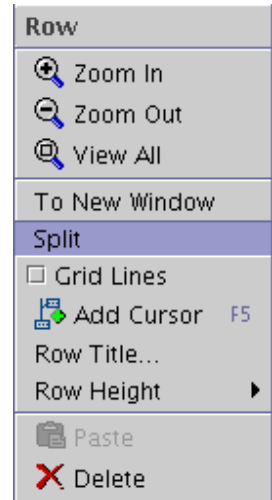
Kis várakozás után megnyílik az EZ Wave megjelenítő ablaka. Jobb láthatóság kedvéért célszerű az ab-

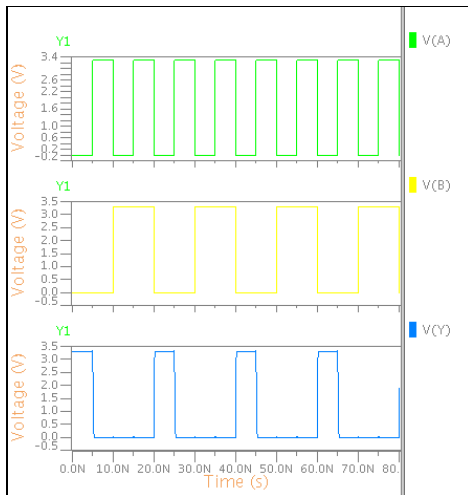
lakot rögtön teljes képernyősre állítani, a belső ablakot szintén.



Kapcsolási rajzunk tranziens szimulációjának eredményét a fekete középső mezőben látjuk feszültség-idő diagramon ábrázolva.

A jelek egymásra vannak rajzolva, különböző (kék, sárga, zöld) színnel szerepelnek. Jobb átláthatóság érdekében célszerű a jeleket egymás alatt szétszedve elrendezve megjeleníteni. Ehhez kattintsunk a jelek közötti fekete mezőben az **egér jobb gombjával**, és az előjövő menüben válasszuk a **Split** menüpontot. A szétválasztott hullámalakokat az alábbi ábra szemlélteti.





Kapcsolás működésének ellenőrzése

Ezek után nincs más dolgunk, minthogy megvizsgáljuk az eredmények alapján, hogy a kapcsolási rajzunk megfelelően működik-e. A példában szereplő CMOS NOR kapu igazságtáblája a következő:

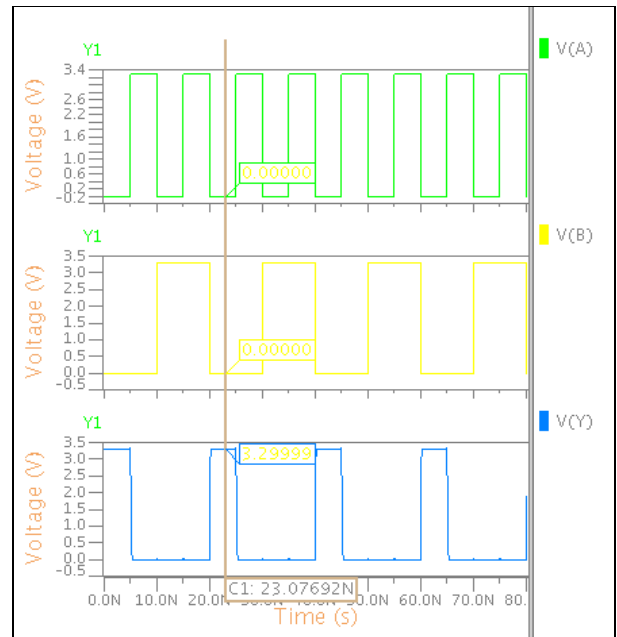
| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

Az A és B bemenetekre adott négyzögjeleket úgy választottuk meg, hogy az igazságtáblázatban szereplő mind a négy kombinációt egymás után előállítsuk a bemeneten. Vizsgáljuk meg, hogy a kimenet megfelelően válaszol-e a bemenet gerjesztésére!



Segítségképpen használhatunk vonalzókat (Marker), melyet az billentyűzet F5 funkciógombjával, vagy a felső menü **Add Cursor (F5)** gombjával adhatunk hozzá.

A gomb megnyomását követően az új vonalzó a $t=0$ időpillanatban helyezkedik el, és függőleges irányú. Az időtengely irányában (vízszintesen) az egérrel Drag and Drop (fogd és vidd) módszerrel mozgatható el.



A vonalzó mozgatását a három jelhez tartozó buborék is követi, melyekben a jel feszültség értékei olvashatóak le a vonalzó által meghatározott időpillanatban. A vonalzó alján található egy további, fehér színű rubrika, melyben a vonalzó időpontja olvasható le (C1).

A helyes működéshez meg kell vizsgálnunk, hogy amikor $A=0$ és $B=0$, a kimenet értéke $Y=1$, vagyis tápfeszültség (3.3V), minden más esetben 0V körüli érték (néhány tíz mV eltérés megengedett).

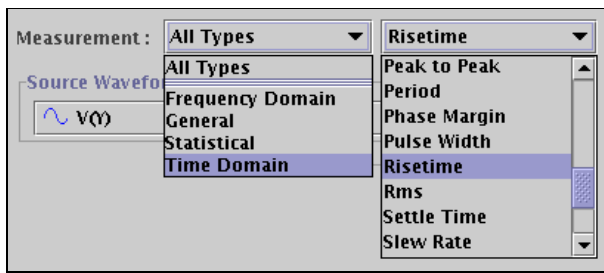
Késleltetési idő mérése

Vizsgáljuk meg, hogy az általunk tervezett CMOS NOR kapu mekkora késleltetési idővel rendelkezik! Vizsgálunk egy felfutási, valamint egy lefutási késleltetési időt. A leírásban csak a felfutási idő mérést írjuk le részletesen, a lefutási ehhez teljesen hasonlóan mérhető.



Jelöljük ki a mérendő jelet (kattintsunk rá egérrel), majd a fenti ikonsorból válasszuk az Open Measurement Tool (Ctrl-M) gombot.

A megjelenő Measurement Tool ablak felső részén található Measurement két legördülő mezője közül az elsőben válasszuk a **Time Domain** pontot, hogy jelezzük, számításainkat időtartományban kívánjuk végezni. A mellette lévő legördülő menüből válasszuk a **Risetime** pontot, mert felfutási időt szeretnénk mérni.



Ha ezzel megvagyunk, kattintsunk az **Apply** gombra, és a hullámformán bejelölve megjelenik a számított felfutási idő.