

Analóg áramkörtervezés III.

Közös source-ú alapkapsolás vizsgálata

Alkalmazott eszköz: LTspice XVII

Dokumentáció létrehozásának dátuma: 2020. március 19.

Dokumentáció legutolsó módosításának dátuma: 2021. március 23.

Szerző: Dr. Takács Gábor, Dr. Bognár György

A laborgyakorlat során az LTspice XVII programot fogjuk használni, amely az iparban elterjedten használt áramkörtervező szoftver. Freeware, tehát ingyenesen letölthető és használható, ráadásul se a csomópontokra, se a komponensekre, de még az alárakörök számára sincs felső korlát.

A szimulációs program főbb részei:

- a) kapcsolási rajz szerkesztő
- b) SPICE szimulációs motor
- c) hullámforma megjelenítő

A programban futtatható szimulációk fajtái:

- a) időtartománybeli (tranzienst)
- b) kisjelű (AC)
- c) nagyjelű (DC)
- d) nagyjelű átviteli (DC transzfer)
- e) munkapont meghatározása
- f) zaj

A szoftver fel van vértézve kapcsolóüzemű tápegységek tervezéséhez szükséges funkciókkal is, manapság ez a tervezőprogram fő alkalmazási területe. Nyomatott huzalozású lemez tervezésére (diszkrét esetben), integrált áramkör fizikai tervének létrehozására (layout), logikai szimulációra viszont nem alkalmas.

Az alábbi linken megtalálható a szoftver legfrissebb változata:

<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

Lap közepén kattintsunk a

Download for Windows 7, 8 and 10

gombra, ekkor egy 42 MB méretű telepítőcsomag letöltése fog elindulni. Ha végzett, akkor a szokásos módon telepítsük fel a számítógépünkre. Ha nem változtattuk meg a telepítés helyét, akkor a *c:\Program Files\LTC\LTspiceXVII* mappában lesz megtalálható a program és a működéséhez szükséges egyéb fileok. Ahhoz, hogy az Austria Microsystems által biztosított integrált áramköri elemekkel (amelyek N és P csatornás MOS tranzisztorok) tudjunk tervezni, ezek szimbólumát és modelljét hozzá kell adnunk *lib* mappa tartalmához.

Ehhez töltsük le az AMS komponenseit az EDU rendszerből!

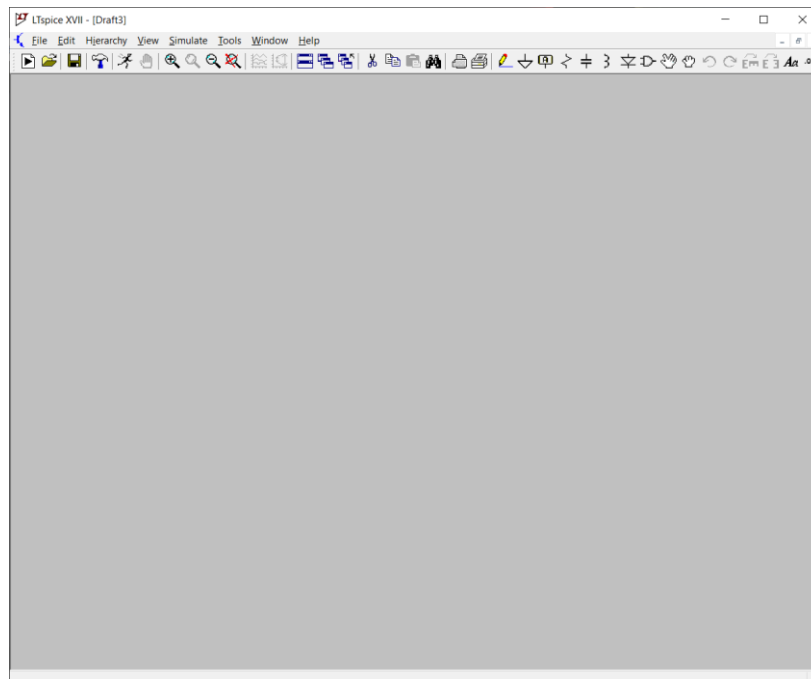
A kicsomagolást követően (vagy a .zip-be Total Commander-rel belenézve) kettő mappát találunk. A *sym* mappában található egy *AMScells* almappa, amely két .asy kiterjesztésű file-t tartalmaz, amely nem más, mint grafikus editorral szerkesztett hierarchikus szimbólumok (NMOS, PMOS). Nézőkével (TC-ben F3) belenézve láthatjuk, hogy a szimbólumok rajzát írja le egy speciális formátumban. A *sub* mappa tartalmaz egy *AMSlev49.sub* file-t, amelybe betekintve láthatjuk, hogy ez nem más, mint a tranzisztorok modelljének leírása SPICE nyelven. A tranzisztorok BSIM3 49-es szintű leírásáról van szó, ami egy meglehetősen összetett, sok paraméterrel ellátott modell.

A letöltött és kicsomagolt mappa *sub* alkönyvtárának tartalmát másoljuk a *C:\Users\USERNAME\Documents\LTspiceXVII\lib\sub* mappába¹ (a választott telepítési hely függvényében ez eltérhet), a *sym* mappa tartalmát az almappával együtt másoljuk a *C:\Users\USERNAME\Documents\LTspiceXVII\lib\sym* mappába. **FONTOS!** NE a *C:\Program Files\LTC\LTspiceXVII* mappába másoljuk, mert azt nem fogja látni a program.

Ahhoz, hogy az újonnan hozzáadott komponenseket tudjuk használni, egy .include direktívát kell létrehozni a kapcsolási rajzon, melyről később részletesen is szó lesz.

Indítsuk el az áramkörtervező szoftvert az asztalon, vagy a start menüben található ikon segítségével (elérési út: "C:\Program Files\LTC\LTspiceXVII\XVIIx64.exe" – 64 bites telepítő készlet esetén).

File – New Schematic parancs segítségével hozzunk létre egy új kapcsolási rajzot. A komponenseket, vezetékeket és a szimulációs parancsokat itt tudjuk elhelyezni.



1. ábra - Az LTspice kapcsolási rajz szerkesztő ablaka

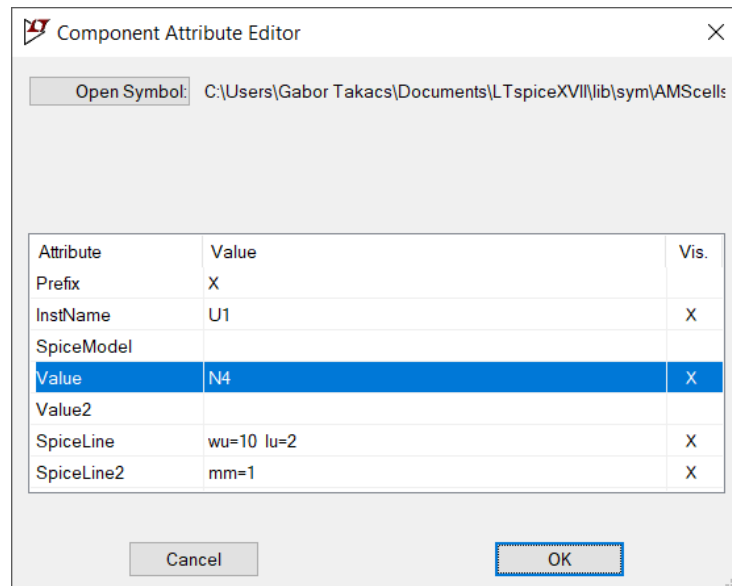
¹ A *C:\Users\USERNAME* értelemszerűen lecserélendő a beállított felhasználói mappa elérésére és/vagy a felhasználó nevére. A *C:\Users* a Windows 10 rendszerek alapértelmezett felhasználói mappákat tartalmazó könyvtára.

Az *Edit* legördülő menüre kattintva láthatjuk a kapcsolási rajz készítéséhez szükséges parancsok listáját, mellette aposztrófokkal körbezárt gyorsbillentyű parancsok. Némelyik logikusan következik (pl. ellenállás – 'R'), de van pár meglehetősen meredek (pl. vezetékek – F3, visszavonás (magyarul Ctrl+Z) F9).

Rajzoljunk meg egy közös source-ú alapkapcsolást passzív terheléssel. A tápfeszültség legyen 5V, a bemenetre pedig kössünk egy DC feszültségforrást.

Kezdjük a tranzisztorral, és a továbbiakban majd e köré építkezzünk. Az *Edit* – *Component* 'F2' parancs után megnyílik a *Select Component Symbol* ablak. Az alapértelmezett mappából (pl.: *C:\Users\USERNAME\Documents\LTspiceXVII\lib\sym*) tudunk alkatrészeket választani. A szögletes zárójelben lévő elnevezések a tartalmazó mappák nevei, amelyekben több alkatrész is található. Ha a saját alkatrészmappánkat a megfelelő helyre másoltuk, akkor, akkor [AMScells] mappa itt megjelenik. Ezen kétszer kattintva megnyílik a mappa, és itt ki tudjuk választani, hogy nMOS vagy pMOS tranzisztort helyezünk-e el. A 4-es szám az alkatrészek kapcsainak a számára utal. Válasszuk ki az n4-es jelölésű NMOS tranzisztort és kattintsunk az OK gombra. Egy kattintással el lehet helyezni az alkatrészt a rajzfelületen.

Az alkatrész szimbólumára jobb gombbal kattintva az adott komponens paramétereit tudjuk megadni.



2. ábra - A komponens paramétereinek szerkesztése

Ezek közül, ami számunkra fontos az a tranzisztor csatornaszélessége (wu) és hossza (lu) mikrométerben (erre utal az 'u' betű), amely a *SpiceLine* sorban található meg, illetve megadhatjuk, hogy ezen tranzisztorból (egységtranzisztor) hány darab legyen egymással párhuzamosan kötve (mm paraméter a *SpiceLine2* sorban). A lehelyezett **tranzisztorok W és L értékei hagyjuk változatlanul!** Kiklikeljük az OK gombra.

FONTOS! Ahhoz, hogy az általunk hozzáadott tranzisztorral áramkör-szimulációt tudjunk végezni, meg kell adni a modellfile helyét egy szimulációs direktíva segítségével. A billentyűzet 's' gombjának megnyomásával megnyíló ablakba gépeljük be, hogy

„*include C:\Users\USERNAME\Documents\LTspiceXVII\lib\sub\AMSLev49.sub*”.

Fontos az include előtti pont, a USERNAME természetesen az aktív felhasználó neve, és az idézőjel sem

Ezután **helyezzük el a drain-köri ellenállást** (Edit – Resistor 'R'), **két darab feszültséggenerátort** (Component-ek közül kikeresve), egy **földszimbólumot** (gnd), **egy kimeneti pint** (Edit – Label Net, ahol a Port Type Output legyen, a neve pedig out) valahogy a 3. ábrához hasonlóan.

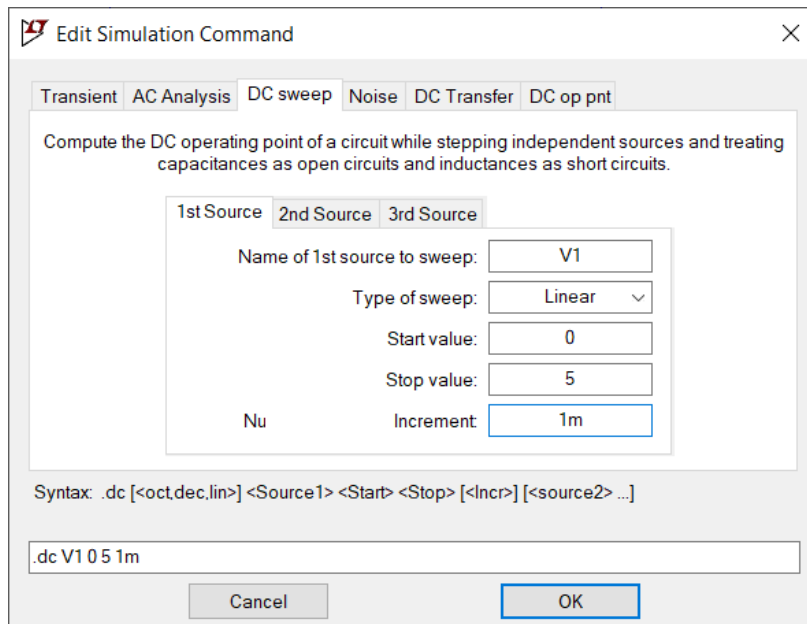


A V1, V2 és R komponenseknek értéket kell adni. Ezt az alkatrésze szimbólumán történő jobb egérgombbal való kattintás után tudjuk megtenni. A tápfeszültség legyen 5V, a bemenő feszültség 0V (ezt úgyis meg fogjuk változtatni később), az ellenállás értéke pedig 25k. Ezzel elkészült a kapcsolási rajz, amit a szimulációk követnek.

1. Feladat – Munkapontmeghatározás DC sweep szimuláció segítségével

Ebben a feladatban a bemenetre kapcsolt forrás DC feszültségét szeretnénk meghatározni. Tervezzünk a maximális kivezérelhetőségre! Ebben az esetben a kimeneti munkaponti feszültség a tápfeszültség fele.

A Simulate – Edit Simulation Cmd parancs segítségével nyissuk meg a szimulációk beállítására alkalmas ablakot, válasszuk a DC sweep fület. Itt adjuk meg, hogy melyik forrást szeretnénk változtatni, milyen módon, milyen határok között és milyen lépésközzel. Állítsuk be úgy, hogy a bemeneti forrás feszültségét teljes tápfeszültségtartományban változtassuk lineárisan, 1mV-os lépésközzel.



5. ábra: A DC sweep szimuláció beállítása

Ha ezekkel megvagyunk, akkor a Simulate – Run paranccsal tudjuk a szimulációt elindítani. Ha valami hiba van, akkor az ezután jelenik meg, ha nincs, akkor a szimuláció lefut, és egy teljesen üres hullámformamegjelenítő ablak jelenik meg a kapcsolásunk fölött. A kapcsolás megfelelő vezetékei kattintva (célszerűen a bemenetre és a kimenetre) megjelenik a bemenet és a kimenet feszültsége.

Ahhoz, hogy a 2,5 V-os kimeneti feszültséghez tartozó bemeneti feszültséget pontosan le tudjuk olvasni alkalmazzuk a beépített kurzort. Ehhez a hullámforma nevére jobb egérgombbal kattintva (V(out)) megjelenik az Expression Editor, ahol be tudjuk állítani, hogy a kurzor az adott görbéhez tartozzon (Attached Cursor: 1st), majd ezt a kurzort a görbén mozgatva behúzható. Ekkor a horizontális érték a keresett bemeneti feszültséggel megegyezik. A pontos érték a felugró ablakban olvasható.

Mekkora ez a feszültség? A forrás feszültségét állítsa be az így kapott értékre. A pontos értékét a DC átviteli függvény képével együtt tegye bele a jegyzőkönyvbe.

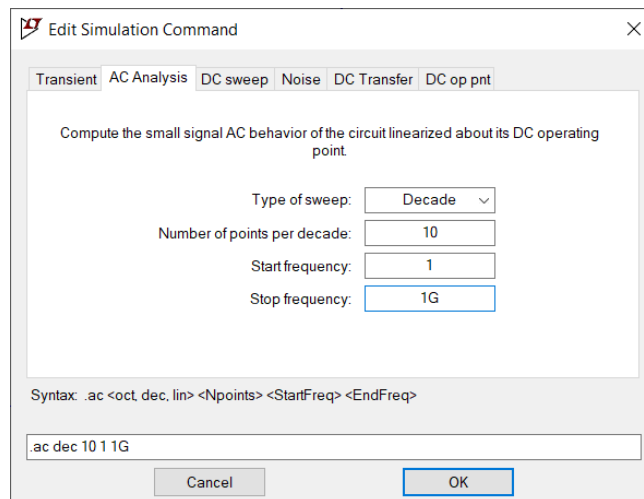
Értelmezhető, jól átlátható, olvasható képernyőképet kérünk az eredményről a jegyzőkönyvbe! Tüntesse fel a meghatározott bemeneti feszültség értékét!

2. Feladat – AC átviteli függvény meghatározása

Az AC szimuláció, vagy másnéven kisjelű analízis célja, hogy meghatározzuk az áramkör átviteli függvényét frekvenciatartományban. A szimuláció eredménye az áramkör átviteli függvényéhez tartozó Bode-diagram. **Töröljük a DC szimulációs direktívát** a kapcsolási rajzról. Első lépésként meg kell határozni, hogy melyik forrás legyen a bemenet. Itt a MOS tranzisztor gate kapcsára kapcsolt forrás lesz a bemenet. Kattintsunk jobb egérgombbal a forrásra, majd ott Advanced, így eljutunk a forrás részletes beállításához. A kisjelű vizsgálathoz a Small signal AC analysis alatt található AC Amplitude értékét állítsuk 1-re (ez lesz a referenciaérték, ami nem azt jelenti, hogy 1 V nagyságú jelet kapcsolunk a bemenetre!)

A Simulate – Edit Simulation Cmd menüpont alatt válasszuk ki az AC Analysis fület, és itt állítsuk be a következő paramétereket:

- 10-es alapú logaritmikus skála
- 10 pont dekádonként
- vizsgálati frekvenciatartomány: 1 Hz- 1 GHz



6. ábra. Az AC szimuláció beállítása

FONTOS! A DC értéket az 1. feladatnál meghatározott feszültségre állítsa be, az AC pedig legyen 1 V!

Ha ez megvan, futtassuk le a szimulációt. Válasszuk ki a kimeneti vezetékét, majd megjelenik az áramkör Bode-diagramja. Kurzor segítségével olvassuk le az erősítést 1 kHz-es frekvencián. (Amennyiben zavaró, hogy egy ábrán látszik az amplitúdó és a fázismenet, akkor hozzunk létre egy új diagramterületet (jobb kattintás, Add plot pane), majd ehhez adjuk hozzá megjeleníteni kívánt hullámot (Add Traces, V(out)), majd a felső grafikon jobb skáláján jobb gombbal kattintva kapcsoljuk ki a fázismenet megjelenítését (Don't plot phase), az alsón pedig az amplitúdómenetet kapcsoljuk ki (Don't plot magnitude)).

A kapott eredmény (Bode-diagram és az erősítés nagysága 1kHz-en) rögzítse a jegyzőkönyvbe! Értelmezhető, jól átlátható, olvasható képernyőképet kérünk az eredményről a jegyzőkönyvbe.

3. Feladat – Időtartománybeli szimuláció

Az áramkör működését vizsgáljuk meg időtartománybeli szimuláció segítségével. Ehhez a **bemenetre kapcsoljunk** egy 1 kHz-es, 1mV-os amplitúdójú **szinuszos jelet**. Ehhez a bemeneti forrás módosítására van szükség. A funkcióknál válasszuk ki, hogy SINE(...), a DC offset értéke legyen a korábban beállított bemeneti munkaponti feszültség, az amplitúdó 1 mV, a frekvencia pedig 1kHz. A többi beviteli mező üresen maradhat. **Töröljük az .ac szimulációs direktívát** az kapcsolási rajzól.

A szimuláció beállításánál a tranziens szimulációt kell választani. Itt meg kell adni a szimuláció hosszát, azt, hogy melyik időpillanattól kezdje meg az adatok mentését és a maximális időlépés nagyságát. Ez utóbbi érték alapvetően befolyásolja a tranziens szimuláció pontosságát és a szimuláció lefutásához szükséges időt. Állítsunk be Stop time értéknek 5ms-ot (5m), a Maximum Timestep pedig 10ns legyen (10n). Futtassuk le a szimulációt! Jelenítsük meg a bemeneti és a kimeneti hullámformát (ezt célszerű két külön grafikonon megtenni, mert a DC szintbeli különbség miatt a szinuszhullám nem látszana. Két kurzor segítségével határozzuk meg az amplitúdót.

A jegyzőkönyvben tüntessük fel a meghatározott amplitúdó értéket, és csatoljuk a tranziens szimuláció eredményét. Értelmezhető, jól átlátható, olvasható képernyőképet kérünk az eredményről a jegyzőkönyvbe.

4. Feladat – Az áramkör optimalizálása

Ha az áramkör működik, a szimulációk hiba nélkül lefutottak, akkor lehetőség nyílik az áramkör optimalizálására. A való életben egymásnak ellentmondó specifikációs pontok között kell egyensúlyozni (sebesség vs. áramfelvétel, pontosság vs. területfoglalás, stb.), miközben számtalan megkötést kell szem előtt tartani. A mostani feladat a következő:

Fő szempont az erősítés növelése

Megkötések:

- 5V tápfeszültség
- Minimális tranzisztorterület: $20 \mu\text{m}^2$
- Maximális tranzisztorterület $1000 \mu\text{m}^2$
- Minimális ellenállásérték 10Ω
- Maximális ellenállásérték $100 \text{ k}\Omega$
- Az áramköri topológia adott (közös source-ú alapkapsolás)

A feladat megoldását könnyítő tippek.

- Emlékezzen vissza a kapsolás erősítését leíró összefüggésre!
- Mitől függ a tranzistor meredeksége?
- Megváltozik-e a munkapont, ha módosítjuk valamelyik áramköri elem valamelyik paraméterét (pl. munkaponti áram).

A megoldásának menetét röviden írja le a jegyzőkönyvben (miért és melyik paraméteren változtatott). Bizonyítsa be, hogy az áramkör működik, ehhez végezze el az első három feladatban bemutatott szimulációkat, és csatolja az eredményeket. Értelmezhető, jól átlátható, olvasható képernyőképet kérünk az eredményről a jegyzőkönyvbe.