

Analóg áramkörtervezés II.

Ring oszcillátor hőmérsékletfüggése

Alkalmazott eszköz: LTspice XVII

Dokumentáció létrehozásának dátuma: 2020. április 6.

Dokumentáció legutolsó módosításának dátuma: 2021. március 15.

Szerző: Dr. Bognár György, Dr. Takács Gábor

A következő laborgyakorlatok 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 alárámkörök számára sincs felső korlát.

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

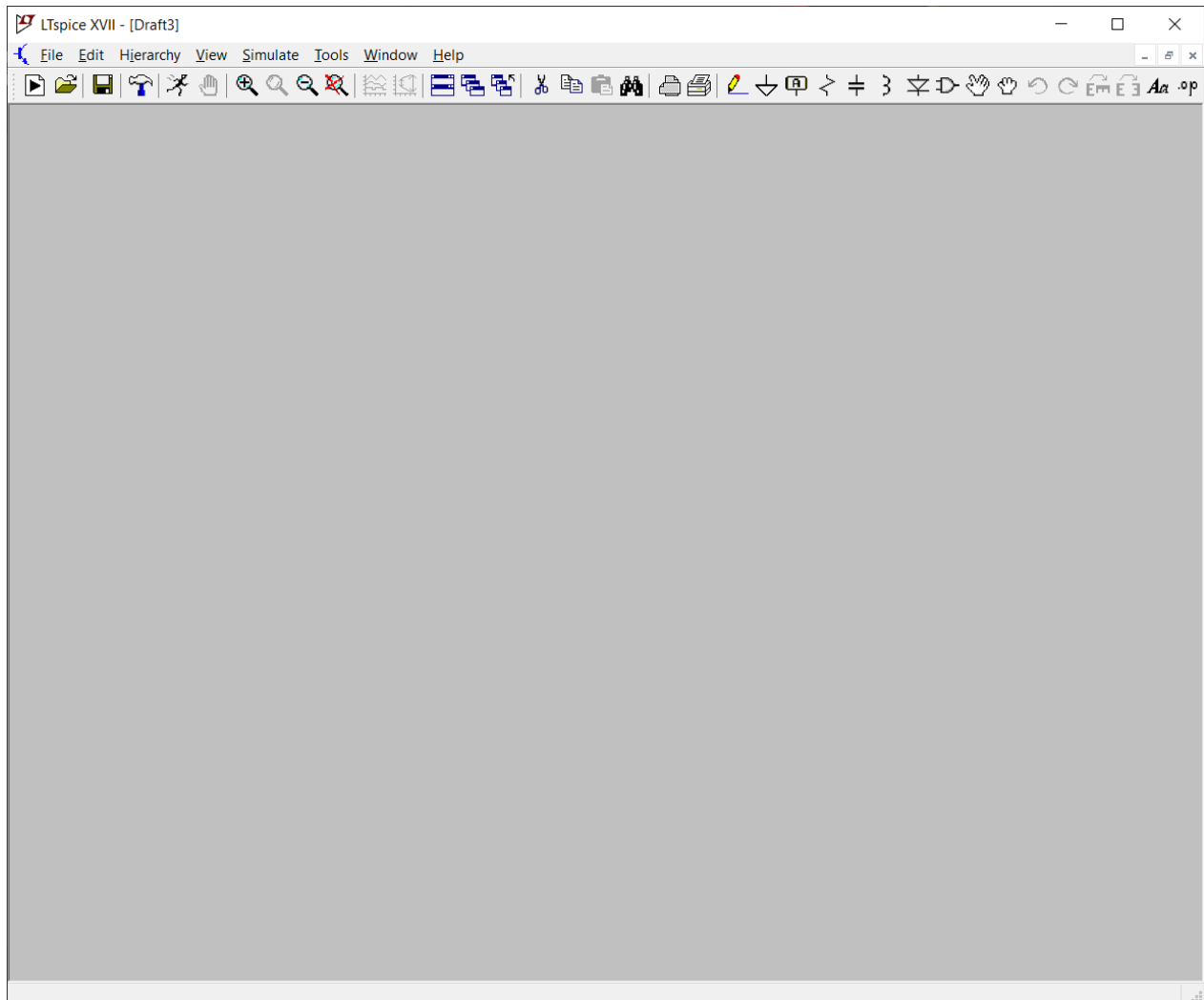
¹ A *C:\Users\USERNAME* értelemszerűen lecserélendő a beállított felhasználói mappa elérésére és/vagy a felhasználó nevére. A *C:\Users* a Windows 10 rendszerek alapértelmezett felhasználói mappákat tartalmazó könyvtára.

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.

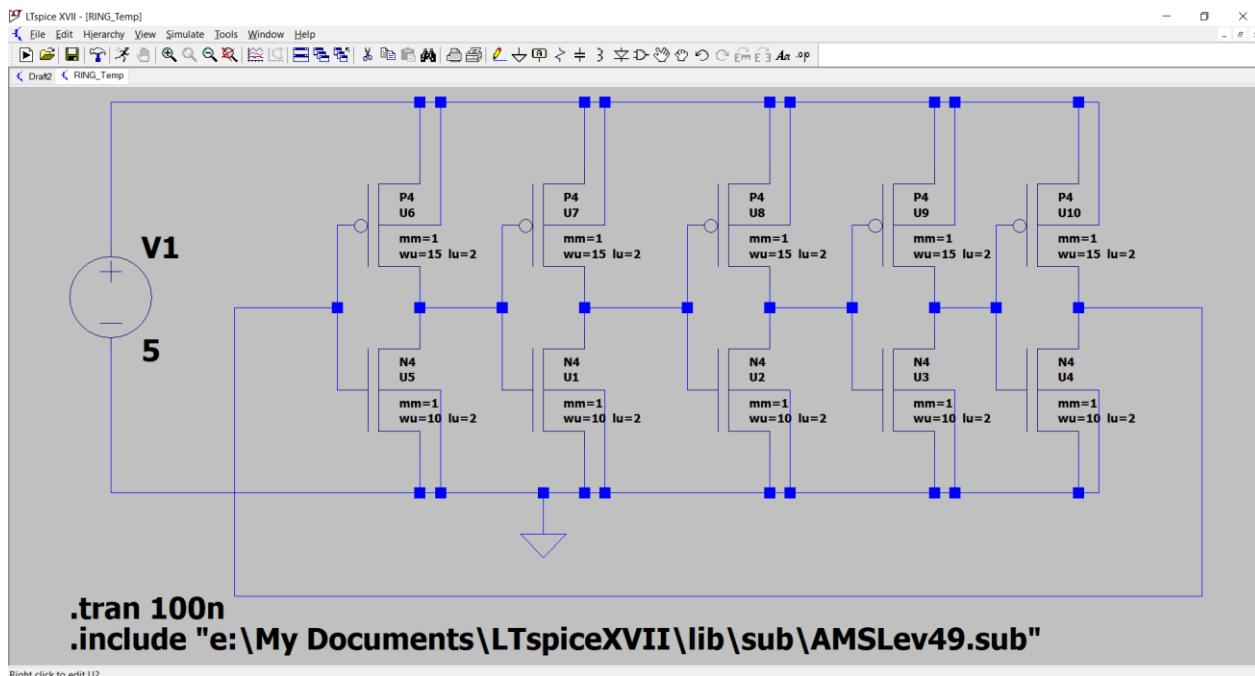
Indítsuk el az áramkörtervező szoftvert az asztalon, vagy a start menüben található ikon segítségével (elérési út: "C:\Program Files\LTC\LTspiceXVII\XVIIx64.exe" – 64 bites telepítő készlet esetén).

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



1. ábra - Az LTspice kapcsolási rajz szerkesztő ablaka

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).



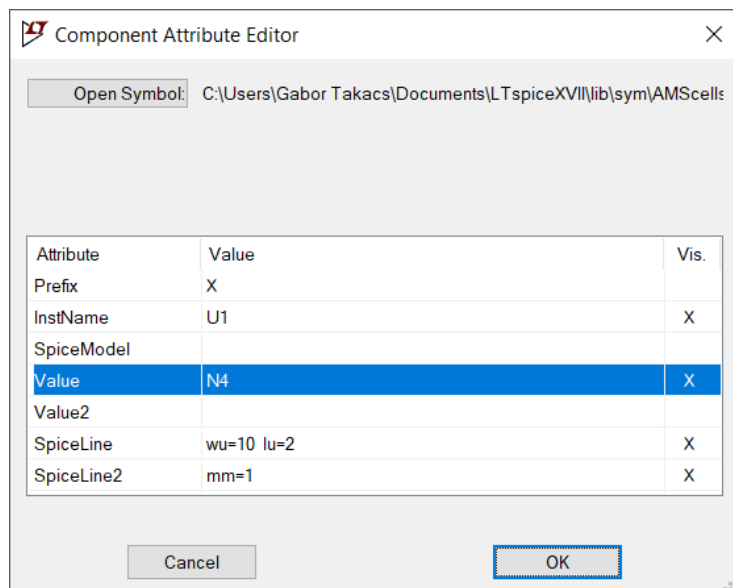
2. ábra – A RING oszcillátor kapcsolási rajza

Rajzoljunk meg az **öt fokozatú RING oszcillátor kapcsolást!** (2. ábra) A mostani laboratóriumi gyakorlatban a p-MOS és n-MOS tranzisztorok **W** és **L** értékeit hagyjuk az **alapbeállításon** (default értéken, (15u/2u és 10u/2u) változatlanul!

A tápfeszültséget állítsuk be 5V értékre és ne felejtsük el a kimenetet visszakötni a bemenetre!

Kezdjük a tranzisztorokkal! Az Edit – Component 'F2' parancs után megnyílik a Select Component Symbol ablak. Az alapértelmezett mappából (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. Erre 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 a 2. ábrának megfelelően.

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




3. 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!** Kiklikeljünk 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 kell. Ha valami oknál fogva (pl. ékezetes karakter található az elérési útban) nem találja az LTspice a *sub* file-t, akkor nemes egyszerűséggel másoljuk azt valamelyik meghajtó gyökérkönyvtárába, és adjuk meg ezt az egyszerű elérési utat a szimulátornak.

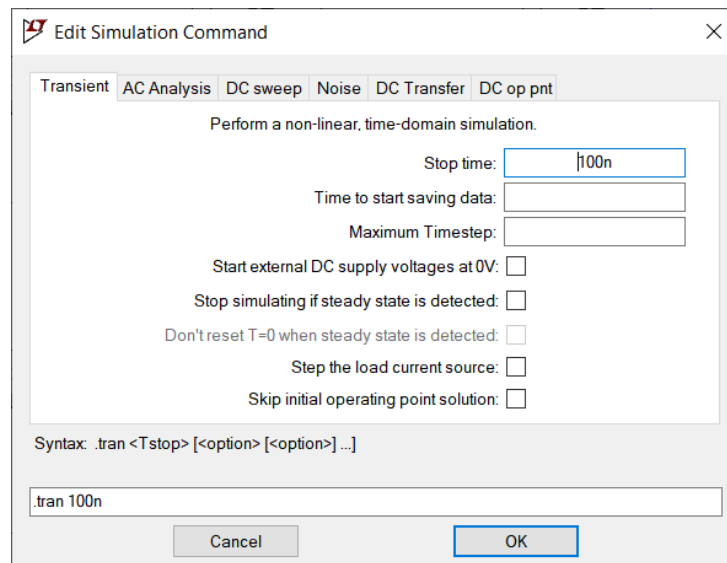
Ezután helyezzük el a többi tranzisztort, az egy darab feszültséggenerátort a tápfeszültség beállításához (Component-ek közül kikeresve) és egy földpotenciál szimbólumot (gnd)  2. ábrához hasonlóan!

Ezután következik a vezetékezés, amelyet F3 segítségével érhetünk el (vagy pedig Edit – Draw Wire).

A V1 táp-feszültséggenerátornak ne felejtünk el értéket adni! Ezt az alkatrészen történő jobb egérgombbal való kattintás után tudjuk megtenni. A tápfeszültség legyen 5V. Ezzel elkészült a kapcsolási rajz, amit a szimulációk követnek.

1. Feladat – Időtartománybeli szimuláció

Az áramkör működését időtartománybeli szimuláció segítségével fogjuk megvizsgálni. A szimuláció eredményeként előálló hullámformákon (waveform) le tudjuk olvasni a periódusidőt, amiből az áramkör működési frekvenciáját tudjuk meghatározni. Különböző hőmérsékleteken eltérő működési, oszcillálási frekvenciát fogunk kapni.



4. ábra – Tranziens szimuláció beállítása

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 **100 ns** értéket!

Futtassuk le a szimulációt! Jelenítsük meg a kimeneti hullámformát! Két kurzor segítségével határozzuk meg az amplitúdót Ehhez a kimeneti hullámforma nevén jobb gombbal kattintva az Expression Editorban tudunk két kurzort definiálni (Attached Cursor: 1st&2nd). A kurzorokat egy periódus két végpontjára mozgatva a kis ablakban le tudjuk olvasni a két kurzor időkülönbségét, illetve az ebből számított frekvenciát.

A jegyzőkönyvben tüntessük fel ezt az értéket, és csatoljuk hozzá a tranziens szimuláció eredményét! Értelmezhető, jól átlátható, olvasható képernyőképet kérünk az eredményről!

FONTOS! A frekvenciát a teljes periódusidőből számítsák, tehát a teljes periódusidőre mérjék a hullámformán!

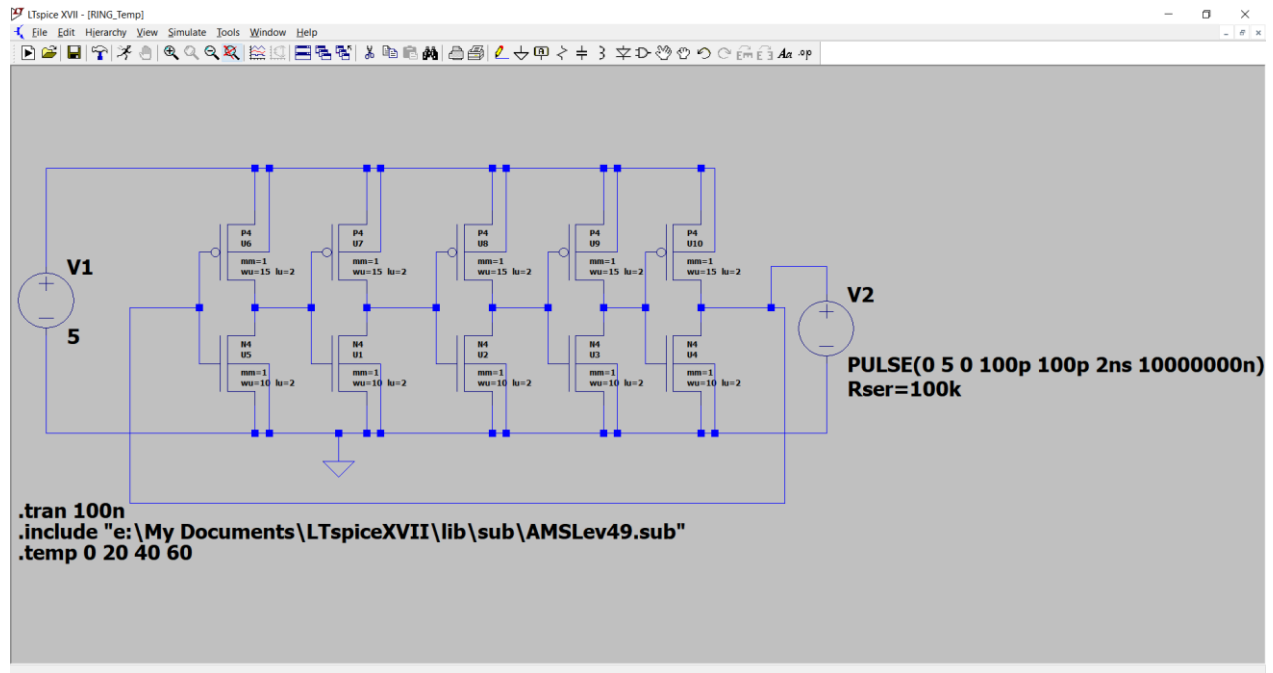
A tranziens szimulációs eredményen megfigyelhetjük, hogy az oszcilláció csak pár 10 ns idő elteltével indul be! Ennek az elindulási késleltetésnek a rövidítésére a következő fejezetben mutatunk egy módszert.

2. Feladat – Az áramkör működésének vizsgálata különböző hőmérsékleteken

Ha a tranziens szimuláció sikeresen lefutott, akkor ismételjük meg ezt a szimulációt, de **különböző hőmérsékleten**! Ehhez nyomjuk meg az S billentyűt (vagy Edit / SPICE directive menüpont) és írjuk be az alábbi direktívát:

```
.temp 0 20 40 60 80
```

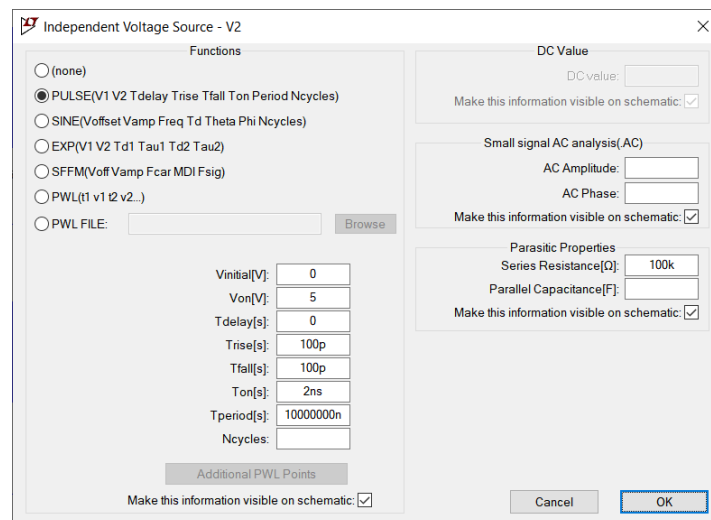
Ennek hatására a tranziens szimuláció egymás után le fog futni 0°C, 20°C, 40°C, 60°C és 80°C hőmérsékleteken.



5. ábra – Pulzusgenerátorral kiegészített áramkör

Az oszcilláció gyorsabb beindítása céljából (ne legyen több 10 ns késleltetés) **egészítsük ki a kapcsolást egy újabb feszültséggenerátorral** és konfiguráljuk fel a képen látható módon. Pulzusgenerátorként használjuk, ami 5V amplitúdójú, **2 ns széles impulzust** bocsát ki és **a periódusideje jó sok!** (többszöröse a tranziens szimulációnk hosszának)!

FONTOS! A pulzusgenerátor kimenő impedanciája legyen legalább 100 kΩ nagyságú!



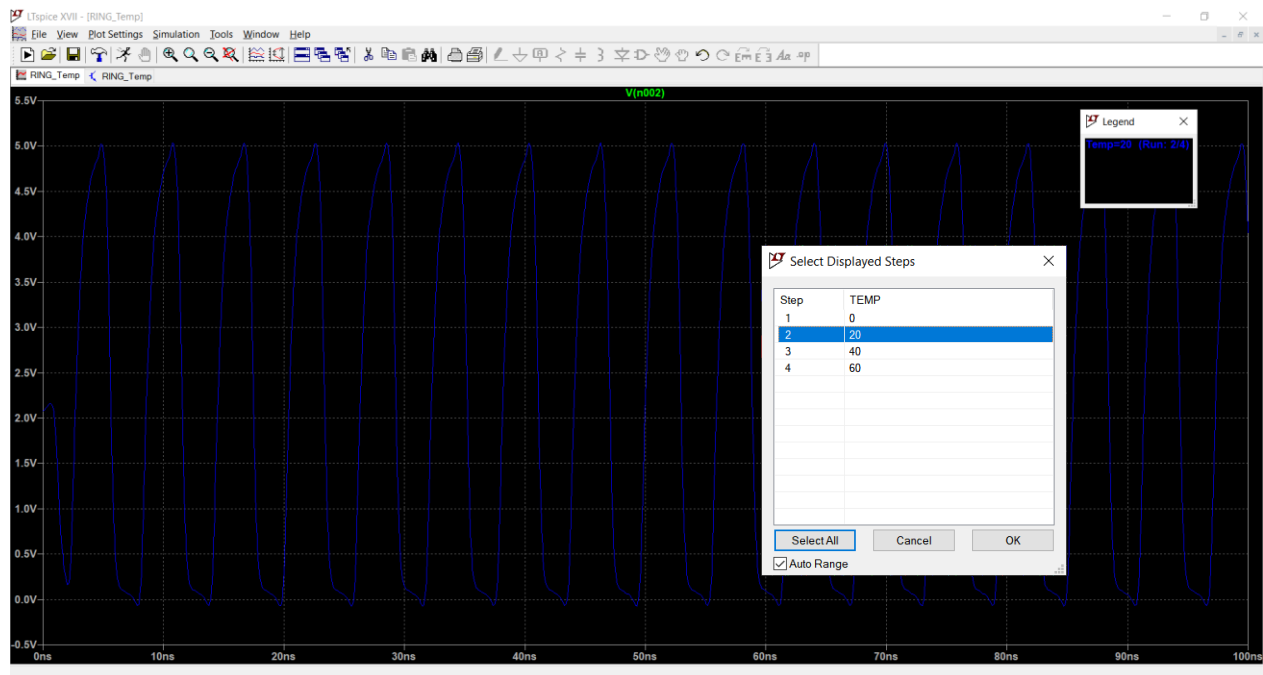
6. ábra – Pulzusgenerátor beállítása

A szimuláció sikeres lefuttatása után, válasszuk ki a ring oszcillátor visszacsatoló ágát és jelenítsük meg a hullámformákat. A megjelenő ablakban egymásra lapolva láthatjuk a különböző hőmérsékletekhez tartozó hullámformákat. Ha azt látjuk, hogy ezek nem fedik egymást, akkor valóban megváltozott a hőmérsékletváltozás hatására az oszcillációs frekvencia. Ahhoz, hogy le tudjuk olvasni egyesével a különböző hőmérsékleteken a pontos periódusidőt egyesével jelenítsük meg a hullámformákat.

Ehhez kattintunk jobb gombbal a hullámformákat ábrázoló ablakban, válasszuk ki View / Select Steps menüpontot és itt tudjuk kiválasztani egyesével, hogy melyik hőmérsékletre tartozó tranzienst szeretnénk látni. Ekkor már könnyedén le tudjuk olvasni a periódusidőt és meg tudjuk határozni az oszcillációs frekvenciát.

Jegyezzük fel az értékeket! Egyesével ismételjük meg ezt a lépést minden hőmérsékleten! TIPP: be lehet kapcsolni a jelmagyarázatot a jobb klikk, View / Step Legend menüponttal.

Értelmezhető, jól átlátható, olvasható képernyőképeket kérünk az eredményekről és minden hőmérsékletre jegyezze fel a „mért” periódusidőket táblázatos formában! Tapasztalatok leírását is kérjük a jegyzőkönyvbe max. 4 sorban!



7. ábra – Különböző hőmérsékletre tartozó hullámformák kiválasztása

A szimulációink fő célja, hogy meghatározzuk, hogy növekvő hőmérséklettel a küszöbfeszültség hőmérséklet függése (növekvő áram, növekvő oszcillációs frekvencia) vagy a töltéshordozó-mozgékonyság hőmérsékletfüggése (csökkenő áram, csökkenő oszcillációs frekvencia) lesz e a domináns!

A jegyzőkönyv végén írja le, hogy milyen következtetésre jutott adott AMS 0.35 μm technológián! Melyik jelenség lesz a domináns, ami meghatározza a hőmérséklet növekedése esetén a működési frekvencia változását!

3. Feladat – Az oszcillációs frekvencia növelése

Tegyen **több** javaslatot és kísérletet az oszcillációs frekvencia növelésére! Legalább egy megoldási javaslatot szimulációkkal is bizonyítson!

FONTOS! A környezeti hőmérséklet csökkentése nem kivitelezhető megoldás! Gondoljon bele, hogy kereskedelmi forgalomban lévő eszközök (pl.: mobiltelefon, notebook, stb.) esetén **NEM** valósítható meg az extrém hűtés (pl: 0°C alá vagy 10K, stb.)!

A jegyzőkönyvben tüntesse fel a javaslatait, majd a maximális elért működési frekvencia értékét, és csatolja hozzá a tranziens szimuláció eredményét! Értelmezhető, jól átlátható, olvasható képernyőképet kérünk az eredményről!