

Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija

Predmet: Računalom podržano projektiranje elektroničkih uređaja

UPUTE ZA 3. LABORATORIJSKU VJEŽBU

Zadatak: U okviru 3. laboratorijske vježbe studenti će se upoznati s alatima za mješovitu simulaciju električnih mreža (SPICE) ugrađenima u programski paket Altium Designer.

Uvod u SPICE analizu

SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) je simulator analognih električnih mreža opće namjene razvijen 1960. godine u laboratoriju Electronics Research Laboratory of the University of California, Berkeley. SPICE simulator dostupan je u različitim inačicama i proširenjima funkcionalnosti izvornog programskog paketa, od čega je najbitnije istaknuti sljedeće:

- SPICE3 – trenutna inačica SPICE simulatora (verzija SPICE3f5 ugrađena je u programski paket Altium Designer),
- XSPICE – proširenje osnovne funkcionalnosti SPICE3 simulatora koje omogućava analizu mreža s mješovitim signalima (uvođenje tzv. *event-driven* programske arhitekture) (razvijen na Georgia Institute of Technology).

Standardne SPICE komponente mogu se podijeliti u sljedeće osnovne skupine:

- pasivne komponente (otpori, kapaciteti, induktiviteti, međuinduktiviteti),
- diskretne poluvodičke komponente (diode, tranzistori (BJT, JFET, MESFET, MOSFET)),
- električne prijenosne linije (*transmission lines*),
- strujni i naponski izvori,
- početni uvjeti,
- itd.

Primjeri nekih najčešće korištenih XSPICE komponenti:

- mjerači kapaciteta i induktiviteta, limiteri, zbrajala množila, TTL/CMOS logičke komponente i sl.

Definicije SPICE simulacijskih modela u Altium Designer programskoj okolini opisuju se *.mdl i *.ckt datotekama, koje su najčešće uključene u integrirane biblioteke *.IntLib.

SPICE simulacija omogućava sljedeće **osnovne** tipove analize:

- *Operating Point Analysis*,
- *Transient Analysis*,
- *Fourier Analysis*,
- *DC Sweep Analysis*,
- *AC Small Signal Analysis*,
- *Impedance Plot Analysis*,
- *Noise Analysis*,
- *Pole-Zero Analysis*,
- *Transfer Function Analysis*.

Kratki opis osnovnih tipova SPICE analize:

Operating Point (OP) Analysis:

- proračun DC radne točke sklopa (pretpostavka: svi induktiviteti su kratko spojeni, svi kondenzatori su odspojeni). Automatski se provodi prije tranzijentne, AC *Small Signal* i analize šuma (radi određivanja početnih uvjeta i/ili linearizacije radne točke u režimu malog signala).

Transient Analysis:

- određivanje vremenskog odziva napona i struja na promatranim mjestima u sklopu ("osciloskopski" prikaz vremenskog odziva signala).

Fourier Analysis:

- spektralna analiza vremenskog odziva napona i struja; izvodi se na temelju rezultata tranzijentne analize sklopa (koristi rezultate zadnjeg dijela vremenskog prozora koji odgovara odabranoj fundamentalnoj frekvenciji za spektralnu analizu).

DC Sweep Analysis:

- određivanje istosmjerne prijenosne karakteristike sklopa; radi se zapravo o slijednoj OP analizi, koja se ponavlja više puta u predefiniranom broju točaka uz promatranje odziva odabrane izlazne veličine sklopa.

AC Small Signal Analysis:

- određivanje frekvencijske karakteristike sklopa u režimu malog signala (Bodeov dijagram); linearizacija sklopa provodi se oko točke određene OP analizom.

Impedance Plot Analysis:

- prikaz impedancije koja se vidi s ulaznih priključnica sklopa; može se provesti kao dio AC analize u režimu malog signala (post-procesiranjem rezultata AC analize).

Noise Analysis:

- određivanje utjecaja šuma otpornika i poluvodičkih komponenti na rad sklopa (prikaz spektra snage šuma [V^2/Hz]); kondenzatori, induktiviteti i zavisni izvori smatraju se komponentama sklopa koje ne utječu na razinu šuma.

Pole-Zero Analysis:

- koristi se kod analize stabilnosti sklopa; provodi se na temelju OP i AC analize.

Transfer Function Analysis:

- proračun ulaznog i izlaznog otpora te naponskog pojačanja (za istosmjerne prilike).

SPICE omogućava i **složene** analize utjecaja varijacija parametara sklopa ili uvjeta pod kojima radi sklop:

- *Monte Carlo Analysis*,
- *Parameter Sweep*,
- *Temperature Sweep*.

Kod složenih tipova analize provodi se višestruko jedna ili više osnovnih analiza prema zadanim varijacijama kako bi se uočili različiti trendovi ponašanja sklopa prilikom promjene nekih njegovih parametara ili radnih uvjeta.

Kratki opis složenih tipova SPICE analize:

Monte Carlo Analysis:

- višestruka SPICE simulacija sklopa uz *slučajno* variranje vrijednosti komponenti sklopa unutar zadanih tolerancija.

Parameter Sweep Analysis:

- višestruka SPICE simulacija sklopa uz *determinističko* variranje vrijednosti komponenti u predefiniranom rasponu vrijednosti prema zadanim koracima promjene; moguće je varirati *primarni* i *sekundarni* parametar sklopa.

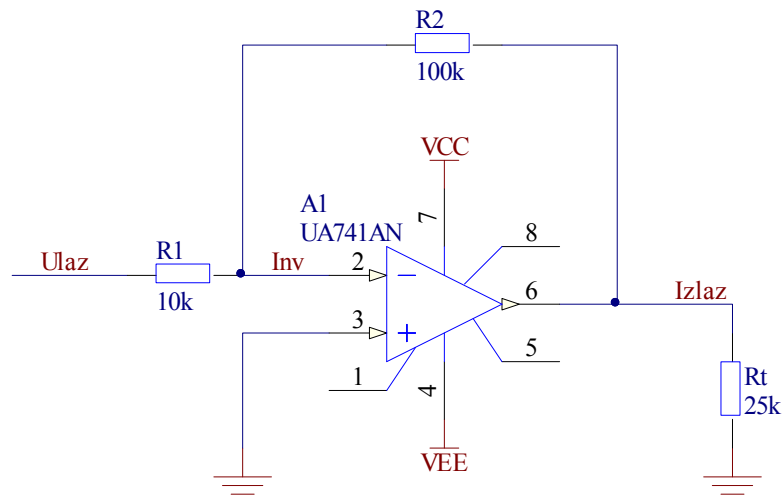
Temperature Sweep Analysis:

- višestruka SPICE simulacija sklopa uz variranje radne temperature sklopa kao parametra.

Upute za izradu 3. laboratorijske vježbe

Podršavanje radne okoline za provedbu SPICE simulacije

1. Otvoriti novi projekt *Pojacalo.PcbPrj*
2. Nacrtati električnu shemu prema slici i pohraniti je u projekt pod nazivom *Analogno pojacalo.SchDoc*.



Slika 1: Električna shema 1. zadatka

Električna shema prikazuje operacijsko pojačalo u invertirajućem spoju, s podešenim iznosom pojačanja 10 puta. Prilikom crtanja otpornika iznosi otpora obavezno se moraju navesti u polju **Value**. Radi preglednosti sheme, preporuča se u polje *Comment* otpornika upisati vrijednost „=Value“ (napomena s 1. laboratorijskih vježbi).

3. Zadavanje SPICE modela operacijskog pojačala UA741:
 - klikom na *Search* gumb u *Libraries panelu* pojavljuje se *Libraries Search* dijalog. Za traženje svih simulacijskih modela dostupnih u korištenim bibliotekama potrebno je upisati:

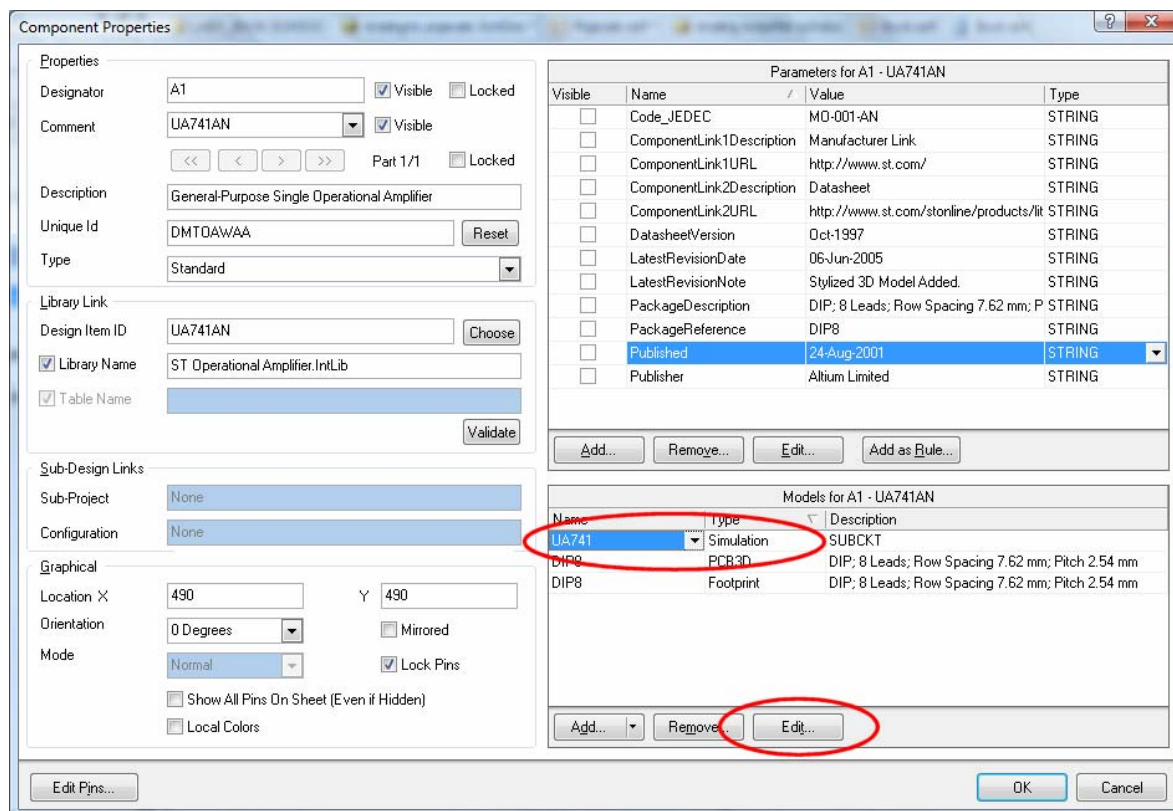
```
HasModel('SIM','*',False)
```

i zatim kliknuti na *Search*. Ako se traži model točno određene komponente, npr. operacijskog pojačala UA741, to se može učiniti na sljedeći način:

```
HasModel('SIM','*UA741*',False)
```

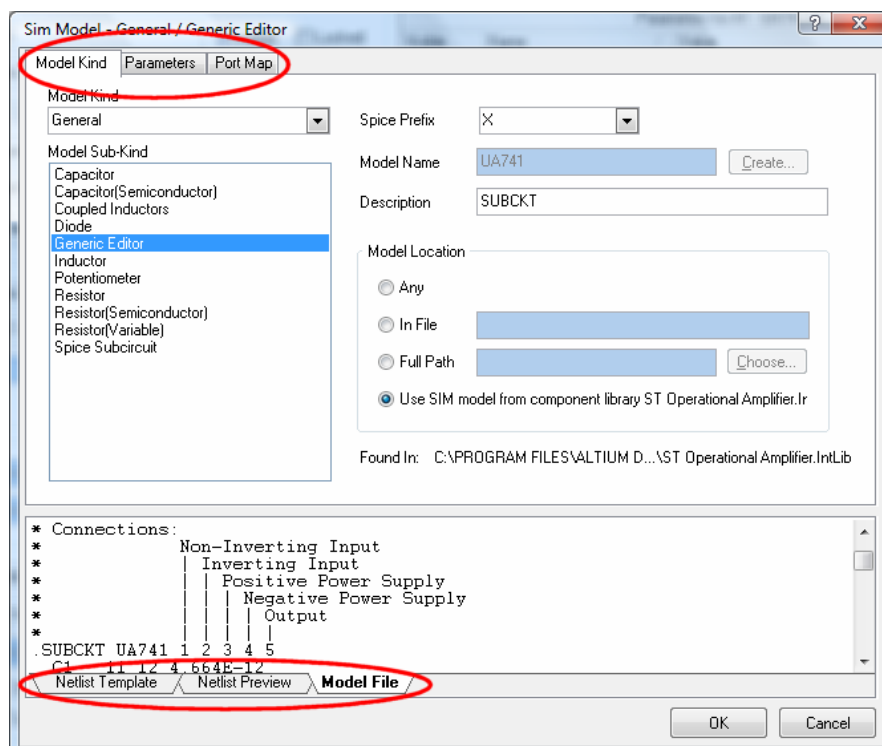
Nakon što je traženi model pronađen, postaviti komponentu na shemu i instalirati biblioteku u kojoj se nalazi.

- kliknuti na *Component properties* (desni klik ili dvostruki klik na komponentu), označiti simulacijski model, zatim kliknuti *Edit*:



Slika 2: Uređivanje SPICE modela u dijalogu svojstava komponente

- otvara se prozor *Sim Model*; pod *Model Location* zadaje se korišteni simulacijski model; parametri učitano simulacijskog modela komponente se mogu vidjeti pritiskom na *Netlist Template*, *Netlist Preview* i *Model File*:



Slika 3: Zadavanje SPICE modela

Netlist Template predstavlja predložak za spojnu listu simulacije i opisuje parametre koji se vide otvaranjem *Netlist Preview*:

Netlist Template: @DESIGNATOR %1 %2 %3 %4 %5 @MODEL

Netlist Preview: XA1 GND INV VCC VEE IZLAZ UA741

Prvi parametar spojne liste (@DESIGNATOR) čine *Spice Prefix* zadan u *Sim Model* prozoru (X) i *Designator* komponente na električnoj shemi (A1 u ovom primjeru). Sljedeći parametri su ulazni i izlazni priključci (u ovom slučaju ima ih 5), a zadnji parametar (@MODEL) predstavlja ime modela korištenog za simulaciju komponente (*Model Name* UA741).

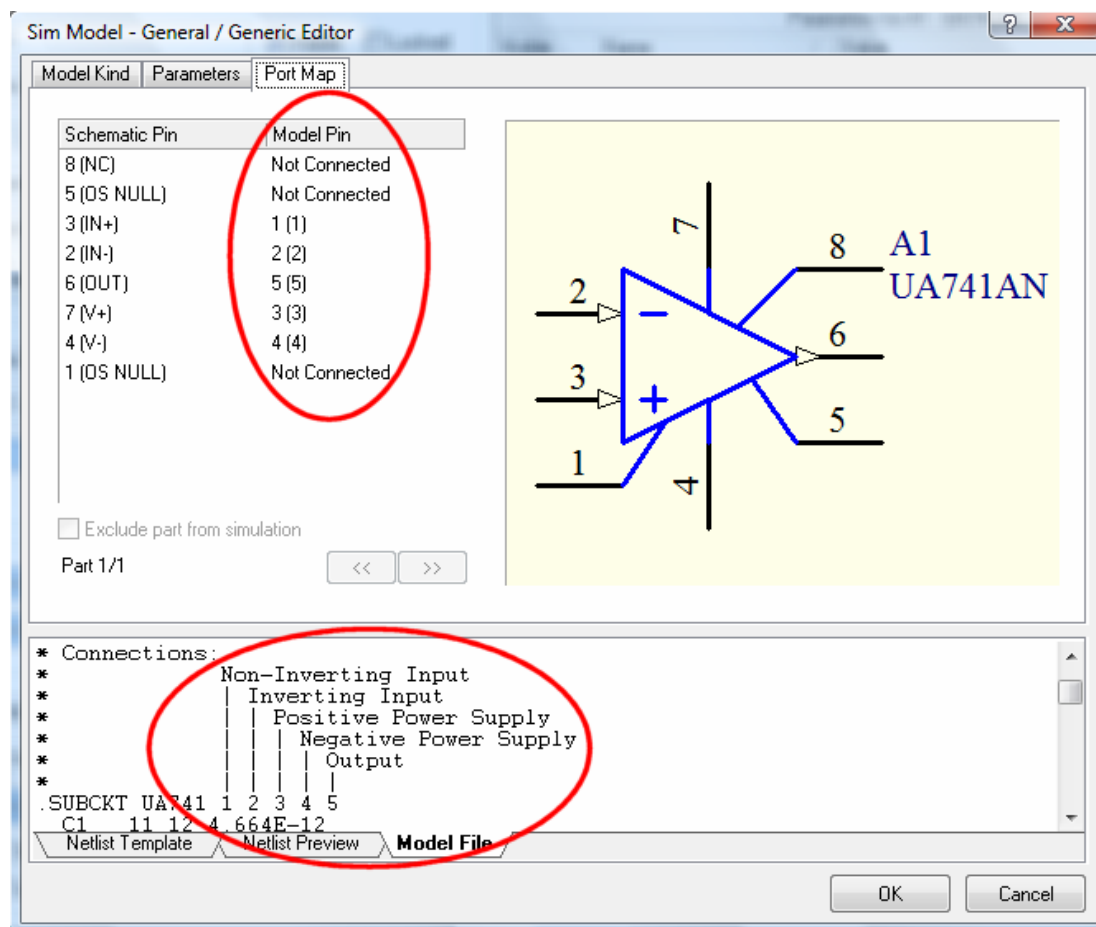
Model File definira iznose svih parametara koji opisuju realno ponašanje sklopa, npr.:

```
*=====
*uA741
*Sngl GenPurpose OpAmp pkg:DIP8 3,2,7,4,6. pkg:CAN8 3,2,7,4,6.
* Connections:
*           Non-Inverting Input
*           | Inverting Input
*           | | Positive Power Supply
*           | | | Negative Power Supply
*           | | | | Output
*           | | | |
*           | | | |
.SUBCKT UA741 1 2 3 4 5
C1 11 12 4.664E-12
C2 6 7 20E-12
DC 5 53 DX
DE 54 5 DX
DLP 90 91 DX
DLN 92 90 DX
DP 4 3 DX
BGND 99 0 V=V(3)*.5 + V(4)*.5
BB 7 99 I=I(VB)*10.61E6 - I(VC)*10E6 + I(VE)*10E6 +
+ I(VLP)*10E6 - I(VLN)*10E6
GA 6 0 11 12 137.7E-6
GCM 0 6 10 99 2.574E-9
IEE 10 4 DC 10.16E-6
HLIM 90 0 VLIM 1K
Q1 11 2 13 QX
Q2 12 1 14 QX
R2 6 9 100E3
RC1 3 11 7.957E3
RC2 3 12 7.957E3
RE1 13 10 2.74E3
RE2 14 10 2.74E3
REE 10 99 19.69E6
RO1 8 5 150
RO2 7 99 150
RP 3 4 18.11E3
VB 9 0 DC 0
VC 3 53 DC 2.6
VE 54 4 DC 2.6
VLIM 7 8 DC 0
VLP 91 0 DC 25
VLN 0 92 DC 25
.MODEL DX D(IS=800E-18)
.MODEL QX NPN(IS=800E-18 BF=62.5)
.ENDS UA741

* Origin: Mcemods2.lib
```

Raspored priključaka (*pinout*) SPICE modela mora odgovarati rasporedu priključaka komponente na električnoj shemi, jer u suprotnom rezultati simulacije neće biti ispravni. Pritiskom na tab *Port pin* otvara se prospojna tablica, kao na sljedećoj slici.

U prvom stupcu su navedeni priključci komponente na električnoj shemi, a u drugom stupcu priključci u modelu.

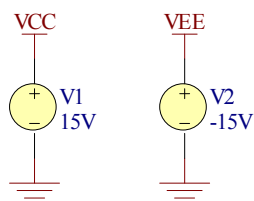


Slika 4: Podešavanje rasporeda priključaka komponente za SPICE simulacije

4. Simulacijski model otpornika potrebno je provjeriti u skladu s prethodnom točkom.
5. Na shemu je potrebno još dodati izvore napajanja pojačala i zadati iznose napona potrebne za rad sklopa prilikom simulacije. Izvori za simulaciju se nalaze u biblioteci *Simulation Sources.IntLib*, koju je potrebno uključiti u projekt. Sve komponente koje se nalaze u navedenoj biblioteci spremne su za SPICE simulaciju, nemaju definiran *footprint* i ne postavljaju se na pločicu (provjerite!). Izvori na shemu se mogu dodavati i izravno iz trake s alatima *Utilities* pod *Simulation Sources*, kao što je prikazano na slici:

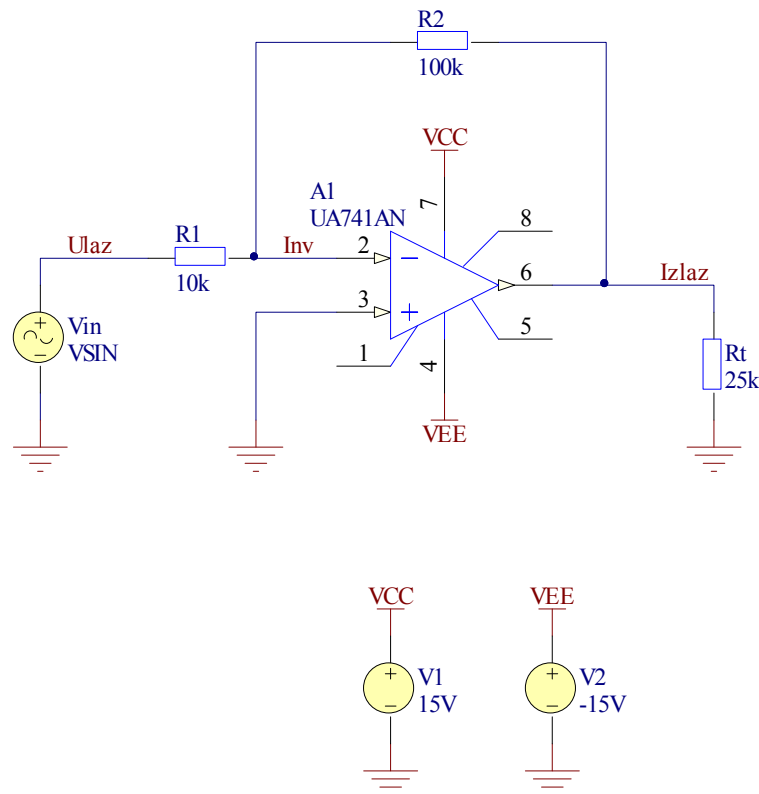


Postaviti napon napajanja VCC na +15 V, a napon VEE na -15 V (ovi iznosi upisuju se u parametar **Value** da bi ih simulator mogao pročitati!).



Za prvu simulaciju na ulaz sklopa potrebno je dovesti sinusni napon amplitude 0,1 V i frekvencije 10 kHz.

6. *Net label*e na električnoj shemi služe kao ispitne točke simulacije za koje se mogu pratiti napon, struja i snaga. Potrebne *net label*e na shemi su **Ulaz**, **Int** i **Izlaz**.
7. Kompajlirati projekt.
8. Cjelokupna električna shema za prvu simulaciju trebala bi izgledati kao na sljedećoj slici:



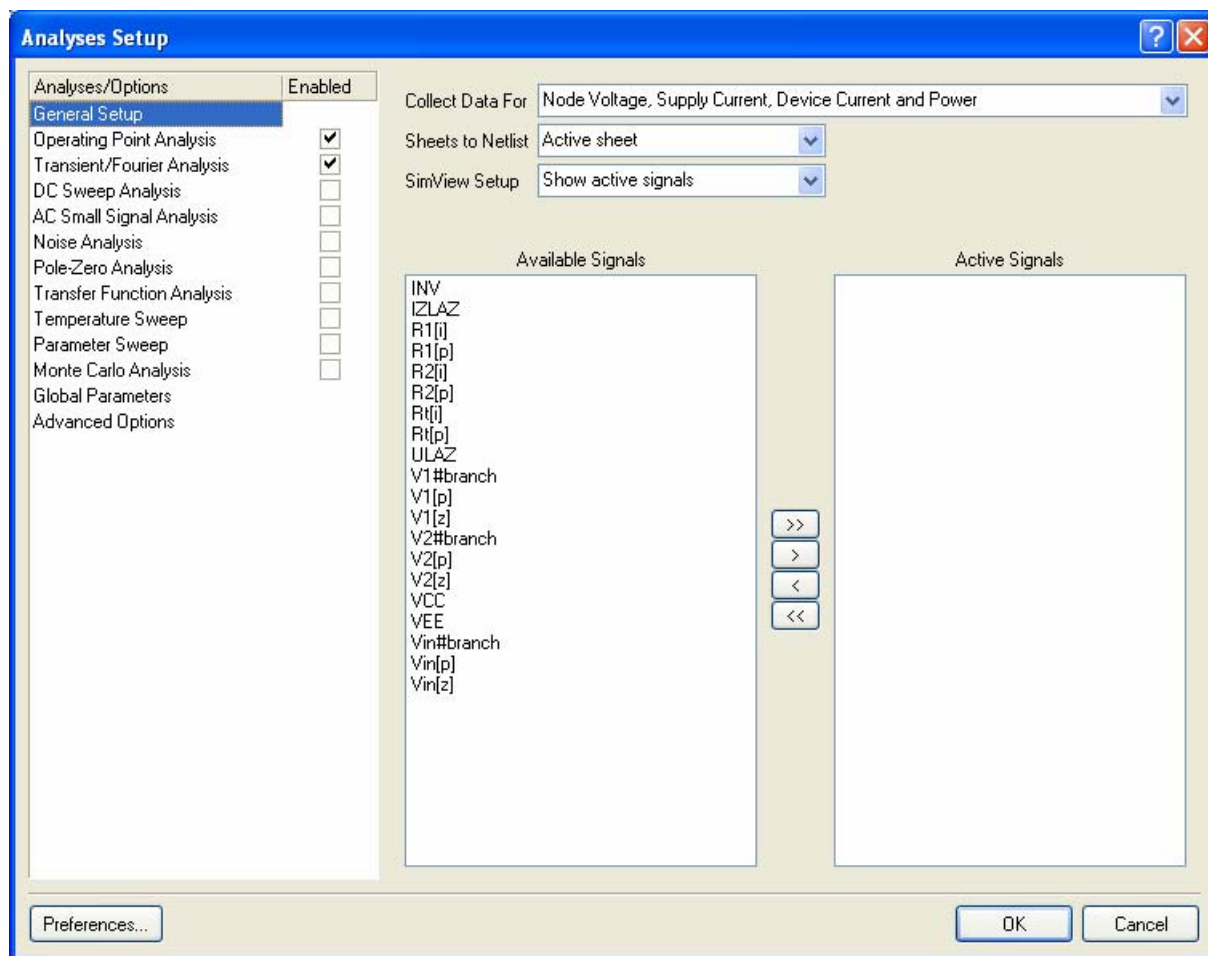
Slika 5: Cjelokupna električna shema 1. zadatka

Analiza rada sklopa SPICE simulacijom

Postavke SPICE analize otvaraju se pritiskom na ikonu *Setup Mixed-Signal Simulation* u *Mixed Sim* traci s alatima kao na slici (ako nije vidljiva, preporuča se dodati ju naredbom *View » Toolbars » Mixed Sim*) ili *Design » Simulate » Mixed Sim*.



Otvora se prozor *Analyses Setup* u kojem se odabire koji se tipovi simulacije provode i postavljaju svi parametri simulacija (vidi sliku 7).

Slika 6: Opis sučelja *General Setup*

Na početku se otvara opcija *General Setup*, koja služi za određivanje postavki zajedničkih svim tipovima analize koje će se provesti u okviru simulacije rada sklopa. Potrebno je napraviti sljedeće:

- u padajućem izborniku *Collect Data For* odabrati *Node Voltage, Supply Current, Device Current and Power*. Time je određeno da će se u simulaciji izračunati napon svakog čvora označenog *net labelom*, struja svakog napajanja te struja i snaga svake komponente,
- u izborniku *Sheets to Netlist* odabrati *Active sheet* (ne *Active project!*), jer želimo pratiti tijekom simulacije samo jedne sheme, a ne svih shema uključenih u projekt (na taj se način omogućava da se u istom projektu simulira više električnih shema koje se promatraju razdvojeno),
- postaviti *SimView Setup* na *Show Active Signals*. Time će se po završetku simulacije prikazati valni oblici svih signala s liste *Active Signal*. Opcija *Keep last setup* omogućava pamćenje postavki prikaza valnih oblika signala iz prethodne simulacije.
- U polju *Available Signals* prikazani su signali dabrani opcijom *Collect Data For*. U ovom slučaju raspoloživi su sljedeći signali:
 - naponi čvorova: INV, IZLAZ, ULAZ, VCC, VEE,
 - struje napajanja: V1#branch, V2#branch, Vin#branch,
 - snage i impedancije izvora: V1[p], V2[p], Vin[p]; V1[z], V2[z], Vin[z],
 - struje i snage komponentata (R1[i], R2[i], Rt[i]; R1[p], R2[p], Rt[p]).

Dvostrukim klikom ili označavanjem željenog signala pa pritiskom tipke „>“ odabiru se signali čije valne oblike želimo pratiti i prebacuju se u polje *Active Signals*. U ovom slučaju želimo promatrati signale *Ulaz*, *Int* i *Izlaz*. Po završetku simulacije valni oblici odabranih signala prikazuju se u prozoru *Waveform Analysis*.

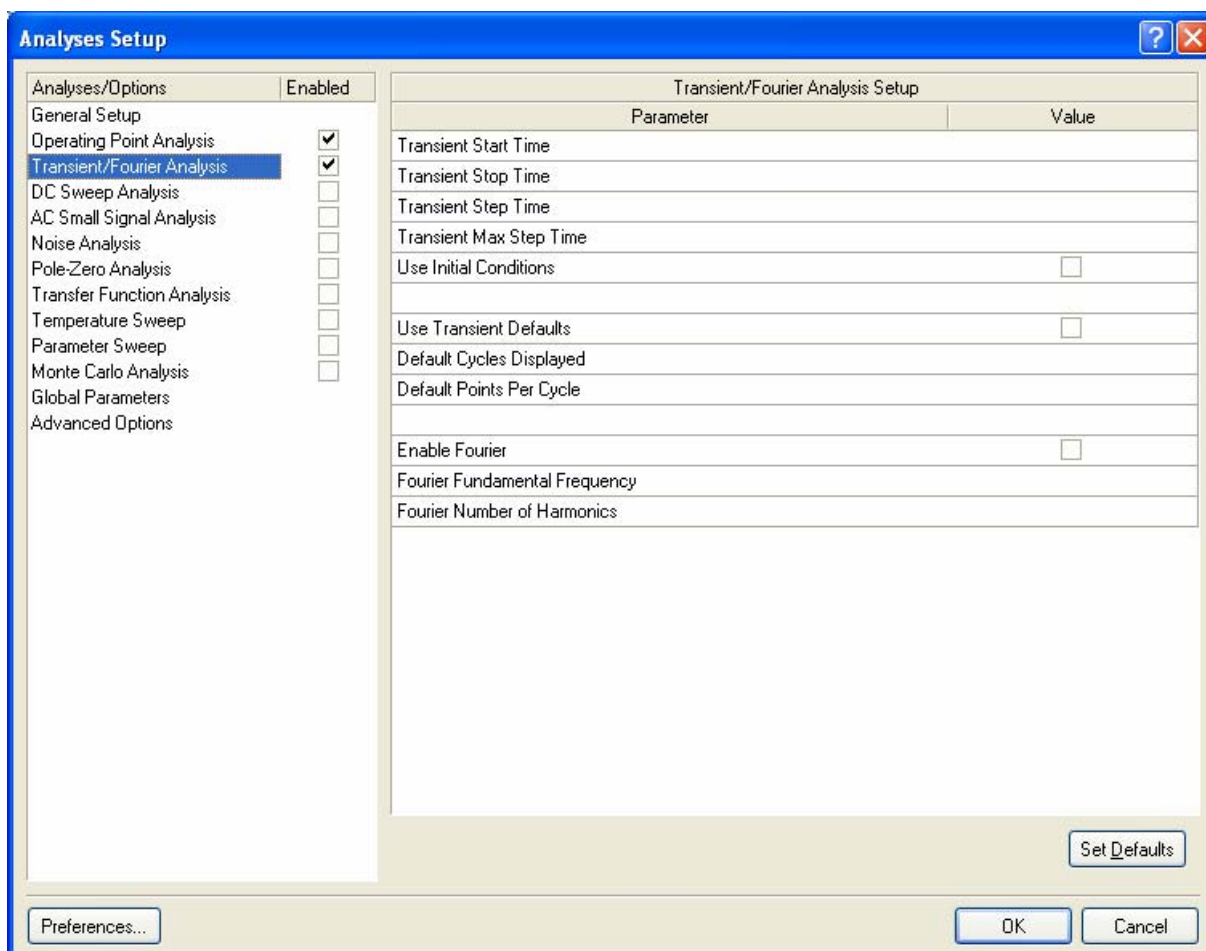
DC, tranzijentna i Fourierova analiza

Zadatak: Omogućiti sljedeće tipove analiza:

- proračun DC radne točke sklopa (*Operating Point Analysis*),
- tranzijentnu i Fourierovu analizu (*Transient/Fourier Analysis*).

Parametri svakog pojedinog tipa analize mogu se podešavati na posebnoj stranici, koja se otvara klikom na ime analize u prozoru *Analyses Setup*.

Zadatak: Potrebno je namjestiti trajanje tranzijentne analize tako da se prikažu 4 periode takta ulaznog signala frekvencije 10 kHz s frekvencijom uzorkovanja od 500 kHz. Izračunate vrijednosti upisati u odgovarajuća mjesta na sljedećoj slici (*Transient/Fourier Analysis*). Također, u istom prozoru je potrebno omogućiti izvršavanje Fourierove analize.



Slika 7: Podešavanje tranzijentne i Fourierove analize

Napomena: Ukoliko se odabere opcija *Use Transient Defaults* program će automatski odabrati trajanje i korak tranzijentne analize.

Simulacija se može pokrenuti na jedan od sljedećih načina:

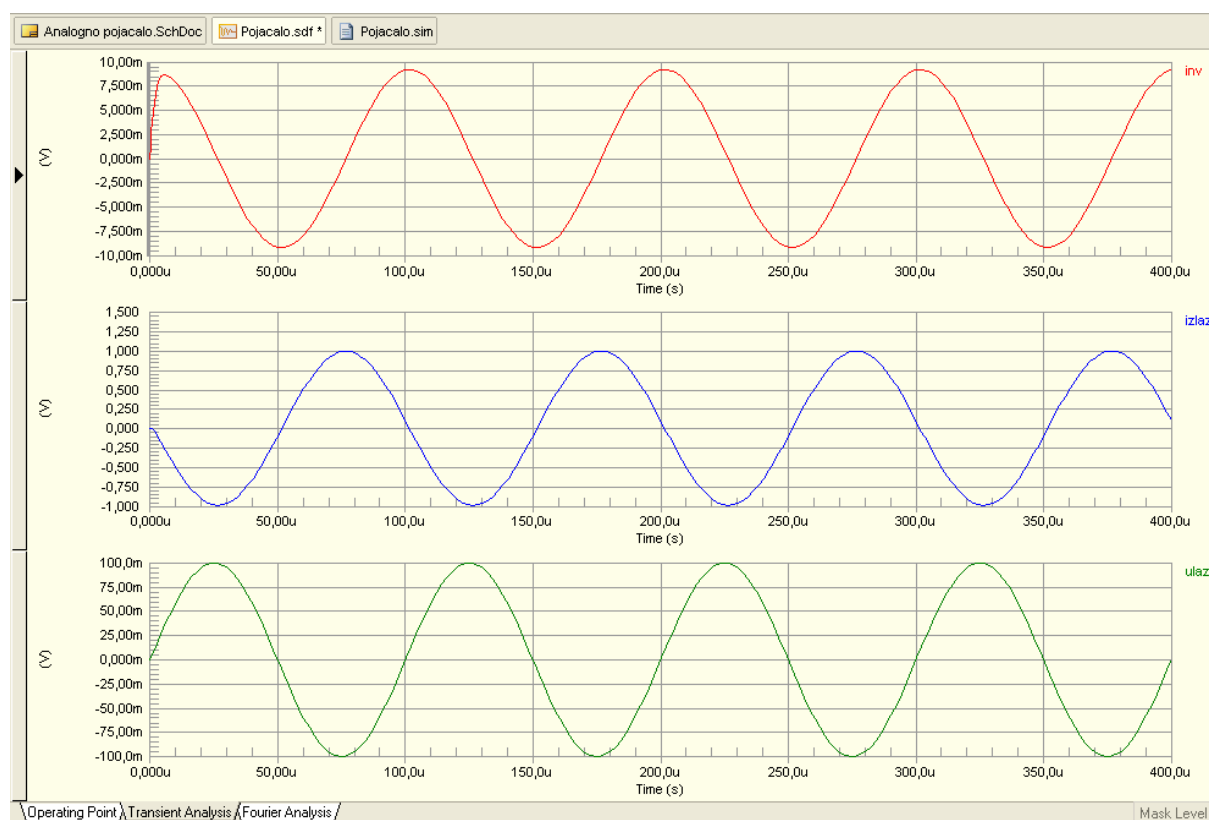
- klikom na ikonu *Run Mixed Signal Simulation* u izborniku alata,
- pritiskom na tipku F9,
- pozivom opcije *Design » Simulate » Mixed Sim.*

Tijek simulacije te pojava mogućih pogrešaka i upozorenja na električnoj shemi (koje se najčešće javljaju ako nije uključena odgovarajuća biblioteka ili ako u *Model Sim* prozoru nije odabran odgovarajući simulacijski model komponente) mogu se pratiti u prozoru *Messages* (uključiti putem opcije *System » Messages* u *statusbaru*). Ako nema pogrešaka, generirat će se SPICE netlista (*.nsx), izvesti simulacija i automatski otvoriti datoteka s rezultatima svih provedenih analiza (SDF, *simulation data file*), koja je nazvana prema imenu projekta i s ekstenzijom *.sdf (npr. *Pojacalo.sdf*). **Rezultate SPICE analize (*.sdf datoteku) preporučljivo je pohraniti za svaki odrađeni zadatak** radi jednostavnije demonstracije na kraju vježbi. U SDF datoteci svaka analiza prikazana je na zasebnom „listu“ (*tabu*):

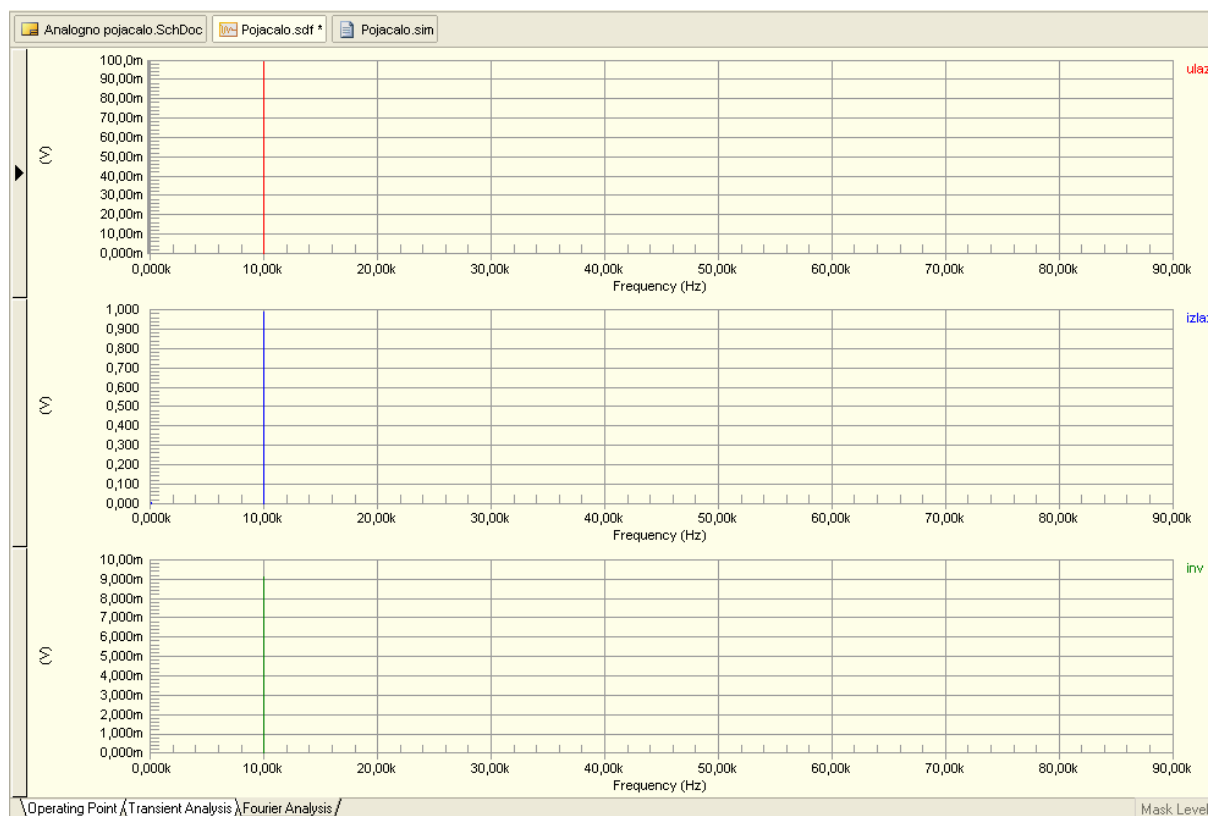
inv	11,15uV
izlaz	8,098mV
ulaz	0,000 V

Operating Point / Transient Analysis / Fourier Analysis /

Slika 8: Rezultat proračuna DC radne točke sklopa



Slika 9: Rezultat tranzijentne analize



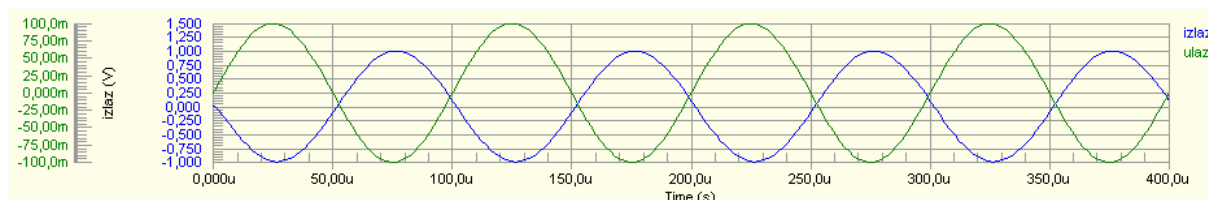
Slika 10: Rezultat Fourierove analize

Broj grafova na svakom od „listova“ ovisi o tipu analize i signalima odabranima na listi *Active Signals*. Istodobno se na ekranu mogu pratiti najviše 4 grafa, osim ako u *Document Options* pod *Number of Plots Visible* nije odabran prikaz svih valnih oblika istodobno (*All*). Također, na svakom od grafova automatski se prikazuje po jedan signal.

Neki signal može se odabrati klikom na njegovo ime. Time se ostali signali na aktivnom listu maskiraju. Prikaz dva i više signala na istom grafu u različitim mjerilima moguć je ako se drugi signal prebaci na graf prvog signala i doda mu se njegova Y-os na sljedeći način:

- desni klik na ime odabranog signala, pozvati opciju *Edit Wave* i omogućiti opciju *Add to New Y Axis*. Ostali signali automatski se maskiraju.
- *Plot » Add Y Axis*, čime se dodaje nova Y-os uz već postojeću.
- odvući odabrani signal do nove osi, nakon čega će program automatski skalirati novu os.

U sljedećem primjeru na istom grafu su prikazani signali *Ulaz* (skaliran) i *Izlaz*:

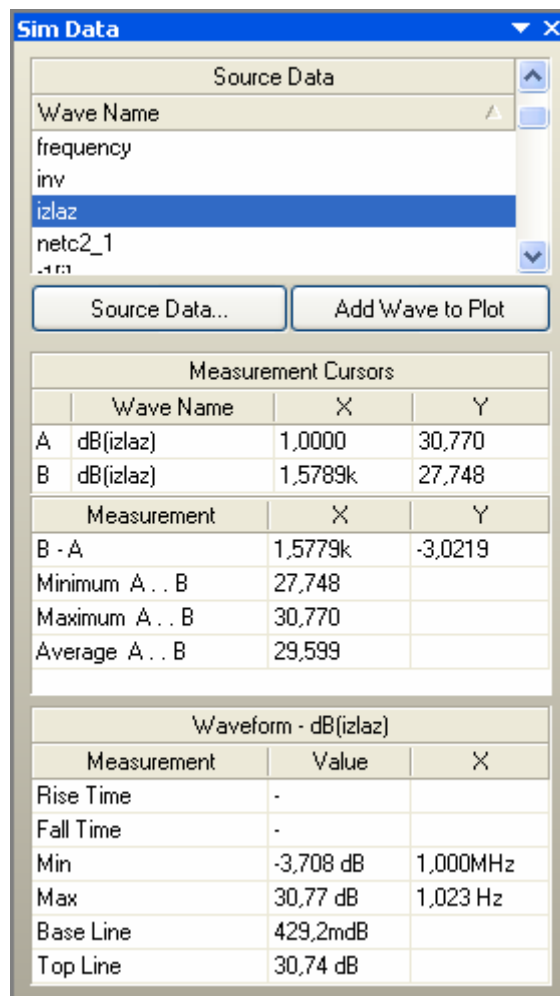


Desnim klikom na ime signala i odabirom opcije *Cross probe to Schematic* može se vidjeti gdje se točno na električnoj shemi nalazi odabrani signal.

Kursori se na trenutno aktivnom signalu dodaju pomoću opcije *Wave » Cursor A* i/ili *Wave » Cursor B*). Izbornici alata za ručno dodavanje novih grafova i signala te pomicanje kursora izgledaju kako je prikazano slikom:



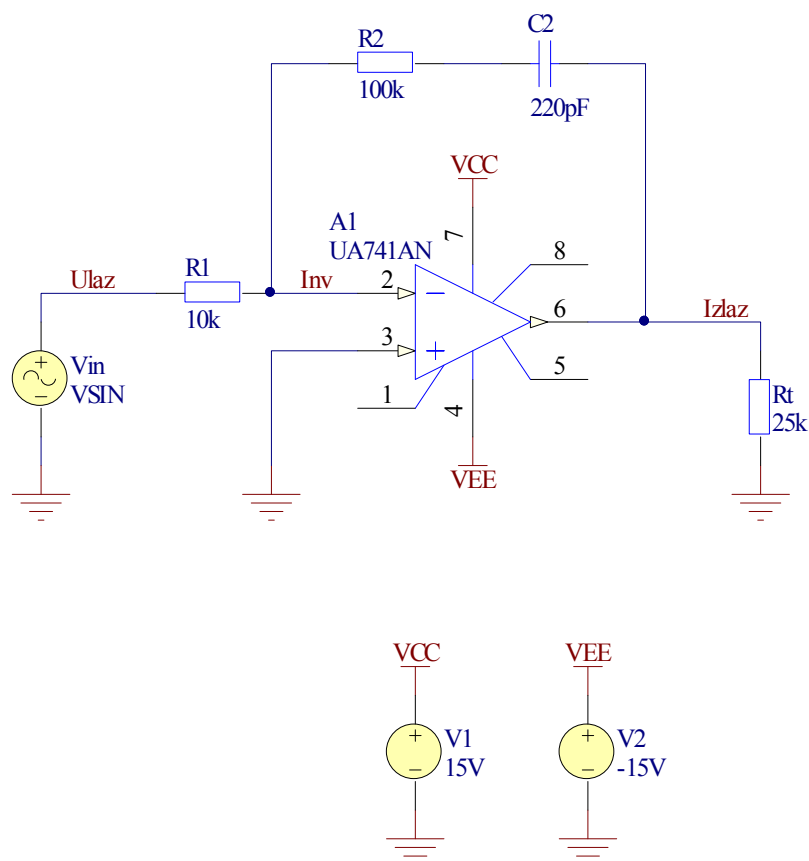
Vrijednosti u pojedinim točkama i neki od parametara signala mogu se vidjeti korištenjem *Sim Data* panela u *statusbaru* (*Editor » Sim Data*). (Kolika je gornja granična frekvencija sklopa? 😊)



Slika 11: Sim Data panel

AC analiza (režim malog signala) i određivanje frekvencijske karakteristike sklopa (Bodeov dijagram)

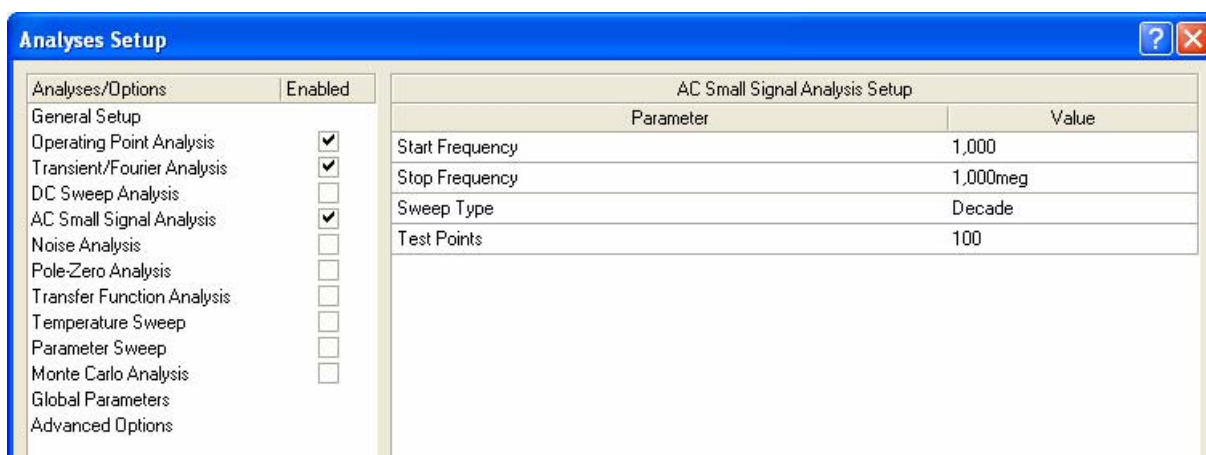
Zadatak: Shema za drugu simulaciju dobiva se dodavanjem kondenzatora C2 iznosa 220 pF paralelno otporniku R2, kako je prikazano sljedećom slikom. Shemu je potrebno dodati u projekt i imenovati kao *Niski propust.sch*. Kompajlirati električnu **shemu**.



Slika 12: Električna shema 2. zadatka

Produljiti trajanje simulacije (tranzijentne analize) na 1 ms i obaviti DC, tranzijentnu i Fourierovu analizu. Usporediti s rezultatima za prethodnu električnu shemu.

Zadavanje parametara analize za određivanje frekvencijske karakteristike sklopa (Bodeov dijagram) određuje se u okviru opcije *AC Small Signal Analysis* u glavnom prozoru za zadavanje postavki SPICE analize:



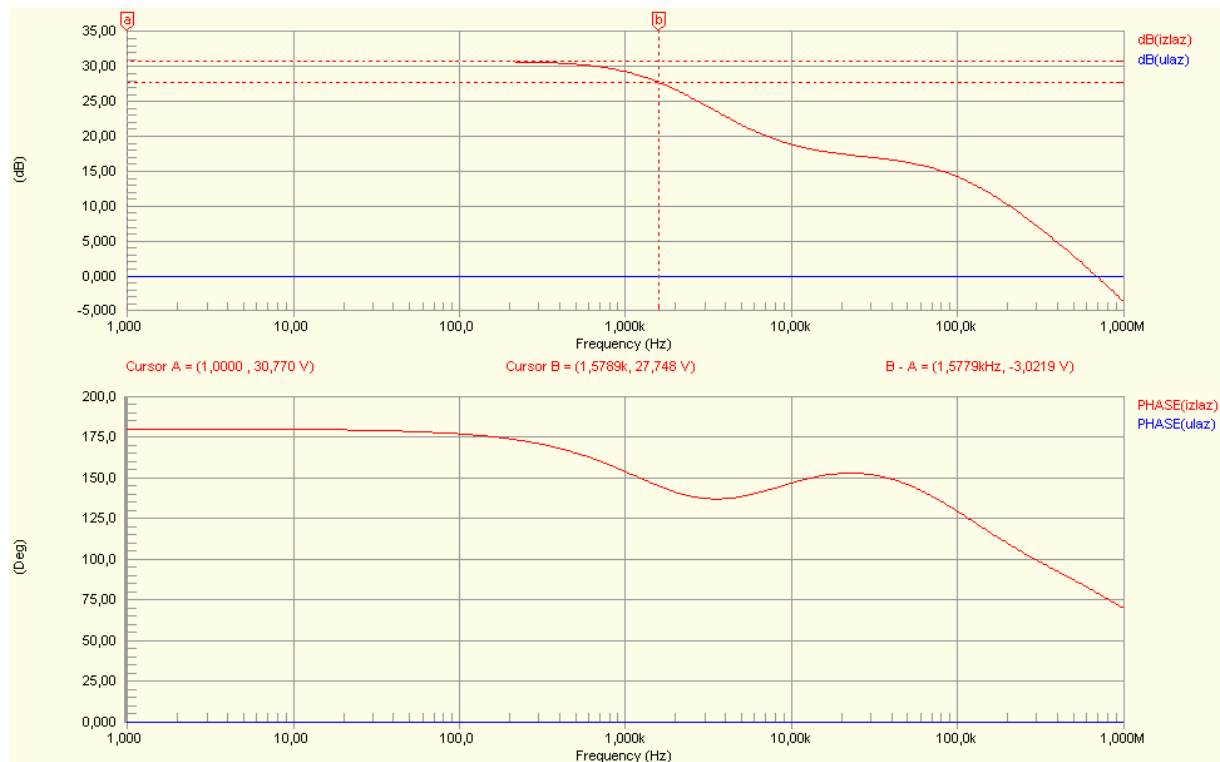
Slika 13: Zadavanje postavki AC Small Signal analize

Napomena: Kod SPICE simulacije prefiks "mega" označava se s **meg**, a ne s **M** (program bi to interpretirao kao prefiks "mili"!).

Kao rezultat AC analize u režimu malog signala dobiva se prikaz napona u mjernim točkama u ovisnosti o frekvenciji ulaznog sinusnog signala. Ako želimo nacrtati Bodeov dijagram ulaznog i izlaznog signala (dB pojačanja i faza u stupnjevima), postupak je sljedeći:

- staviti signale *Ulaz* i *Izlaz* na isti graf,
- pozvati opciju *Wave » Edit Wave* (ili desni klik na signal, *Edit Wave*),
- odabrati funkciju *Magnitude (dB)* u izborniku *Complex Functions*, kliknuti na *Create*.
- na novi graf (ili onaj koji je ostao prazan) dodati nove signale *Phase(Ulaz)* i *Phase(Izlaz)* i ponavljanjem prethodnog postupka.

Rezultat je prikazan na sljedećoj slici:

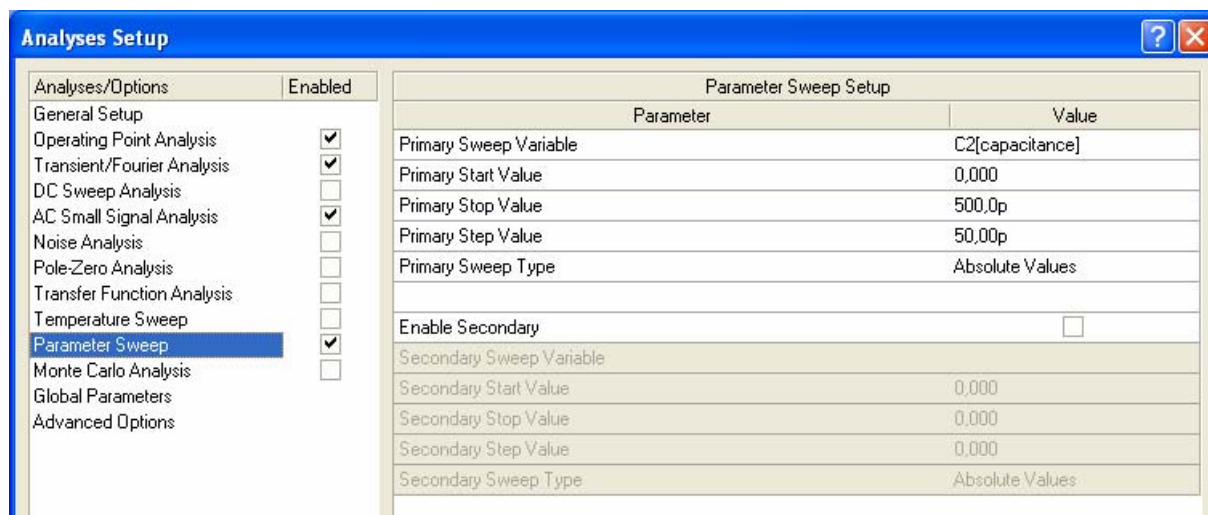


Slika 14: Bodeov dijagram sklopa

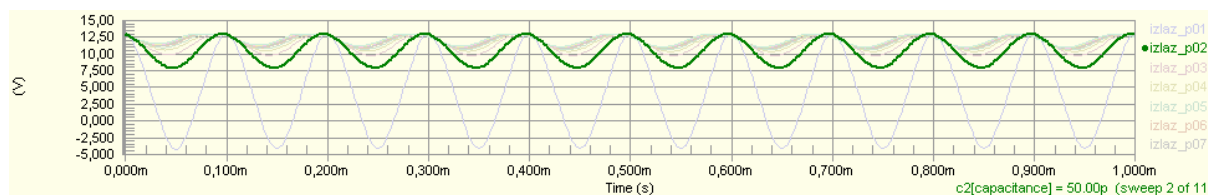
Parameter Sweep analiza

U izborniku *Analyses Setup » General Setup » Sim View Setup* provjeriti da je postavljeno *Show Active Signals* (u suprotnom će iscrtati signale samo za vrijednost parametra istu kao i u prethodnoj simulaciji); izbaciti signal *Inv* iz simulacije.

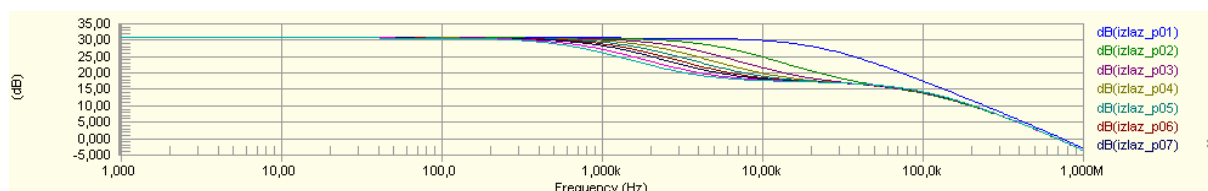
Uključiti *Parameter Sweep* kapaciteta C2 u simulaciju, tako da mu se kapacitet mijenja od 0 pF do 500 pF u koracima od 50 pF:

Slika 15: Postavljanje postavki *Parameter Sweep* analize

Ovako postavljenim parametrima računa se stanje sklopa u 11 točaka za sve označene simulacije. S ovim parametrima svi signali dobivaju sufiks uz ime, koji označava tip simulacije (p - *parameter sweep*, mc - *monte carlo sweep*, t - *temperature sweep*) i redni broj (za 11 različitih parametara brojevi od 1 do 11). Mišem se može *skrolati* kroz parove signala za iste parametre. Klikom na ime nekog od signala ispod grafa će se ispisati vrijednost parametra za tu iteraciju (primjer na sljedećoj slici):



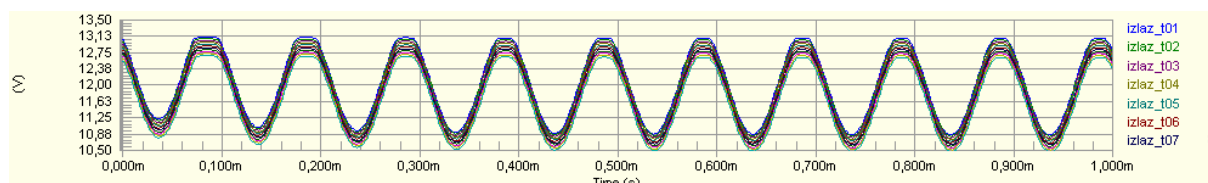
Slika 16: Valni oblik signala Izlaz za vrijednost parametra C2 = 50 pF



Slika 17: Amplitudna karakteristika sklopa za različite vrijednosti parametra C2

Temperaturna analiza

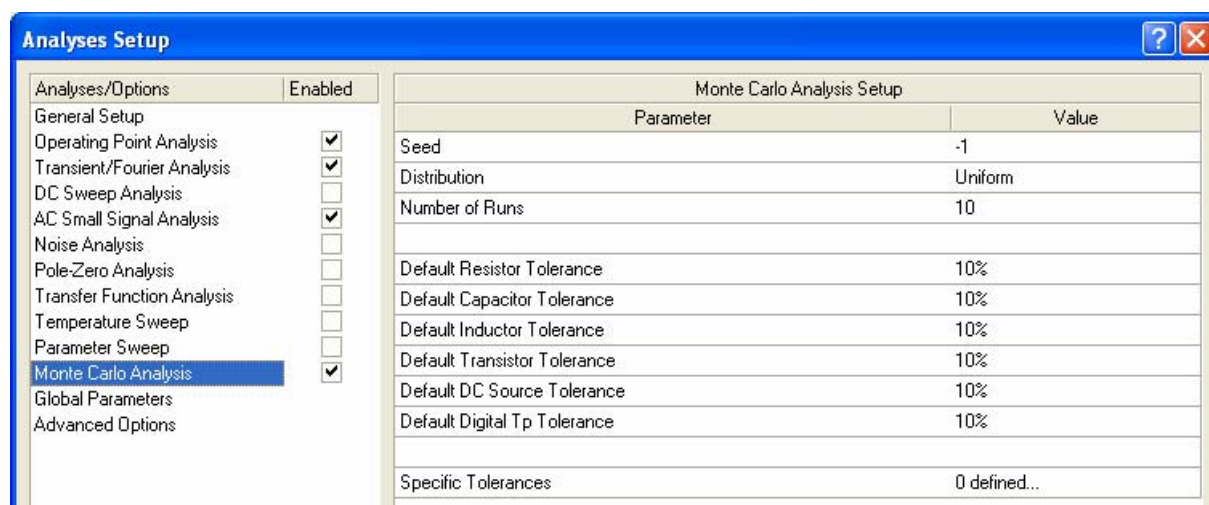
Isključiti *Parameter Sweep* i uključiti *Temperature Sweep* analizu. Podesiti promjenu temperature od -40 °C do 160 °C u koracima od 20 °C.



Slika 18: Vrijednosti izlaznog napona za različite vrijednosti temperature

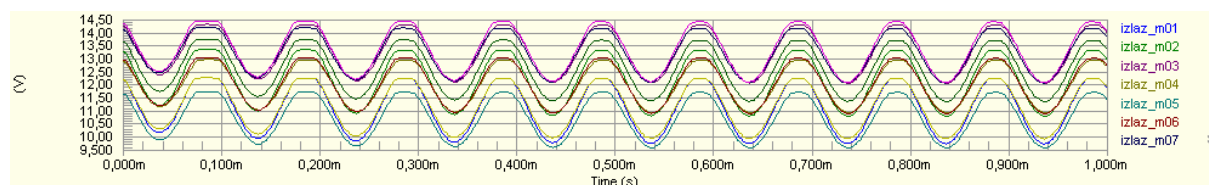
Monte Carlo analiza

Postaviti sljedeće postavke Monte Carlo analize:



Slika 19: Postavljanje postavki *Monte Carlo* analize

Program će provesti analizu rada sklopa u 10 iteracija, uz slučajno variranje parametara sklopa (vrijednosti komponenata, napona napajanja itd.) prema uniformnoj gustoći vjerojatnosti (parametre je moguće varirati i prema normalnoj raspodjeli, a može se provesti i *Worst Case* analiza). Primjer izgleda familije valnih oblika dobivenih tranzijentnom analizom uz Monte Carlo variranje parametara sklopa prikazan je na slici 20.



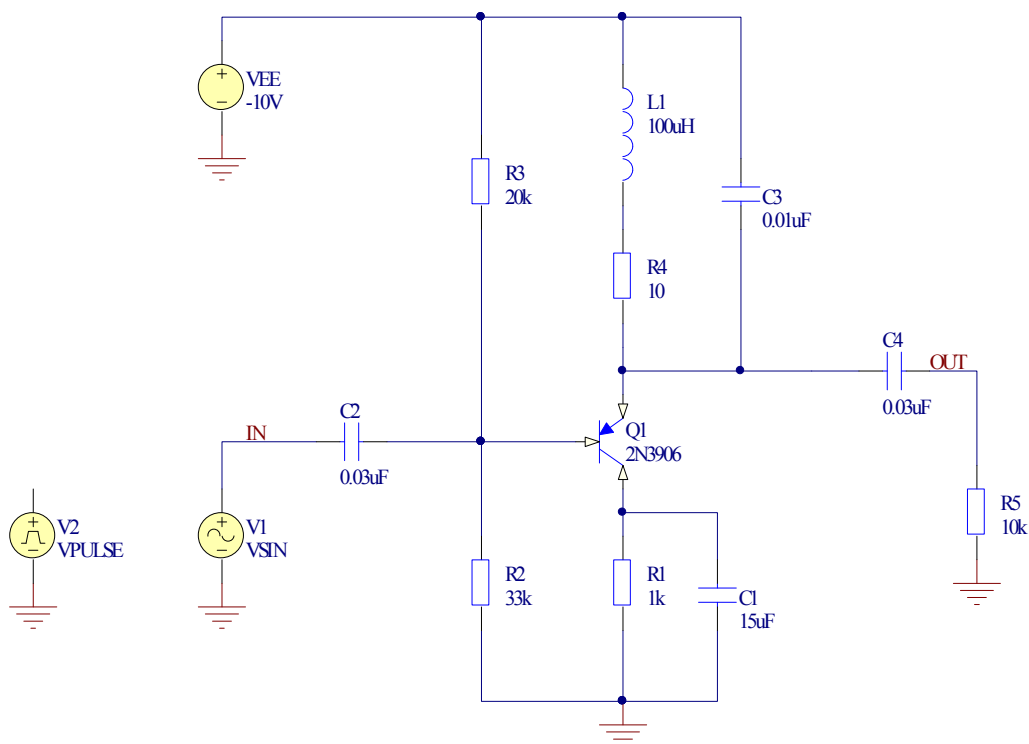
Slika 20: Vrijednosti izlaznog napona izračunate *Monte Carlo* analizom

Zadaci za vježbu

Zadatak 2.

Za sklop prikazan slikom potrebno je napraviti sljedeće:

- nacrtati Bodeov dijagram, odrediti maksimalno pojačanje sklopa, gornju i donju graničnu frekvenciju te rezonantnu frekvenciju,
- provesti tranzijentnu analizu odziva sklopa:
 - o za tri frekvencije sinusnog izvora (1 kHz, 150 kHz, 1 MHz) (uz ručnu promjenu frekvencije izvora prije svake simulacije),
 - o umjesto sinusnog izvora na ulaz spojiti impulsni izvor (VPULSE: *pulsed value* = 5, *time delay* = 2m, *rise time* = 100u, *fall time* = 100u, *pulse width* = 1m),
- usporediti i komentirati rezultate AC i tranzijentne analize.



Napomene:

Kod proučavanja rezultata simulacije i korištenja kursora vrlo je korisno uključiti panel *Sim Data* iz *statusbara*.

Za snimanje frekvencijske karakteristike koristi se izvor VSIN, kojem se mogu podešavati sljedeći parametri:

- *DC Magnitude* - DC razina koja se koristi kod OP analize,
- *AC Magnitude* - amplituda izvora za AC analizu,
- *AC Phase* - faza sinusnog valnog oblika za AC analizu,
- *Offset, Amplitude, Phase, Frequency* - DC razina, amplituda, faza i frekvencija sinusnog valnog oblika za ostale tipove analiza,
- *Delay* - kašnjenje uključenja izvora od početka SPICE simulacije,

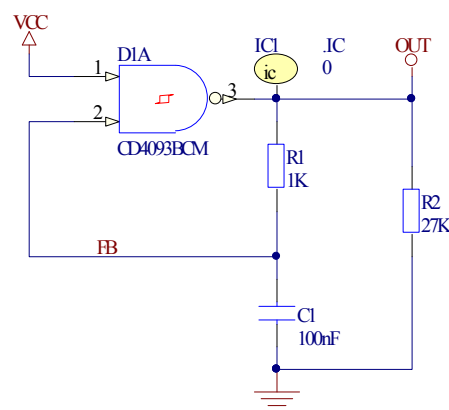
- *Damping Factor* - prigušenje sinusnog valnog oblika (pozitivne vrijednosti - prigušenje, negativne - raspirivanje oscilacija),

Za AC analizu bitni su samo *AC Magnitude* i *AC Phase* (najbolje ostaviti *default* vrijednosti 1 i 0).

Zadatak 3.

Za CMOS oscilator prikazan slikom potrebno je napraviti sljedeće:

- odrediti nazivnu frekvenciju oscilatora (putem tranzijentne analize),
- procijeniti najveću pogrešku odstupanja od nazivne frekvencije (putem Monte Carlo simulacije tranzijentne analize) za dva slučaja:
 - o tolerancije otpornika, kondenzatora i napona napajanja 10 %,
 - o tolerancije otpornika, kondenzatora i napona napajanja 20 %.



Napomene:

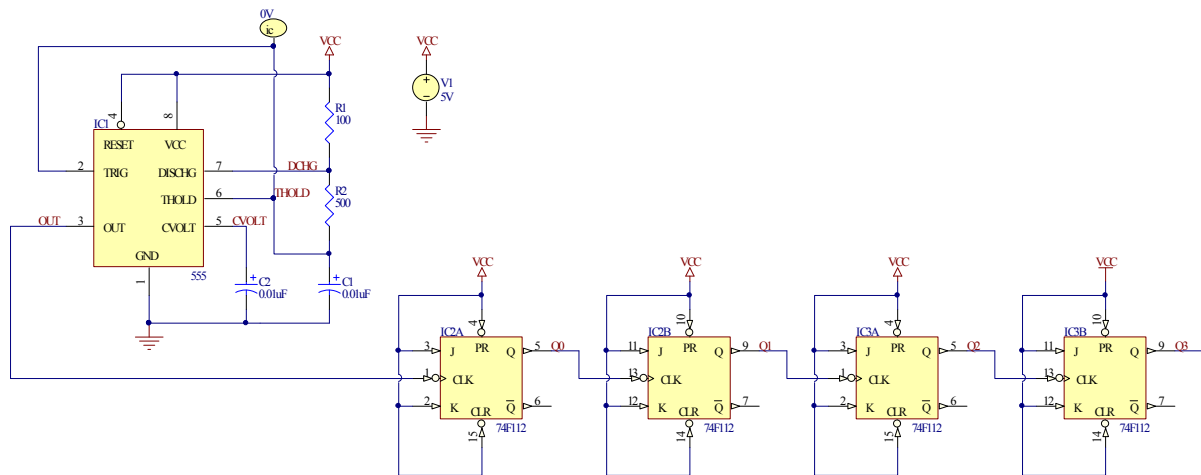
Komponentu CD4093BCM odabrati iz biblioteke *FSC Logic Gate.IntLib* (u biblioteci je već uključen SPICE model integriranog sklopa).

Kod tranzijentne analize uključiti početni uvjet $.IC = 0V$ (simulacijska komponenta za zadavanje početnog uvjeta IC (*Initial Condition*) nalazi se u biblioteci *Simulation Sources.IntLib*).

Kod provođenja Monte Carlo analize odabrati *Worst Case* način generiranja slučajeva i ukupni broj ponovljenih simulacija 10. Korištenjem A i B kursora i *Sim Data* panela odrediti frekvenciju svakog simuliranog valnog oblika i najveća odstupanja od nazivne frekvencije.

Zadatak 4.

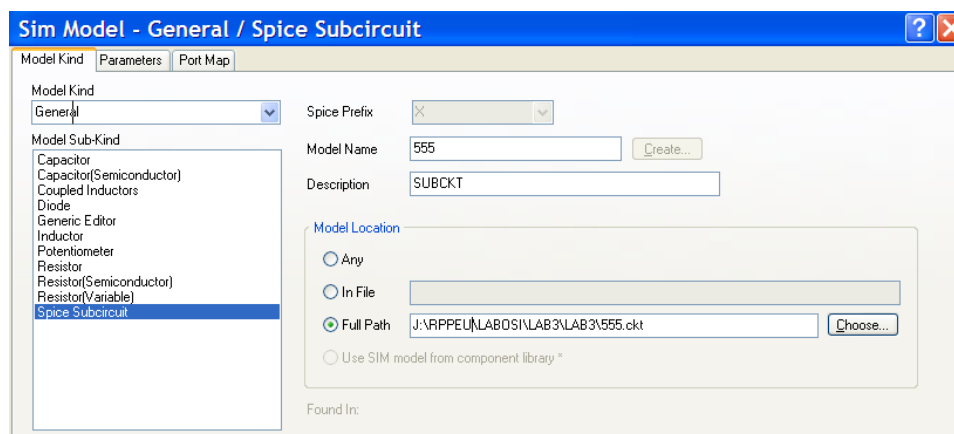
Provesti tranzijentnu analizu rada sklopa prikazanog sljedećom slikom:



Odrediti frekvenciju takta na izlazu iz 555 *timera* (OUT) i prikazati valne oblike izlaza iz J-K bistabila Q0, Q1, Q2, Q3.

Napomene:

Za simulaciju rada sklopa potrebna je vanjska datoteka sa SPICE modelom za integrirani sklop 555 ("555.ckt", preuzeti sa stranica predmeta). Datoteku "555.ckt" potrebno je kopirati u radni direktorij projekta i uključiti kao SPICE subcircuit:



Nakon toga treba uskladiti mapiranje rasporeda priključaka između komponente na električnoj shemi i SPICE modela.

Kod tranzijentne analize uključiti početni uvjet $.IC = 0V$ (komponenta se nalazi u biblioteci *Simulation Sources.IntLib*).

Komponentu 74F112 treba potražiti u bibliotekama koje sadrže i njezin simulacijski model pozivom opcije *Libraries » Search* uz zadani parametar pretraživanja:

```
HasModel('SIM','*74*112*',False).
```