

Dodatak 1

LTspice

Cilj nam je da ovim poglavljem ukažemo na namenu, mesto i ulogu alata za analizu ponašanja elektronskih kola. Naime, savremena elektronska kola postaju sve složenija tako da proizvodnja prototipa zahteva sve više znanja, spretnosti, novca i vremena. Imajući u vidu da znanje, spretnost i vreme moraju da se plate, može se reći da zahteva sve više novca, novca, novca i novca. Da bi se uštedelo, naročito u poslednje tri „alotropske modifikacije” novca, neophodno je softverski proveriti ispravnost budućeg hardvera, pre nego se pristupi njegovoj fizičkoj realizaciji. U ovu svrhu koriste se programi za analizu ponašanja elektronskih kola.

Odavno se iz širokog skupa alata za ovu namenu izdvojio program **SPICE** koji je razvijen na Kalifornijskom univerzitetu u Berkliju. Naziv programa predstavlja akronim od **S**imulation **P**rogram for **I**ntegrated **C**ircuits **E**mphasis i sugerise da je razvijen kako bi pomogao projektantima integrisanih kola da predvide ponašanje integrisanog kola pre nego što ono prođe skupi postupak fabrikacije. Osnovna verzija programa razvijena je još daleke 1975. godine, kada se za komunikaciju čovek–mašina koristio čitač kartica. Tada je svaki red računarskog kôda morao da se unese preko kartonske kartice. Iz tog perioda ostala je praksa da se umesto reči linija kôda, u SPICE-u pojavljuje reč kartica. Nije postojala ni mogućnost grafičkog unosa električne šeme, tako da je svaki element kola morao da se unese preko kartice koja je sadržala slovnu šifru elementa, podatke o čvorovima između kojih je vezana i vrednosti parametara (otpornost, kapacitivnost,...). Lista svih kartica sa opisom elemenata kola naziva se *net lista* (od engleske reči *net*, što znači mreža). Naravno, kasnije su se pojavile

novije verzije programa, ali su sve zadržale osnovni koncept koji je postavio program SPICE. Najkraće rečeno, on se sastoji u činjenici da je svaka komponenta elektronskog kola (od otpornika do operacionog pojačavača) opisana svojom „modelskom karticom” odnosno modelom. Modeli osnovnih komponentenata smešteni su u bibliotekama, a korisnici mogu da menjaju njihove parametre. Osim toga, korisnicima je omogućeno da razvijaju sopstvene modele i da ih priključe biblioteci. Fleksibilnost u dodavanju novih modela komponentenata doprinela je da osnovna struktura programa ne zastareva sa razvojem tehnologije. Naime, iako svaka nova tehnološka generacija zahteva složeniji model, sa stanovišta programa za analizu to podrazumeva prihvatanje opisa novog modela. Sa stanovišta korisnika, to znači da se, najčešće, samo promenom šifre komponente, referencira na novi model. Ova pogodnost doprinela je da se SPICE nametne kao standard, tako da proizvođači komponentenata (i tehnologija!), uz ostale katalogske podatke, nude i SPICE modele za svaku novu komponentu, odnosno tehnologiju.

Druga važna novina koju je SPICE koncept uneo u sferu alata za analizu elektronskih kola jeste mogućnost interpretacije različitih matematičkih funkcija za opisivanje naponskih i strujnih generatora kontrolisanih nezavisnim naponom ili strujom. Ovim se omogućilo korisnicima da sami razvijaju modele specifičnih elektronskih komponentenata.

Iako, prevashodno, razvijen za analizu analognih kola, vremenom je SPICE obogaćen ugradnjom logičkog simulatora, tako da se danas koristi za analizu digitalnih i kola sa mešovitim signalima (analogni i digitalni).

Na platformi koju je originalni SPICE postavio, razvili su se mnogi slični programi. Oni su pretežno zadržali u nazivu ključnu reč SPICE, sa prefiksom koji ukazuje na neku specifičnost ili naziv proizvođača. Na tržištu se mogu naći profesionalni programi pod nazivima HSpice, pSpice (u okviru OrCAD paketa za projektovanje kola), TSpice. Osnovna razlika među njima jeste u broju i kvalitetu ugrađenih algoritama (u čemu za sada dominira HSpice) i izgledu korisničkog interfejsa (grafički editor šeme; prikaz i obrada rezultata analize). Otuda proističu i razlike u performansama (složenost kola, brzina analize, konvergencija,...), a time i u ceni. Postoje i verzije koje su besplatne. To su studentske verzije (*Light Edition* PSpice) sa umanjenim mogućnostima. Korporacija *Linear Technology* (<http://www.linear.com>), veliki proizvođač analognih komponentenata i integrisanih kola, nudi besplatno verziju LTSpice sa bibliotekom modela njihovih komponentenata. Uzimajući u obzir korisnički interfejs i performanse, autori smatraju da LTSpice može da

D1.1. Osnovne naredbe

bude koristan svim početnicima, tako da će u tekstu koji sledi biti dato kratko korisničko uputstvo za ovaj programski paket.

D1.1. Osnovne naredbe

Nezavisno od verzije platforme za analizu kola, svi ozbiljni programi podržavaju osnovne tipove analiza: analiza u jednosmernom (DC), naizmeničnom (AC) i vremenskom domenu (*Transient* TR ili TRAN).

DC analizom dobijaju se podaci o položaju mirne radne tačke i/ili koeficijentima osetljivosti odziva na promene pojedinih parametara u kolu i/ili prenosna karakteristika kola. U okviru DC analize, moguća je i parametarska analiza kola tokom koje se jedan ili više od parametara kola menjaju. Ova osobina je korisna za skiciranje izlaznih karakteristika MOS tranzistora pri različitim vrednostima napona V_{GS} . Na osnovu podataka dobijenih DC analizom određuju se parametri linearnih modela za male signale u okolini radne tačke koji se koriste u AC analizi i početne vrednosti napona na kondenzatorima te struja kroz kalemове u TR analizi. Zato ona prethodi i AC i TR analizi čak i kada se eksplicitno ne zahteva.

AC analiza služi za generisanje frekvencijskih karakteristika kola. Svi nelinearni elementi kola zamenjeni su linearnim modelima. Određuje se ponašanje kola u zavisnosti od frekvencije kada se pobudi prostoperiodičnim signalom konstantne amplitude. Naravno, frekvencija se menja u zadatom opsegu. Rezultati se grafički mogu interpretirati u linearnoj, polulogaritamskoj ili logaritamskoj skali.

TR analizom dobija se uvid u ponašanje kola kada se ono pobudi vremenski promenljivim signalima sa proizvoljnim talasnim oblikom.

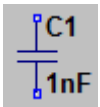
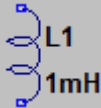
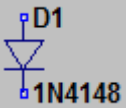
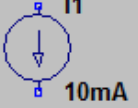
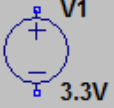
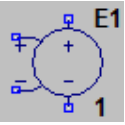
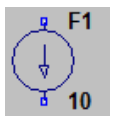
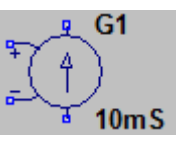
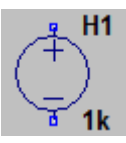
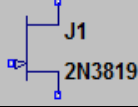
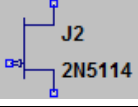
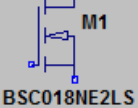
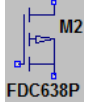
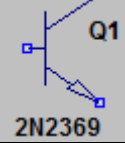
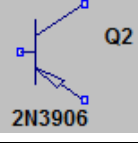
Zajedničko za sve verzije SPICE-a jeste da:

- opis kola za analizu počinje sa komentarom,
- sadrži opis topologije kola,
- sadrži naredbe kojima se specificiraju parametri analize,
- može da sadrži proizvoljan broj linija komentara (komentari počinju specijalnim karakterom koji se može razlikovati kod različitih verzija SPICE programa; u originalnoj verziji to je „*“, a u u LTspice linijski komentar počinje karakterom „;“),
- mora da sadrži opise modela ili poziv na biblioteke u kojima su smešteni modeli i

- poslednja naredba u opisu je **.end**; označava kraj opisa kola.

Naslede iz ranijih verzija programa za analizu kola, kao što je ECAP, odnosi se na sintaksu u opisu topologije kola. Svaka grana u kolu opisuje se skupom alfanumeričkih karaktera koji sadrže oznaku tipa elementa, topološki položaj u kolu i vrednosti parametara modela. Oznaka tipa

Tabela D1.1. Spisak ugrađenih elemenata koje prepoznaje LTspice

Komponenta	Simbol	Komponenta	Simbol
Otpornik		Kondenzator	
Kalem		Dioda	
Strujni nezavisni generator		Naponski nezavisni generator	
Naponski generator kontrolisan naponom		Strujni generator kontrolisan strujom	
Strujni generator kontrolisan naponom		Naponski generator kontrolisan strujom	
nJFET		pJFET	
nMOS		pMOS	
Bipolarni npn		Bipolarni pnp	

D1.1. Osnovne naredbe

elementa određena je jednoznačno prvim slovom kao što je prikazano u tabeli D1.1 (prvo slovo u oznaci pored simbola). Ova nomenklatura uspostavljena je u vreme kada nisu postojali grafički editori električne šeme. U savremenim verzijama programa kolo se opisuje direktno crtanjem električne šeme, a net lista se generiše na zahtev korisnika i/ili u okviru izveštaja o eventualnim grešakama u opisu.

Naredbe kojima se kontroliše tip analize i neophodni parametri analize počinju tačkom. Spisak osnovnih naredbi dat je u tabeli D1.2, dok je na kraju ovog Dodatka, u tabeli D1.4 taj skup kompletiran. Zagrade definisane znacima < > označavaju obavezne podatke, dok [] zagrade označavaju podatke koji se mogu izostaviti; znak | razdvaja alternativne parametre, čita se *ili*; podaci između navodnika „n” označavaju podrazumevane vrednosti koje se automatski usvajaju ukoliko nisu zadate. Detaljno značenje ovih naredbi biće objašnjeno kasnije uz odgovarajuće primere.

Tabela D1.2. Spisak osnovnih naredbi za kontrolu tipa i toka simulacije

Naredba	Opis	
.AC	Značenje	Aktivira AC analizu (daje zavisnost modula/faze napona/struja od frekvencije) od StartFreq do EndFreq u Nsteps koraka ili linearno ili po oktavi ili po dekadi
	Sintaksa	.ac <oct dec lin> <Nsteps> <StartFreq> <EndFreq>
	Primer/komentar	.ac dec 5 1Hz 100MEGHZ AC analiza u 5 tačaka po dekadi u opsegu od 1 Hz do 100 MHz
.DC	Značenje	Aktivira DC analizu (dobijaju se vrednosti napona i struja u kolu) pri kojoj jedan ili više nezavisnih izvora pod imenom srcnam , srcnam2 ,... mogu da menjaju vrednosti od Vstart do Vstop u Vincr koraka
	Sintaksa	.dc <srcnam> <Vstart> <Vstop> <Vincr> [srcnam2 <Vstart2> <Vstop2> <Vincr2>]
	Primer/komentar	.dc Vds 3.5 0 –0.05 Vgs 0 3.5 0.5 Tokom DC analize vrednost generatora Vds smanjuje se od 3.5 V do 0 V za po –0.05 V, dok Vgs raste

		od 0 do 3.5 V za po 0.5 V
.END	Značenje	Kraj opisa kola u netlisti
.ENDS	Značenje	Kraj opisa potkola
.FUNC	Značenje	Definisanje korisničke funkcije name sa argumentima args opisana izrazom expression
	Sintaksa	.func <name>([args]) {<expression>}
	Primer/komentar	func RMS(x,y) {sqrt(x*x+y*y)} definiše funkciju „ $\text{RMS} = \sqrt{x^2 + y^2}$ ”
.IC	Značenje	Aktivira granične uslove za napone na kondenzatorima i/ili struje kroz kalem u .TRANalizi
	Sintaksa	.ic [V(<n1>)=<voltage>] [I(<inductor>)=<current>]
	Primer/komentar	.ic V(in)=2 V(out)=5 V(vc)=1.8 I(L1)=300m granični uslovi za TR analizu su: za kondenzatore vezane za čvorove in, out i vc su naponi 2 V, 5 V i 1.8 V, redom, a za struju kroz L1 300 mA.
.INCLUDE	Značenje	Priključuje fajl filename netlisti. (upisuje se puni naziv fajla sa ekstenzijom – zgodno za potkola)
	Sintaksa	include <filename>
	Primer/komentar	include mojfabl.cir ranije opisani deo kola zapisan pod nazivom „mojfabl.cir” postaje sastavni deo tekućeg opisa kola.
.LIB	Značenje	Priključuje biblioteku libname netlisti. (upisuje se puni naziv fajla sa ekstenzijom – zgodno za biblioteke modela i potkola)
	Sintaksa	.lib <libname>
	Primer/komentar	.lib mojabiblioteka.lib svi modeli smešteni u fajl „mojabiblioteka.lib” dostupni su opis kola.
.MODEL	Značenje	Definiše model sa imenom modname za diodu (D), npn BJT (NPN), pnp BJT (PNP), nMOS (NMOS), pMOS

D1.1. Osnovne naredbe

		(PMOS), nMESFET (NMF), pMESFET (PMF), VDMOS (VDMOS), nJFET (NJF), pJFET (PJF), naponom kontrolisanih prekidača (SW), strujom kontrolisanih prekidača (CSW), transmisione linije (LTRA) i raspodeljene RC linije (URC). Lista parametara zavisi od tipa modela.
	Sintaksa	.model <modname> <D PN NP MOS MOS MF MF VDMOS NJF PJF SW CSW LTRA URC> [(<parameter list>)]
	Primer/komentar	.model 1N4148 D (Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n lave=200m Vpk=75)
.NOISE	Značenje	Izračunava spektralnu gustinu šuma napona V(<out>[,<ref>]) u kolu koji izaziva nezavisni generator Vin lin u propusnom opsegu EndFreq–StartFreq u Nsteps tačaka po oktavi ili dekadi ili u linearnom opsegu definisanom .AC naredbom. (spektralna gustina šuma napona je kvadratni koren spektralne gustine šuma snage)
	Sintaksa	noise V(<out>[,<ref>]) <Vin lin> <oct dec lin> <Nsteps> <StartFreq> <EndFreq>
	Primer/komentar	.NOISE V(4) V1 5
.OP	Značenje	Poziva štampanje DC napona i struja u kolu – radna tačka (operational point)
	Sintaksa	.op
	Primer/komentar	.op
.OPTIONS	Značenje	Omogućava zadavanje 48 različitih parametara kojima se kontroliše tok i analize i način prikazivanja rezultata. Za detalje konsultovati korisničko uputstvo.

	Sintaksa	options [option1] [option2]
	Primer/komentar	.options method=gear abstol=1fA vntol=10nV
.PARAM	Značenje	Omogućava kreiranje sopstvenih promenljivih param , definisanih preko izraza ili vrednosti expr koje se mogu dodeljivati kao parametri ostalim elementima kola ako se navedu u vitičastim zagradama.
	Sintaksa	.param [param1=<expr1> [param2=<expr2>] ... Any_device1 node1 [node2 [node3...]] {param1} Any_device2 node1 [node2 [node3...]] {param2}
	Primer/komentar	param C=1uF C1 cvor1 cvor2 {C} .param Pi = '355/113' .param Pi2 = '2*Pi' param RLoad=(Vbb-Q2Vce)/Iload R3 cvor2 cvor0 {RLoad}
.STEP	Značenje	Menja vrednost parametra what u granicama od start do stop sa korakom increment ukoliko je ukoliko je how definisano kao lin ili izostavljeno ili u nstep koraka za how definisano kao oct ili dec . Parametar se može zadati i u obliku liste list vrednosti.
	Sintaksa	step [„lin” dec oct] <what> [<start> <stop> <incr nstep>] [list <value1> <value2> <value3>...]
	Primer/komentar	step oct v1 1 20 5 .step I1 10u 100u 10u .step param RLOAD LIST 5 10 15 .step NPN 2N2222(VAF) 50 100 25 .step temp -55 125 10
.SUBCKT	Značenje	Definiše potkolo pod imenom name ,

D1.1. Osnovne naredbe

		vezano između čvorova n1 do nn . Opis potkola završava se sa .ends . Poziva se u kolu naredbom xime c1 c2 ...cn name . Pogodno je za opise u kojima se ista struktura više puta ponavlja.
	Sintaksa	.subckt <name> <n1 n2 ... nn>
	Primer/komentar	*This is the circuit definition X1 a b 0 divider X2 b c 0 divider V1 a 0 pulse(0 1 0 .5μ .5μ 0 1μ) * this is the definition of the subcircuit .subckt divider n1 n2 n3 r1 n1 n2 1k r2 n2 n3 1k .ends .tran 3 .end
.TEMP	Značenje	Definiše listu temperatura za koje treba da se obavi analiza
	Sintaksa	.TEMP <T1> <T2> ...
	Primer/komentar	.TEMP -20 0 25 80. Analiz se obavlja na T=-20°C, 0°C i 80°C
.TF	Značenje	Daje DC prenosnu funkciju: napon ili struja u zavisnosti od malih promena izvora source
	Sintaksa	.TF V(<node>[, <ref>]) <source> .TF I(<voltage source>) <source>
	Primer/komentar	.TF V(out) Vin .TF V(5,3) Vin .TF I(Vload) Vin
.TRAN	Značenje	Aktivira analizu nelinearnih kola u vremenskom domenu (dobijaju se talasni oblici napona/struja) od 0 do Tstop . Beleže se rezultati za grafički prikaz u svakom Tstep trenutku počev od vremena Tstart . Maksimalni vremenski korak integracije ograničen je sa dTmax . Ukoliko se zadaju Tstart ili dTmax

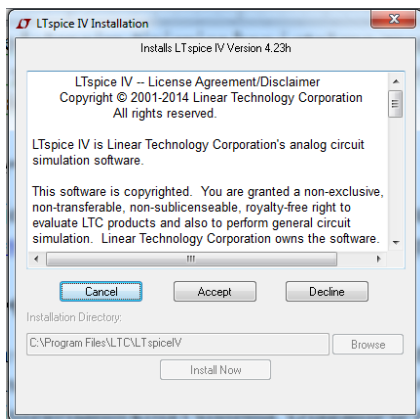
		tada je obavezan i Tstep . Opcije TR analize kontrolišu parametri iz liste [modifiers] : UIC – umesto rezultata DC analize za granične usvaja vrednosti koje zadaje korisnik sa .ic; steady – zaustavlja analizu pre Tstop ukoliko se dostigne ustaljeni režim; nodiscard – ne briše iz fajla rezultate do dostizanja ustaljenog stanja; startup – počinje analizu tako što postepeno povećava vrednost svih nezavisnih izvora u prvih 20 μ s analize; step – simulira opterećenje strujnim izvorom koji se menja brzinom 20 A/ μ s
	Sintaksa	.TRAN <Tstop> [modifiers] .TRAN <Tstep> <Tstop> [Tstart [dTmax]] [modifiers]
	Primer/komentar	.TRAN 10n 10ms Analiza do 10 ms, sa korakom štampanja rezultata na svakih 10 ns

Kao što je rečeno, postoje različite verzije programa za analizu kola i koliko god oni bili slični u osnovnim karakteristikama i mogućnostima, svaki ima svoje specifičnosti. Cilj nam je da ovim Dodatkom, kroz jednostavne primere, ukažemo na osnovne mogućnosti i način korišćenja programa LTspice, i uvedemo čitaoce u izazove koje nudi analiza kola. Istovremeno, podstičemo čitaoce da simulacijom provere predložene im činjenice kao i stečena znanja. Projektantima, koji već imaju iskustvo u primeni programa za analizu kola, ovo poglavlje predstavlja podsetnik i skraćeno uputstvo za korišćenje programa LTspice.

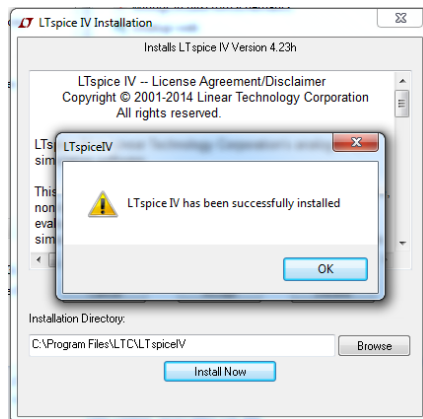
D1.2. Instalacija i pokretanje programa

Aplikacija za instalaciju programa LTspice (LTspiceIV.exe) može se preuzeti besplatno sa adrese <http://www.linear.com/designtools/software/>. Pokretanjem aplikacije otvara se prozor sa sl. D1.1.a u kome se prihvataju

D1.2. Instalacija i pokretanje programa



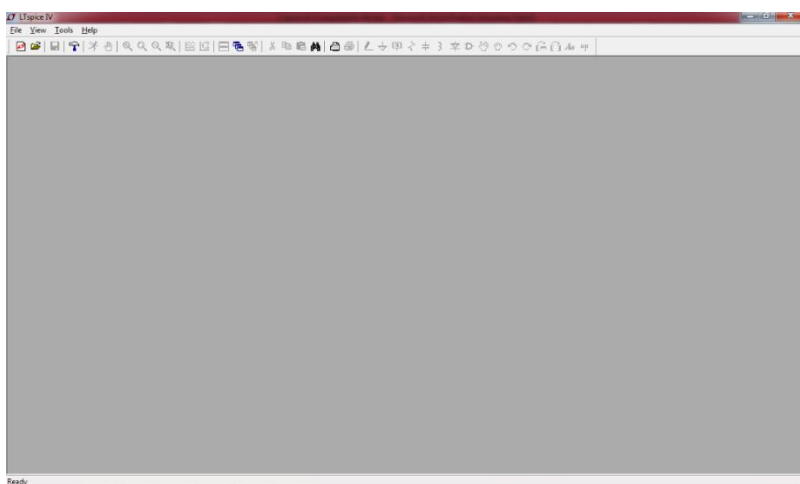
a)



b)

Slika D1.1 Instalacija programa LTspice: a) početni prozor, b) završetak instalacije

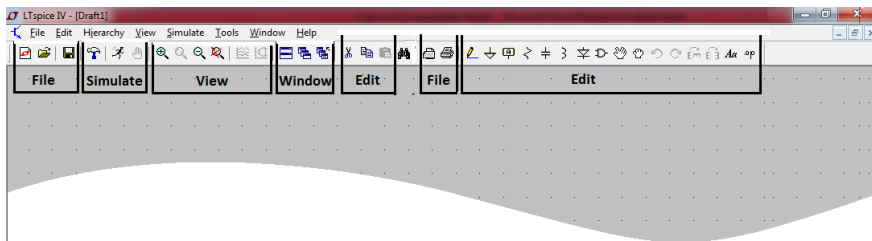
uslovi korišćenja programa i bira lokacija na disku gde će program biti instalisan. Izborom opcije Install Now pokreće se automatski instalacija, a po njenom završetku, program će biti spreman za korišćenje. Ubuduće ikonica  označava lokaciju sa koje se može pokrenuti program LTspice. Nezavisno od toga, posle instalacije program se automatski otvara, a na ekranu se pojavljuje prozor sa sl. D1.2.



Slika D1.2. Početni prozor po pokretanju programa LTspice

U drugom redu GKL nalaze se ikonice preko kojih se upravlja radom programa LTspice.

Opis kola svodi se na crtanje električne šeme. Postupak počinje izborom ikonice iz gornjeg levog ugla ekrana (krajnje levo u GKL). Tada se pojavljuje prozor u kome su aktivne ikonice za unos električne šeme kao što pokazuje sl. D1.3. Primećuje se da je prvi red GKL izmenjen, time što počinje ikonicom koja označava da se edituje električna šema. Pored toga, proširena je lista opcija. Njihovo aktiviranje otvara padajuće menije

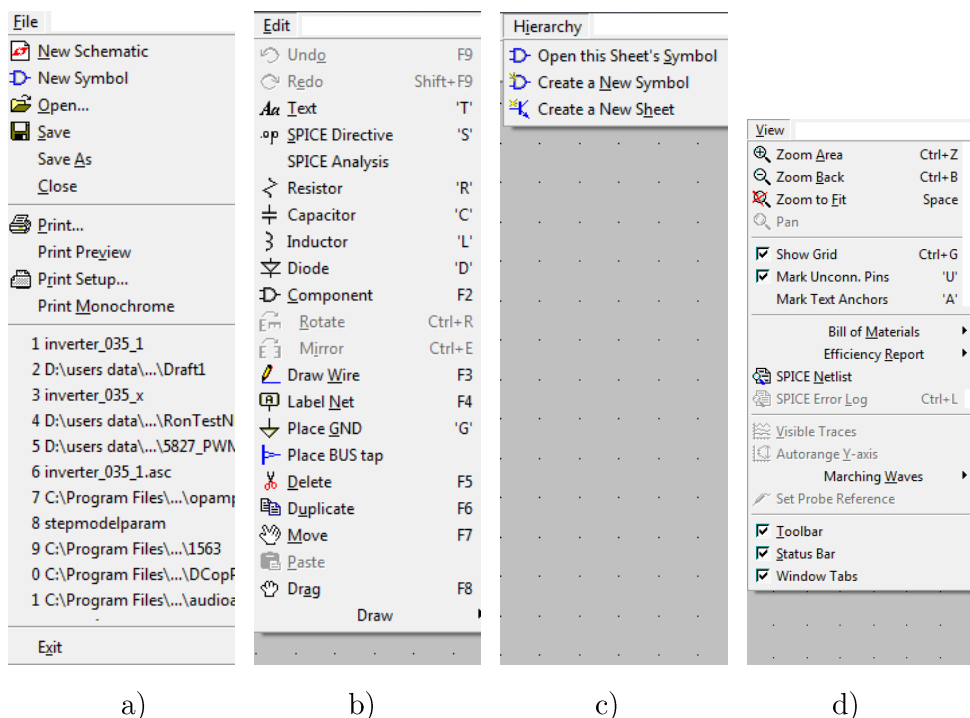


Slika D1.3. Prozor u kome se crta električna šema

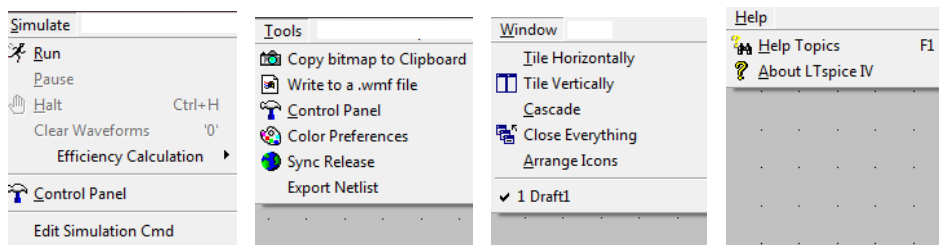
D1.3. Opis kola – unos električne šeme

prikazane na sl. D1.4 i sl. D1.5. Određeni broj komandi koje se najčešće koriste prilikom crtanja električne šeme, direktno su dostupne u drugom redu komandne linije, preko odgovarajućih ikonica. Na sl. D1.3 vidi se da su te ikonice grupisane tako da odgovaraju menijima sa sl. D1.3 i D1.4. Značenje svih ikonica i odgovarajuća prečica u vidu slova sa tastature naznačeni su na sl. D1.4.

Crtanje šeme počinje postavljanjem pojedinih elemenata kola. U primeru koji sledi, nacrtaćemo CMOS invertor sa parametrima tranzistora realizovanih u tehnologiji CMOS 0,35 μm koji se ne nalaze u standardnoj biblioteci koja stiže uz LTspice. Zato je neophodno da se biblioteka proširi odgovarajućim modelima.



Slika D1.4. Sadržaji menija Edit, File, Hierarchy i View



b)

c)

d)

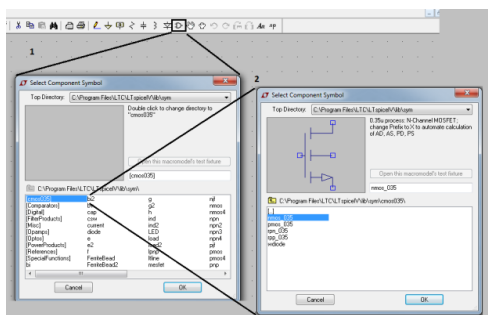
Slika D1.5. Sadržaji menija Simulate, Tools, Window i Help

Dodavanje novih modela u LTspice veoma je jednostavno. Obavlja se u dva koraka:

- dodati tekstualni fajl u kome se nalazi opis potkola (naredba .sbckt) i modela nMOS i pMOS tranzistora sa ekstenzijom .lib (u konkretnom slučaju fajl „cmos035.lib”) u datoteku C:\Program Files\LTC\LTspiceIV\lib\sub i
- dodati datoteku koja sadrži fajlove sa opisom simbola nMOS i pMOS tranzistora „nmos_035.asy” i „pmos_035.asy” (u konkretnom slučaju datoteka „cmos035”) datoteci C:\Program Files\LTC\LTspiceIV\lib\sym.

Valja napomenuti da je neophodno da se linija **.lib cmos035.lib** nađe u opisu kola u kojima se ovi tranzistori koriste.

Sada može da se počne sa unosom šeme. Najpre se izabere odgovarajuća komponenta iz menija *Edit* ili direktno levim klikom miša na ikonicu iz drugog reda komandne linije. U našem slučaju to je  (Component). Otvori se meni sa sl. D1.6.

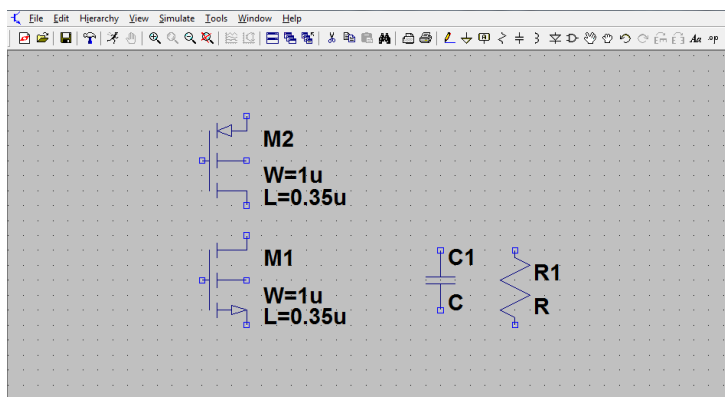


Slika D1.6. Postupak izbora komponente nmos_035

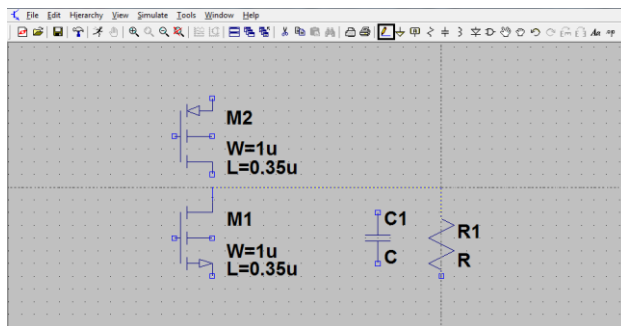
D1.3. Opis kola – unos električne šeme

Postavljanje komponente nMOS obavlja se u dva koraka. Najpre se dvostrukim klikom izabere folder “cmos035” (označen sa 1 na sl. D1.6), a onda se, u njemu, izabere “nmos_035”. Time se automatski prenosi simbol nMOS tranzistora na radnu površinu. On prati pokrete miša sve dok se levim klikom ne postavi na željenu poziciju. Pre toga, njegova orijentacija može se menjati izborom opcija  za okretanje i  za mirorovanje. Ista komponenta dostupna je dokle god se ne pritisne desni taster. Zatim se može izabrati nova komponenta. U konkretnom slučaju to je pMOS tranzistor. Po pozicioniranju tranzistora postavljamo paralelnu vezu C_p i R_p kao impedansu opterećenja. Ovo se najlakše izvodi izborom ikonice  za kondenzator, odnosno  za otpornik. Po postavljanju na radnu ploču dobija se pozicija prikazana na sl. D1.7.

U sledećem koraku treba povezati razmeštene komponente. Izborom ikonice  startuje se alat za povezivanje koji crta prave linije između dva pina (pinovi su predstavljeni plavim kvadratima). Veliku pomoć predstavlja kursor u obliku krsta iscrtan isprekidanim linijama koje prekrivaju celu radnu površinu, kao što pokazuje sl. D1.8. Po povezivanju svih pinova treba dodati referentni čvor, odnosno masu. To je najjednostavnije izborom komponente sa ikonice .



Slika D1.7. Izgled radne površine po postavljanju svih komponenata



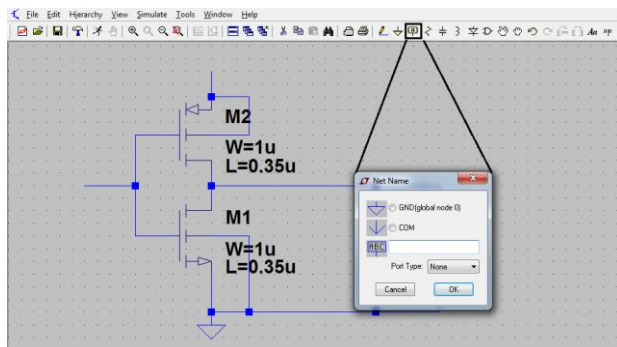
Slika D1.8. Aktivirana opcija za povezivanje pinova

Da bi se završila električna šema, treba dodati izvore za napajanje. Dobro je da se oni priključe preko čvorova sa nazivima koji asociraju na njihovu ulogu u kolu. Ukoliko se to ne uradi, program sam dodeljuje nazive čvorovima počev od čvora sa oznakom *n001*, redom.

Da bi se imenovali čvorovi, odnosno da bi im se dala stvarna imena, treba izabrati ikonicu . Tada se otvara meni sa sl. D1.9. U njemu može da se upiše naziv čvora i/ili da se dodeli tip čvora iz menija *Port Type*. Podrazumevana vrednost je *None*, što ukazuje na običan čvor. Alternativno port može biti deklarisan kao: ulazni, izlazni, ili bidirekcioni. Potom definišemo nazive čvorova:

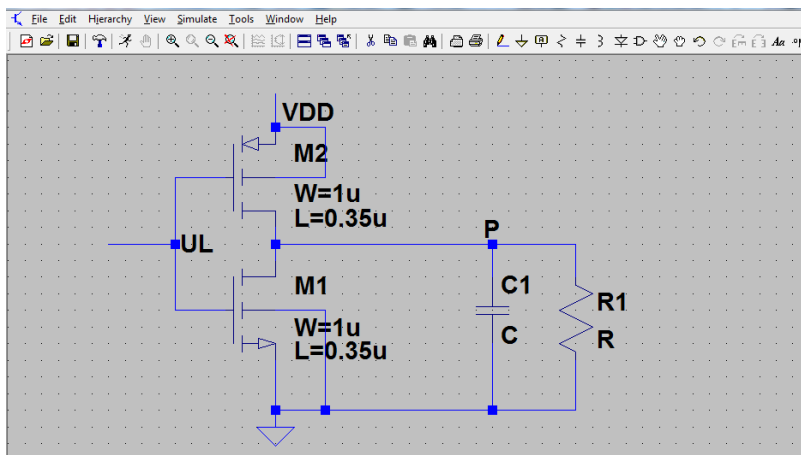
- VDD za napajanje,
- UL, za ulazni,
- P za izlazni čvor za koji je vezano opterećenje.

Rezultat dodeljivanja naziva čvorovima prikazan je na sl. D1.10.



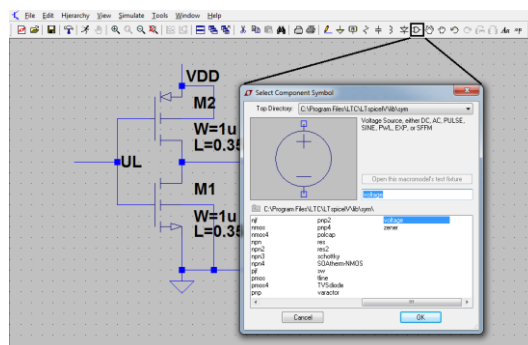
Slika D1.9. Dodeljivanje tipa i naziva čvora

D1.3. Opis kola – unos električne šeme

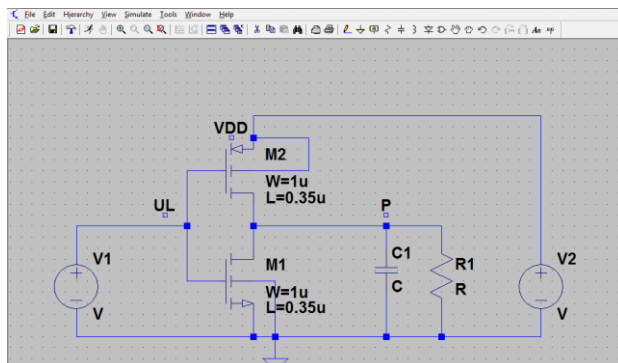


Slika D1.10. Električna šema posle dodeljivanja naziva čvorova i mase

Konačno, treba povezati izvore za napajanje. Vezaćemo izvor jednosmernog napajanja $V_{DD}=3.3$ V i pobudni generator V_g . Za početak, definisamo V_g tako da ima samo jednosmernu vrednost, a zavisno od tipa analize, biće mu dodeljene druge vrednosti. Kao i sve ostale komponente, biranje naponskog generatora počinje pretragom u meniju koji se otvara nakon selektovanja . U ponuđenoj listi (videti sl. D1.6) treba naći ključnu reč *Voltage*. Budući da su folderi i komponente sortirani po azbučnom redu, treba klizač sa dna menija pomeriti krajnje udesno. Tada se selektuje željena komponenta. Slika D1.11 prikazuje postupak izbora.



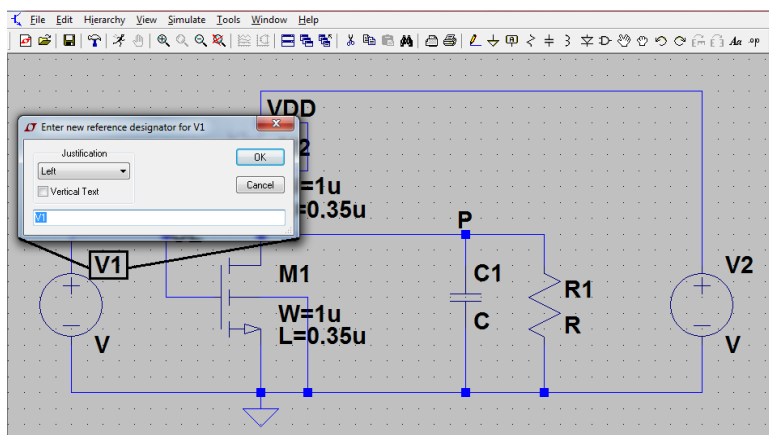
Slika D1.11. Poziv komponente *Voltage* za nezavisne naponske izvore



Slika D1.12. Povezivanje *Voltage* za nezavisne izvore napona

Posle selektovanja postavimo oba generatora na odgovarajuće pozicije i povezujemo sa čvorovima UL i VDD, redom. Slika D1.12 prikazuje tekuće stanje na radnoj površini.

Korisno je da se komponentama dodele nazivi koji asociraju na njihovu ulogu u kolu. Dovoljno je da se kursorom priđe uz oznaku koju treba promeniti i da se klikne desni taster. Tada se otvara meni u kome se prethodna oznaka može zameniti novim tekstom. Na sl. D1.13 prikazan je postupak zamene oznake *V1* oznakom *Vg*: priđe se kursorom uz oznaku *V1* na šemi; pritiskom na desni taster miša, automatski se otvori meni u kome se nalazi postojeća oznaka komponente. U našem slučaju to je *V1*. Preko ove vrednosti ukuca se nova, u našem slučaju, *Vg*. Na sličan način izmenjena je oznaka za *V2* u *VDD*, *R1* u *Rp* i *C1* u *Cp*. Zadržane su oznake tranzistora M1 i M2.



Slika D1.13. Promena naziva komponente V1

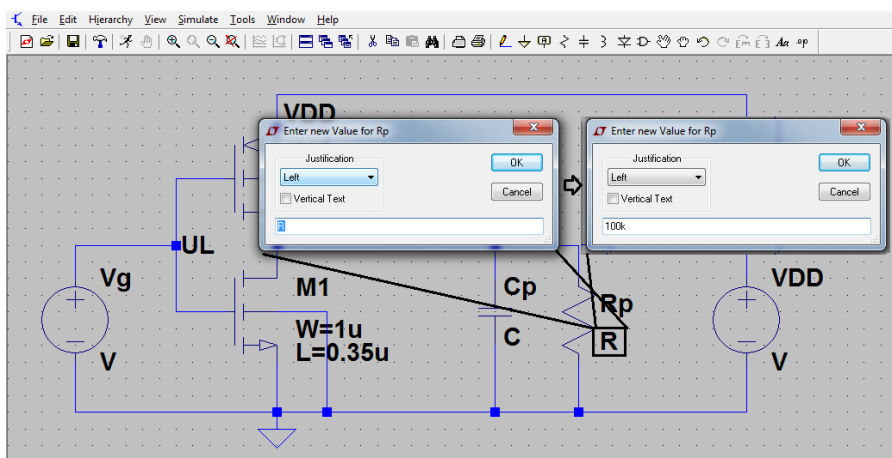
D1.3. Opis kola – unos električne šeme

Dobro je da prvo slovo u oznaci odgovara tipu elementa prema tabeli D1.1 (R za otpornik, C za kondenzator,...). Ukoliko se i odstupa od toga, SPICE će automatski dodeliti odgovarajuće slovo kao prefiks u definisanju komponente preko net liste. Iza njega sledi simbol **S**, a u nastavku će se pojaviti ime koje je dodelio korisnik. Na primer, ukoliko bi se tranzistor M1 nazvao Tran1, njegovo ime u net listi biće **M\$Tran1**.

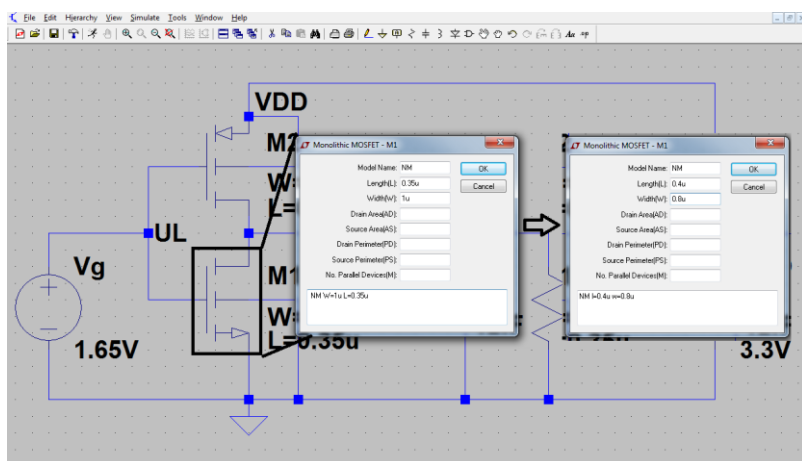
Potrebno je definisati vrednosti parametara za svaku komponentu. Najjednostavnije je da se priđe kursorom uz oznaku vrednosti parametra i klikne desni taster miša. Tada se otvara meni prikazan na sl. D1.14 za slučaj promene vrednosti parametra R_p . Tada je potrebno simbol R zameniti stvarnom vrednošću otpornosti. U konkretnom slučaju to je $100\text{ k}\Omega$. Na isti način promenjena je vrednost generatora V_{DD} sa V na 3.3 V , generatora V_g sa V na 1.65 V , kapacitivnost C_p sa C na 12 fF .

Alternativni način za promenu vrednosti parametara modela komponente jeste da se priđe kursorom do grafičkog simbola komponente, a ne vrednosti parametra. Tada kursor promeni formu i iz strelice pređe u kažiprst: . Desnim klikom otvara se meni za podešavanje parametara komponente.

Na sl. D1.15 prikazan je meni za promenu parametara modela nMOS tranzistora M1. Dužina kanala L promenjena je u $0.4\mu\text{m}$, a širina W u $0.8\mu\text{m}$.

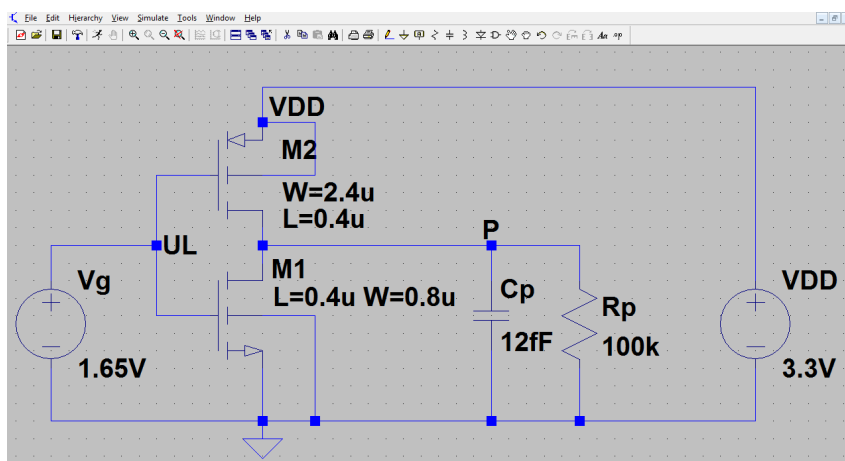


Slika D1.14. Promena vrednosti otpornosti komponente R_p



Slika D1.15. Promena vrednosti parametara MOS tranzistora

Na isti način promenjena je vrednost dužine kanala tranzistora M2 na $L=0.4 \mu\text{m}$ i širina na $W=2.4 \mu\text{m}$. (Ova širina izabrana je imajući u vidu da je pokretljivost šupljina približno tri puta manja od pokretljivosti elektrona u $0.35 \mu\text{m}$ tehnologiji, tako da bi za istu otpornost trebalo izabrati tri puta širi tranzistor; dužina kanala od $0.4 \mu\text{m}$ izabrana je da bi odgovarala minimalnoj širini polisilicijumskog gejta od 2λ pri čemu je $\lambda=0.2 \mu\text{m}$; efekat skraćanja kanala uvrštena je u model MOSFETA). Konačno dobija se električna šema prikazana na sl. D1.16. Treba napomenuti da se vrednost parametara L i W može menjati na isti način kao što je to učinjeno za R_p .



Slika D1.16. Konačni izgled električne šeme CMOS invertora

D1.3. Opis kola – unos električne šeme

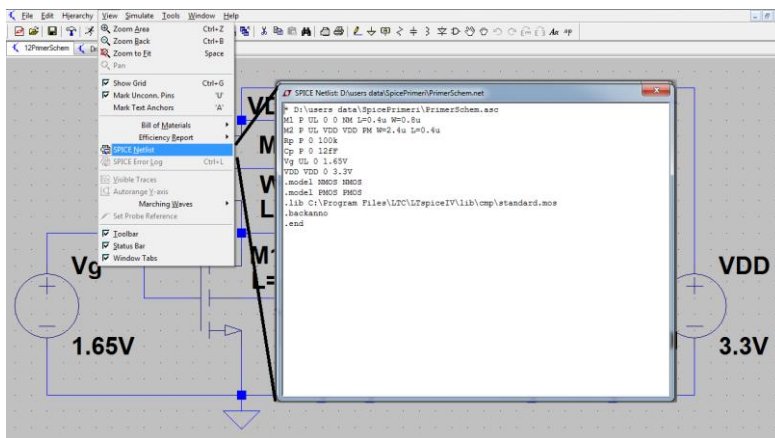
Važi i obrnuto, kada se pristupi simbolu komponente, recimo Rp , otvara se meni u kome se mogu menjati parametri modela otpornika, koji sem otpornosti u omima, obuhvataju tolerancije i nominalnu snagu. Isto važi i za ostale komponente. Takođe se skreće pažnja da se prefiksi jedinica za oznake vrednosti odgovaraju standardima prikazanim u tabeli 3. Takođe, valja napomenuti da SPICE ne prepoznaje mala i velika slova, tako da 1 nF i 1 NF imaju isto značenje 10^{-9} F, odnosno 1 E-9F.

Tabela D1.3 Značenje prefiksa jedinica mere u programu SPICE

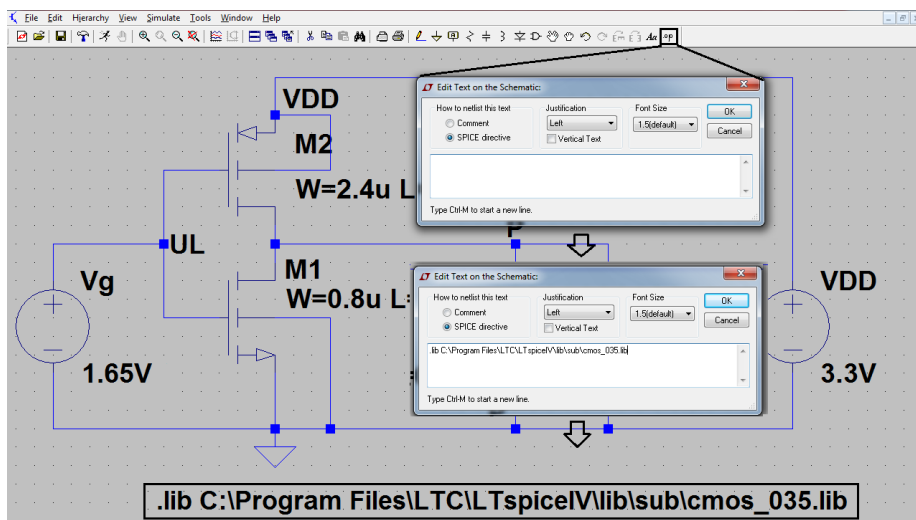
Slovo	f	p	n	u	m	k	MEG	G	T
Značenje	femto	piko	nano	mikro	mili	kilo	mega	giga	tera
Vrednost	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9	10^{12}

Posle unosa električne šeme može se generisati net lista izborom opcije *SPICE Netlist* iz *View* menija, kao što se vidi sa sl. D1.17.

Sada je očigledno da se električna šema preslikava u tekstualni fajl koji počinje linijom komentara (automatski generisana kao lokacija fajla u računaru), nastavlja se opisom topologije sa nazivima elemenata, oznakama čvorova između kojih su vezani i vrednostima njihovih parametara. Zatim slede: pozivi modela nMOS i pMOS tranzistora, poziv na biblioteku standard.mos, naredba .backanno i završna naredba .end. Vidi se da nije uključena biblioteka cmos035.lib u kojoj se nalaze parametri

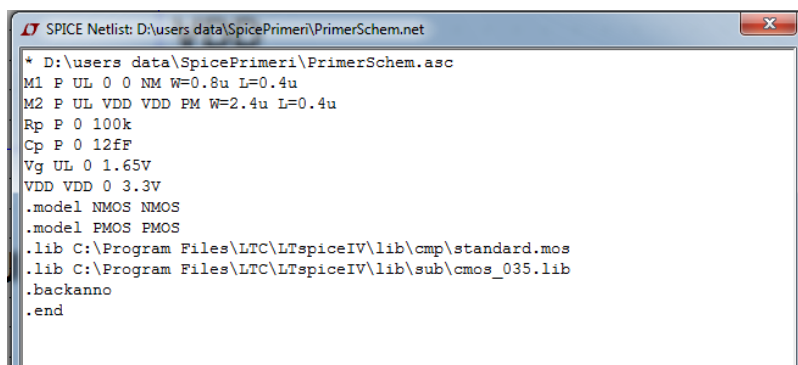


Slika D1.17. Generisanje net liste na osnovu električne šeme



Slika D1.18. Upis naredbe za pozivanje sadržaja biblioteke `cmos_035.lib` tranzistora za CMOS 0.35 μm tehnologiju. Zato je, pre početka analize, neophodno da se doda naredba `.lib` uz navođenje lokacije fajla `cmos_035.lib`:

`C:\Program Files\LTC\LTspiceIV\lib\sub\cmos_035.lib`. Ovo se obavlja jednostavno aktiviranjem ikone  čime se otvara meni za upis komandnih linija, kao što prikazuje sl. D1.18. Uneti tekst se preslikava u kursor, tako da se može proizvoljno postaviti ma gde na radnoj površini. Kao konačan rezultat dobija se net lista sa sl. D1.19 na osnovu koje se može obaviti proizvoljna analiza kola.



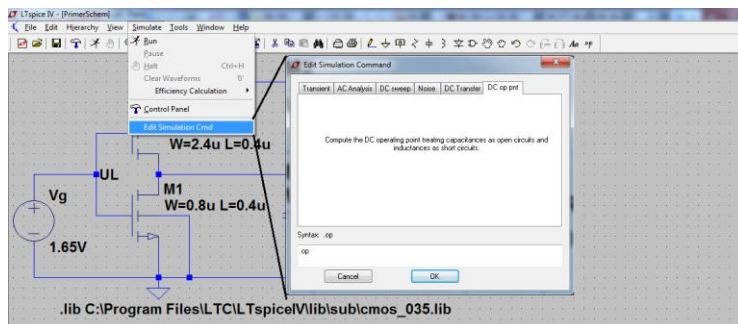
Slika D1.19. Konačni izgled net liste generisane na osnovu nacrtane šeme

D1. 4. Analiza kola

Programu za analizu kola pristupa se izborom opcije *Edit Simulation Cmd* iz menija *Simulate*. Tada se otvara prozor *Edit Simulation Command* što znači editovanje naredbi za simulaciju. Iz njega se mogu birati svi tipovi analize:

1. Analiza u jednosmernom domenu – DC omogućava:
 - Izračunavanje svih napona i struja u kolu u radnoj tački (engl. *Operational Point*) – naredba `.op`,
 - Izračunavanje DC prenosne funkcije (engl. *Transfer Function*), odnosno izvoda (koeficijent osetljivosti) izlazne promenljive na promenu ulazne veličine, ulazne i izlazne otpornosti – naredba `.tf`
 - Skiciranje DC karakteristika u zavisnosti od promene vrednosti DC izvora u specificiranim granicama, skaliranje vrednosti na engleskom se naziva *Sweep* pa se ova opcija naziva *DC sweep* – naredba `.dc`
2. Analiza u frekvencijskom domenu –AC omogućava:
 - Skiciranje frekvencijskih karakteristika – naredba `.ac`
 - Analiza šuma (engl. *Noise*) – naredba `.noise`
3. Analiza u vremenskom domenu – TR omogućava
 - Skiciranje talasnih oblika napona i struja u prelaznim režimima (engl. *Transient*) – naredba `.tran`.

Slika D1.20 ilustruje postupak otvaranja i izgled prozora u kome se specificira tip analize.



Slika D1.20. Otvaranje i izgled prozora u kome se specificira tip analize

S obzirom da se sve naredbe za definisanje tipa analize pojavljuju na radnoj površini, dobro je da se izborom ikone  umanju površina koju zauzima električna šema i stvori prostor za praćenje ostalih naredbi. Umanjena šema može se pomeriti po radnoj površini ukoliko se izabere ikonica . Tada se levim tasterom miša označi jedan ugao površine koja treba da se pomera i, dok se drži taster, pomera se miš dok se pravougaonikom od isprekidanih linija ne obuhvate svi elementi koje treba pomeriti. Opuštanjem levog tastera, celokupna obuhvaćena površina pomera se kao kursor. Kada se pronađe željena pozicija, aktivira se levi taster miša i deaktivira se pomeranje. Ovo je urađeno na sl. D1.20, tako da se na njoj vidi efekat opisanih radnji.

U ovom prozoru nude se opcije pod nazivima

- *Transient* (za `.tran`),
- *AC Analysis* (za `.ac`),
- *Noise* (za `.noise`),
- *DC op pnt* (za `.op`),
- *DC sweep* (za `.dc`) i
- *DC transfer* (za `.tf`).

Selekcijom svake opcije otvara se poseban prozor u kome je dat kratak opis tipa analize, a zatim i polja preko kojih se zadaju parametri specifični za odabrani tip analize.

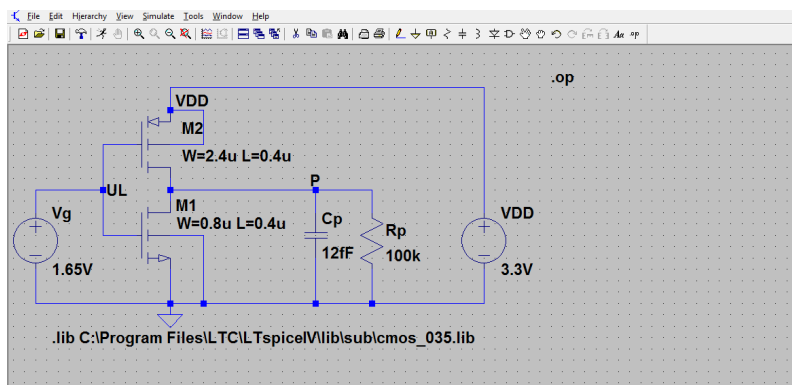
D1.4.1. DC analiza

DC radna tačka – *DC op pnt*

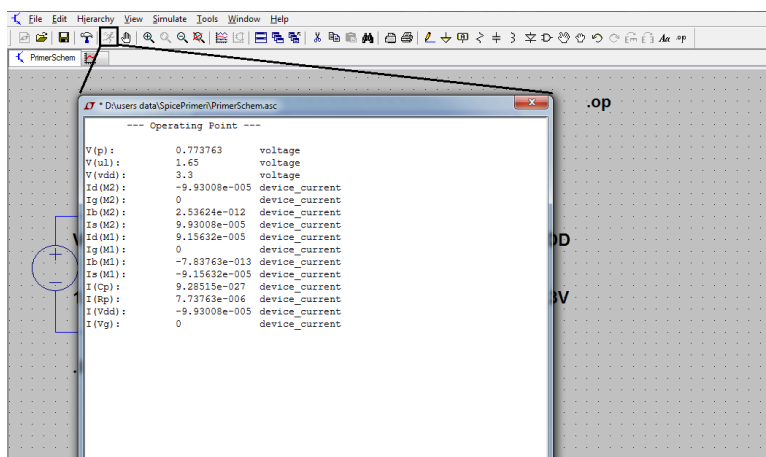
Selekcijom opcije *DC op pnt* iz menija za izbor tipa analize, na radnoj površini pored električne šeme pojavljuje se naredba `.op` koja se mišem može proizvoljno pozicionirati i postaviti klikom na levi taster miša. Kao rezultat dobija se radna površina sa sl. D1.21. Naredba `.op` postavljena je u gornji desni ugao ekrana.

Na ovaj način, net listi sa sl. D1.19, dodata je linija u kojoj se nalazi naredba `.op`. Da bi se obavila analiza, treba selektovati ikonicu  iz

D1. 4. Analiza kola



Slika D1.21. Rezultat selektovanja opcije *DC op pnt*



Slika D1.22. Rezultat analize *.op*

drugog reda komandne linije. Rezultat ove analize pojavljuje se trenutno, u novom prozoru. U njemu su navedene vrednosti svih napona čvorova i struja u kolu kao što pokazuje sl. D1.22.

Prozor se uklanja sa ekrana selektovanjem ikonice  u gornjem desnom uglu (kao kod većine Windows aplikacija). Tada je LTspice spreman za novu analizu.

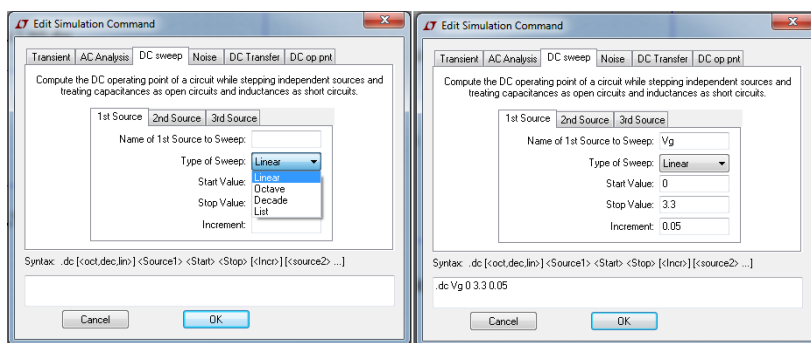
Skaliranje vrednosti generatora – *DC sweep*

Ukoliko se u prozoru za zadavanje tipa analize selektuje DS sweep, otvara se prozor u kome se zadaju parametri ove analize, odnosno navode

se generatori čija se DC vrednost menja. Aktiviranje prozora za *DC sweep* prikazano je na sl. D1.23a. U njega se unosi:

- naziv izvora koji menja vrednost (konkretno u primeru to je V_g),
- tip promene vrednosti (engl. *Type of Sweep*) – iz padajuće liste prikazane na sl. D1.23a bira se jedan od mogućih opcija: linearna (engl. *Linear*), logaritamska po dekadi (engl. *Decade*), logaritamska po oktavi (engl. *Octave*) ili u obliku liste (engl. *List*) (u konkretnom slučaju izabrana je linearna),
- početna vrednost (u primeru to je 0 V),
- krajnja vrednost (u primeru to je 3.3 V) i
- korak linearne promene (u primeru to je 0.05 V), odnosno broj tačaka po dekadi (*Decade*) ili broj tačaka po oktavi (*Octave*), pri logaritamskoj promeni ili se zadaje lista vrednosti (*List*). (Može se zadati promena vrednosti do, najviše, tri generatora u kolu).

U dnu prozora pojavljuje se izgled komande `.dc` koji će se upisati na šemi. Po završenom unosu podataka selektuje se OK, prozor se gasi, a komandna linija preslikava se u kursor. Postavi se linija na željenu poziciju na ekranu i pritisne levi taster miša. Tada se automatski prethodna naredba za opis analize (`.op`) pretvara u komentar dodavanjem “;” na početku, a naredba `.dc Vg 0 3.3 0.05` dodaje se net listi. Izgled ekrana po završetku ove aktivnosti prikazan je na sl. D1.24.

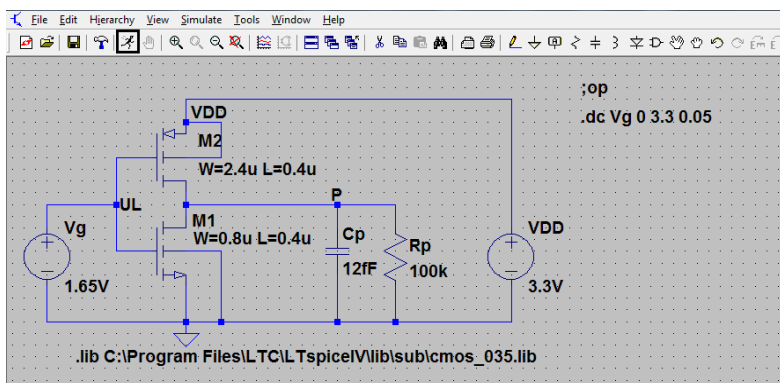


a)

b)

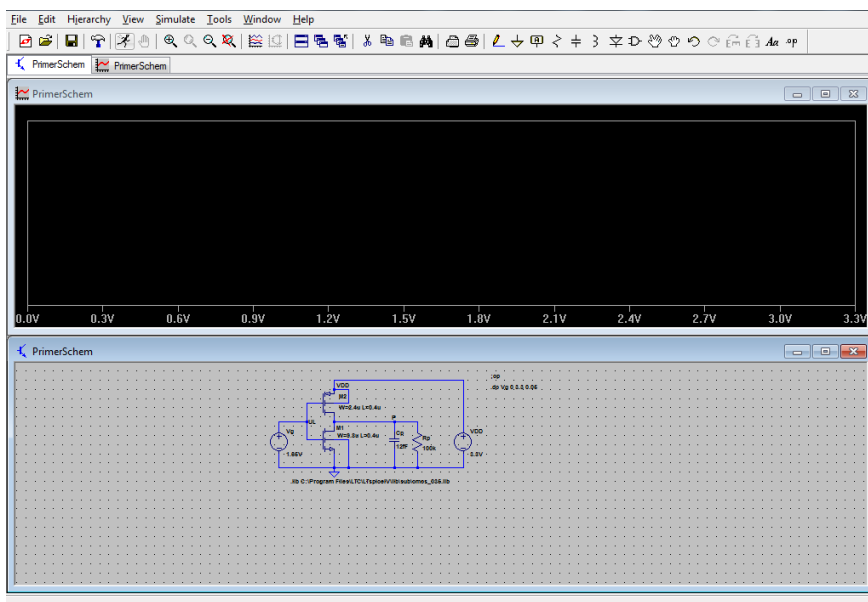
Slika D1.23. Izgled prozora za podešavanje parametara *DC sweep* analize: a) osnovni prozor, b) popunjene vrednosti za generator V_g

D1. 4. Analiza kola



Slika D1.24. Rezultat selektovanja opcije *DC sweep*

Analiza se aktivira preko ikonice . Kada se analiza završi, osim prozora sa električnom šemom, pojavljuje se novi prozor “virtuelni osciloskop”, u kome se grafički prikazuje zavisnost napona i struja u kolu od promene izabranog generatora. Izgled ekrana prikazan je na sl. D1.25. Primećuje se da je glavna komandna linija proširena dodatnim redom u kome se prikazuju svi otvoreni prozori.

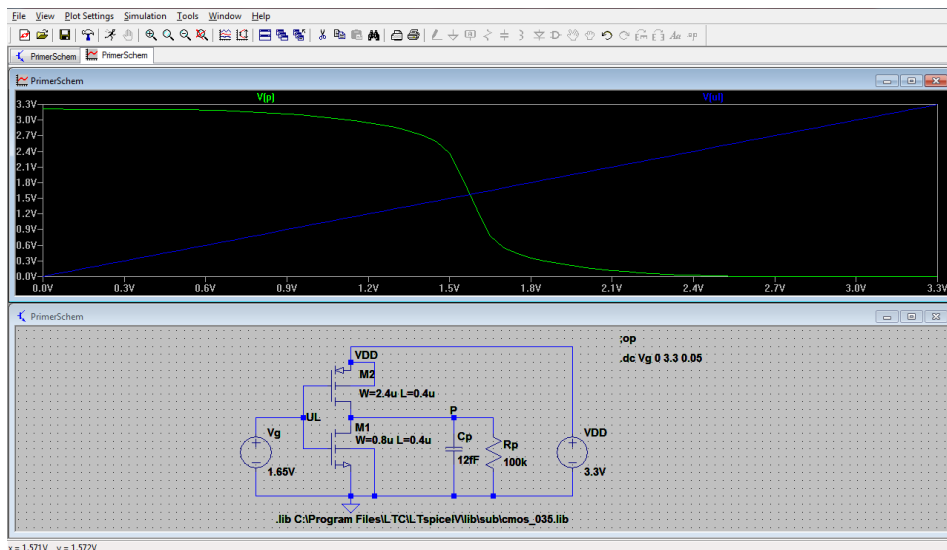


Slika D1.25. Izgled ekrana po završetku *DC sweep* analize

Prozore za električnu šemu označava ikonica , dok ikonica  označava prozor za grafičku obradu rezultata. Veličina i lokacija električne šeme na radnoj površini može da se koriguje korišćenjem ikonice za uvećanje  i pomeranje .

Izbor promenljive koja se prikazuje obavlja se veoma jednostavno. Kada se priđe kursorom uz neki čvor, on menja izgled u sondu osciloskopa: . Levim tasterom selektuje se napon čiju grafičku interpretaciju želimo. Za nas je interesantno da posmatramo napone u čvorovima P i UL. Na ekranu virtuelnog osciloskopa iscertava se, u različitim bojama, zavisnost napona u navedenim čvorovima, označeni kao $V(p)$ i $V(ul)$, od promene V_g , kao što pokazuje sl. D1.26. Na istoj slici vidi se efekat uvećanja i pomeranja pozicije električne šeme u odnosu na onu prikazanu na sl. D.1.25.

Od značaja je da se prikaže tačka u kojoj dolazi do invertovanja, stanja na izlazu invertora, odnosno najstrmija tačka na prenosnoj karakteristici. Ona se nalazi u preseku prave $V(ul)$ sa prenosnom karakteristikom $V(p)$.



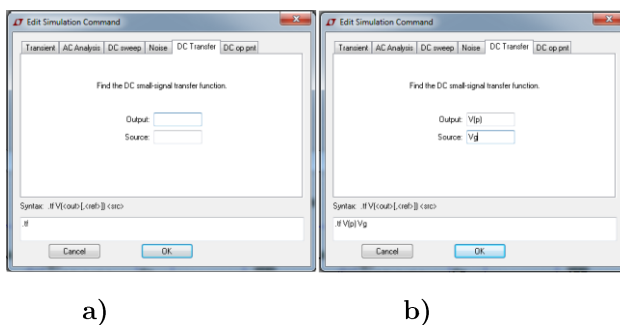
Slika D1.26 Prikaz rezultata *DC sweep* analize

D1. 4. Analiza kola

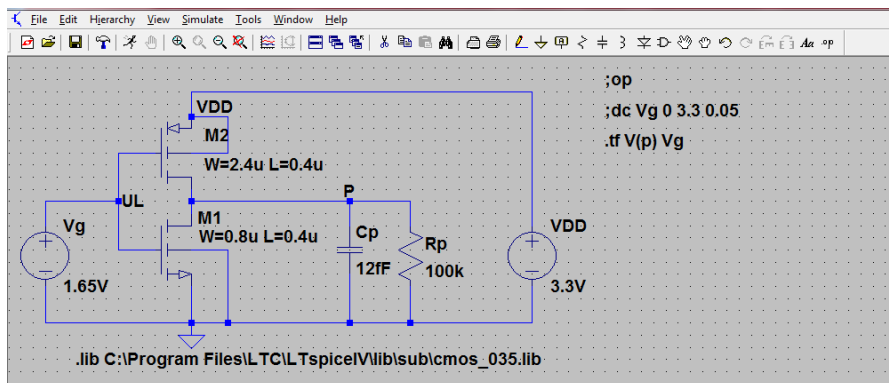
Da bismo utvrdili koliki je taj napon, dovoljno je da se kursor postavi na poziciju preseka. Tada se u donjem levom uglu pojavljuju koordinate $x=1.571$ V $y=1.572$ V. One ukazuju da bi umesto $V_g=1.65$ V koliko je usvojeno kao $VDD/2$ bilo povoljnije, sa stanovišta malosignalnog naponskog pojačanja, da se postavi $V_g=1.571$ V. Preciznije koordinate mogu se dobiti ukoliko se ikonica za uvećanje  primeni na virtuelni osciloskop. Tada se kursorom u obliku lupe može selektovati pravougaonik na grafiku u kome se traži povećanje. Pravougaonik se selektuje pritiskom na levi taster na poziciji jednog ugla željenog pravougaonika i povlačenjem kursora uz pritisnuti levi taster do pozicije dijagonalno suprotnog ugla. Otpuštanjem tastera na ekranu se dobija uvećani grafik. Povratak na početnu veličinu obavlja se jednim aktiviranjem ikonice , ili višestrukim aktiviranjem ikonice za umanjeње . Ovo važi generalno za uvećanje/umanjenje nezavisno da li se radi o prozoru za električnu šemu ili grafičko prikazivanje rezultata simulacije.

DC prenosna funkcija – *DC transfer*

Selekcijom opcije *DC transfer* iz menija u kome se specificira tip analize (sl. D1.20), otvara se prozor za definisanje parametara naredbe `.tf` koji je prikazan na sl. D1.27a. Shodno opisu iz tabele 2, potrebno je navesti naziv izlaznog napona i naziv generatora u odnosu na koji se traže parametri prenosne funkcije. U primeru sa sl. D1.27b unet je napon u čvoru P kao vrednost izlaznog napona, $V(p)$, a ulazna promenljiva je izvor konstantnog napona V_g .

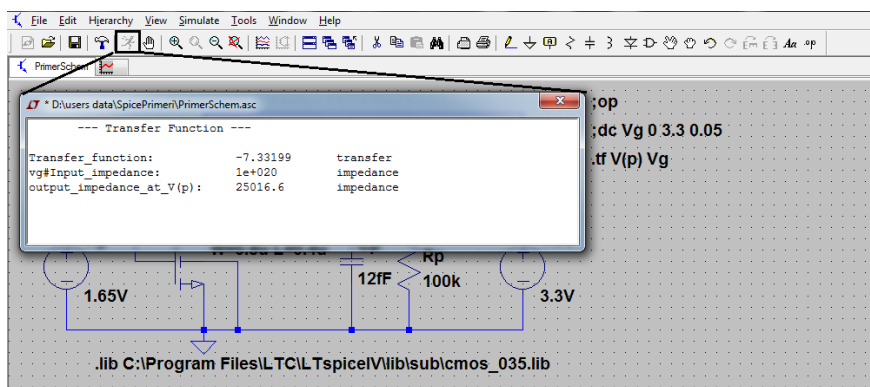


Slika D1.27. Prozor za podešavanje parametara *DC transfer* analize: a) osnovni prozor, b) popunjene vrednosti $V(p)$ i V_g

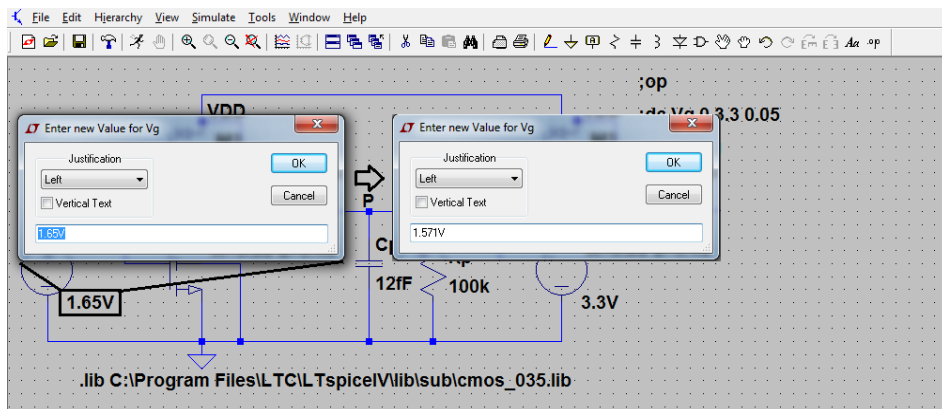
Slika D1.28. Rezultat selektovanja opcije *DC transfer*

U dnu prozora pojavljuje se izgled komande `.tf` koji će se upisati na šemi. Po završenom unosu, treba selektovati *OK*, čime se prozor gasi, a komandna linija preslikava u kursor koji se pozicionira na željenu lokaciju i fiksira pritiskom levog tastera miša. Tada se, automatski, prethodna naredba za opis analize (`.dc`) pretvara u komentar dodavanjem “;” na početku, a naredba `.tf V(p) Vg` dodaje se net listi. Izgled ekrana po završetku ove aktivnosti prikazan je na sl. D1.28.

Kao i ranije, simulacija se pokreće aktiviranjem ikonice . Rezultat se pojavljuje u posebnom prozoru prikazanom na sl. D1.29. Vidi se da je prenosna funkcija, u ovom slučaju to je naponsko pojačanje, $dV(P)/dV_g = -7.33199$, dok je ulazna impedansa $1E20 = 10^{20} \Omega$, praktično beskonačna, a izlazna 25016.6Ω .

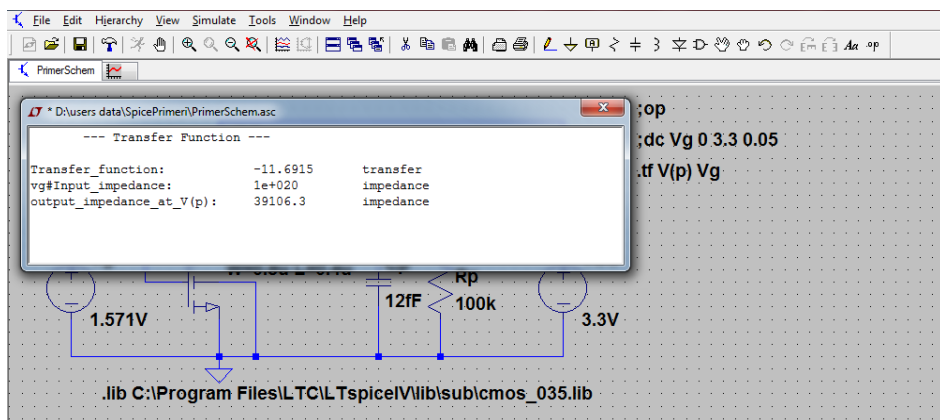
Slika D1.29. Rezultat *DC transfer* analize

D1. 4. Analiza kola



Slika D1.30. Promena vrednosti generatora V_g

Istu analizu ponovimo za slučaj da je napon na ulazu $V_g=1.571\text{V}$, jer rezultat iz prethodnog primera ukazuje da se u toj tački može očekivati veće pojačanje. Da bi se promenila vrednost V_g , pride se kursorom do vrednosti koju treba promeniti i, u novootvorenom prozoru, upiše se nova vrednost, kao što pokazuje sl. D1.30. Posle prihvatanja promene (selektovati *OK*), program je spreman za novu analizu. Aktiviranje ikonice  daje nove parametre *DC transfer* analize prikazane na sl. D1.31. Očigledno je da je u novoj radnoj tački naponsko pojačanje povećano na -11.6915 , ulazna otpornost MOS tranzistora se nije promenila, a izlazna je porasla na $39106.3\ \Omega$.



Slika D1.31. Rezultat *DC transfer* analize sa $V_g=1.571\text{ V}$

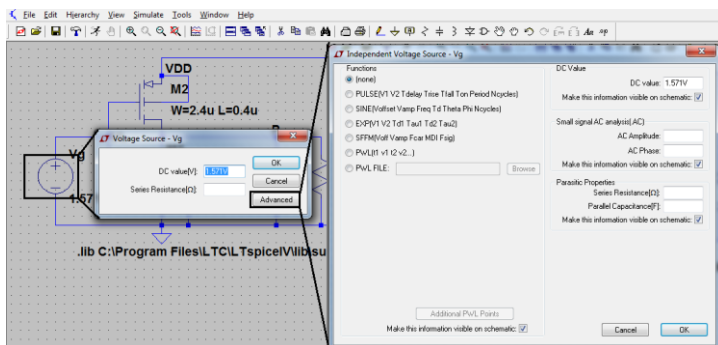
D1.4.2. AC analiza

Skiciranje frekvencijskih karakteristika – .ac

Pre početka AC analize treba pobudnom generatoru, V_g , dodati i naizmeničnu komponentu. Zato se priđe mišem do komponente V_g dok se ne pojavi kursor u obliku kažiprsta . Tada se desnim klikom otvara meni za promenu parametara generatora. Izabere se opcija naprednog podešavanja (eng. *Advanced*), čime se otvara prozor sa sl. D1.32, koji omogućava promenu svih parametara nezavisnog naponskog generatora.

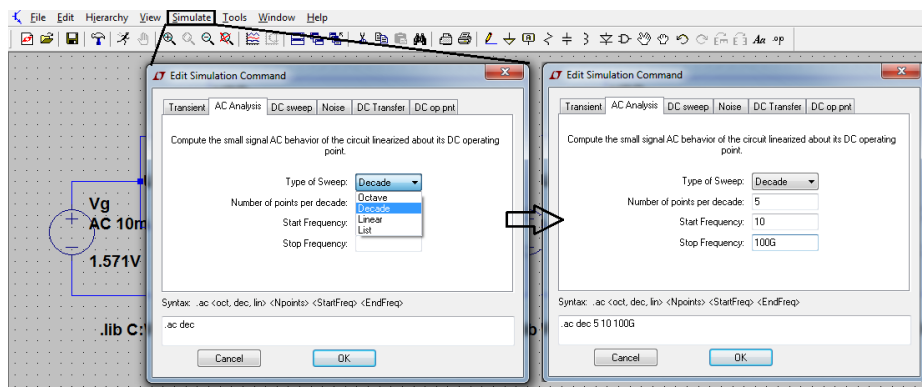
AC analiza koristi linearne modele za male signale. Zato je irelevantna vrednost amplitude pobudnog napona. U većini slučajeva najpogodnije je da se izabere amplituda 1 V, kako bi izlazne veličine odgovarale pojačanju. Ipak, iz edukativnih razloga koji će biti kasnije objašnjeni, postavljamo amplitudu na 10 mV. Fazni stav neka bude 0, a rednu otpornost i paralelnu kapacitivnost ignorišemo. Da bi se zapamtile izmene, treba selektovati *OK*.

Osnovni tip AC analize odnosi se na skiciranje frekvencijskih karakteristika simuliranog kola. Da bi se on aktivirao potrebno je da se iz menija *Simulate* selektuje *Edit Simulation Cmd* čime se otvara prozor za podešavanje tipa simulacije. U njemu se iz opcije *AC Analysis* pristupa meniju za podešavanje parametara AC simulacije. Iz padajućeg menija bira se tip promene frekvencije (engl. *Type of Sweep*) koji može biti (slično opisanom u slučaju *DC sweep*) zadat: po dekadi, po oktavi, linearno ili iz liste. Zavisno od izabranog tipa, moguće je uneti broj tačaka po dekadi, po oktavi ili ukupan broj tačaka, ukoliko je skala promene frekvencije linearna. Takođe, postoje polja za definisanje početne (engl. *Start Frequency*) i završne (engl. *Stop Frequency*) frekvencije.



Slika D1.32. Unos proširenih parametara nezavisnog generatora napona

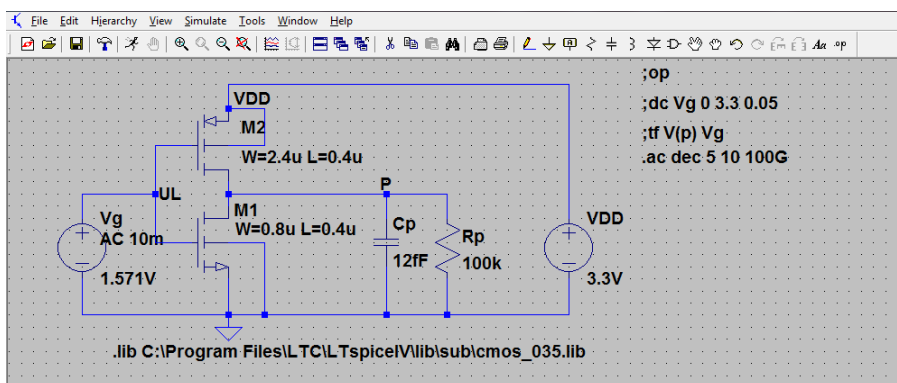
D1. 4. Analiza kola



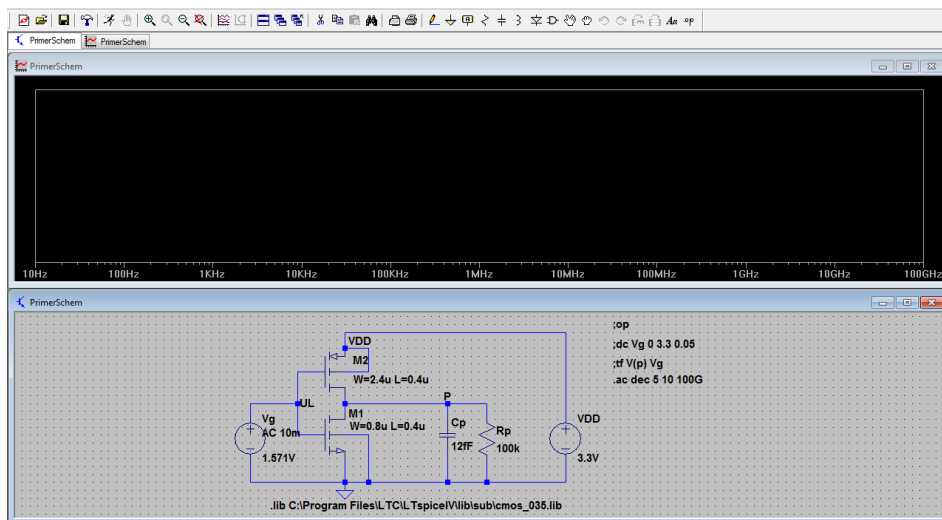
Slika D1.33. Faze unosa parametara AC analize u prozoru *AC Analysis*

Na sl. D1.33 prikazani su koraci za unos parametara AC analize. Po završenom unosu (potvrđeno polje *OK*), sadržaj `.ac` naredbe koja je ispisana u dnu prozora sa sl. D1.33 prenosi se u kursor. Kao i kod prethodnih tipova analize, sadržaj kursora pozicionira se na ekranu i, levim klikom miša, fiksira na izabranu lokaciju. Prethodni tip analize `.tf` automatski se prevodi u komentar, tako da se dobije izgled radnog ekrana prikazan na sl. D1.34. Na istoj slici vidi se efekat aktivnosti opisanih uz sl. D1.32, odnosno promene parametara generatora *Vg*: DC vrednosti od 1.571 V dodata je vrednost AC 10 mV.

Analiza se pokreće selektovanjem ikonice . Po njenom završetku otvara se prozor za grafički prikaz rezultata sa sl. D1.35. Da bi se prikazale

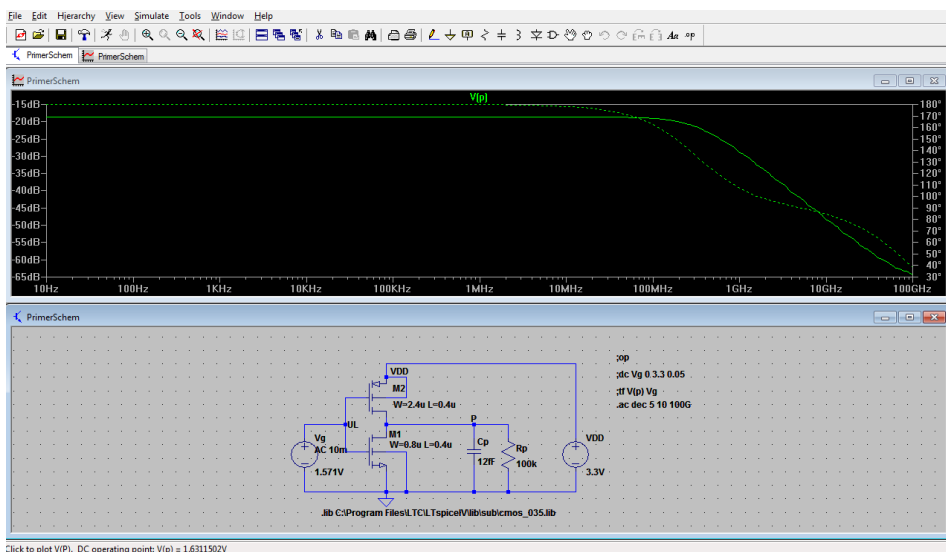


Slika D1.34. Izgled ekrana posle zadavanja parametara AC analize



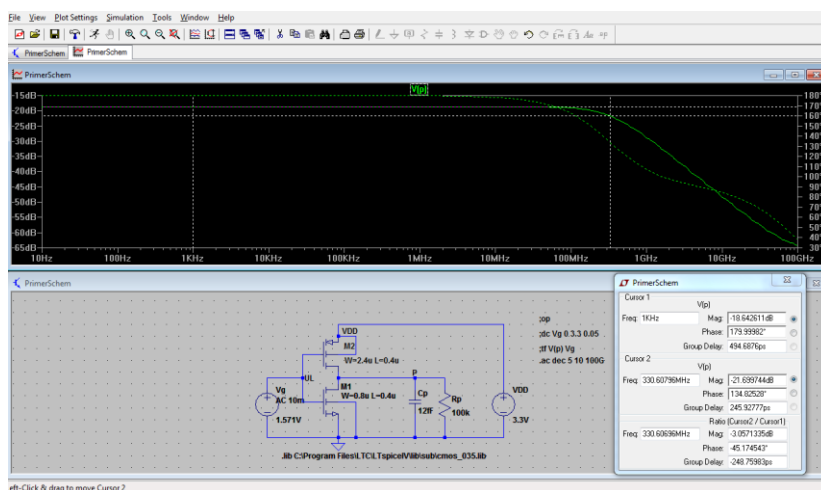
Slika D1.35. Izgled ekrana po završetku AC analize

frekvencijske karakteristike nekog napona, treba preći u donji prozor, sa električnom šemom, i prići kursorom do željenog čvora. Tada se kursor transformiše u sondu . Klikom na levi taster, amplituda i faza napona izabranog čvora prikazuju se na ekranu. U slučaju da je izabran napon u čvoru P, prikazuje se grafik sa sl. D1.36.

Slika D1.36. Amplituda (puna) i faza (isprekidana linija) napona $V(p)$

D1. 4. Analiza kola

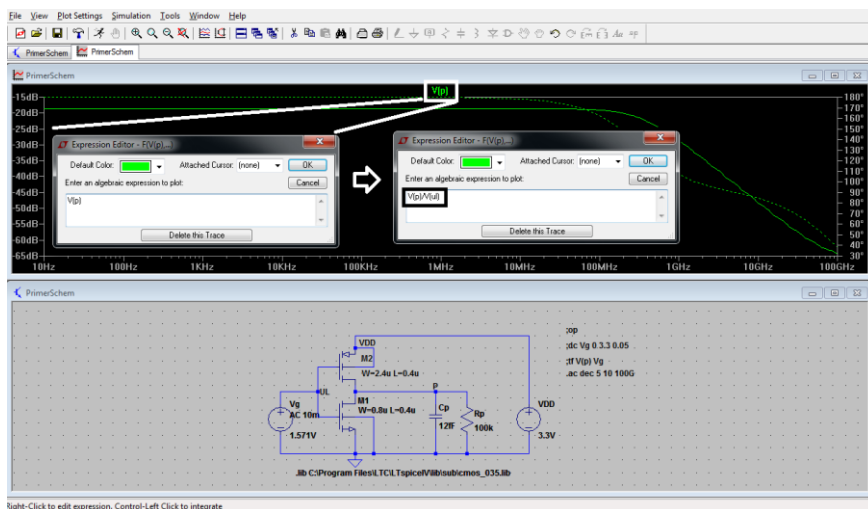
Leva ordinata odnosi se na modul i baždarena je u dB (u odnosu na 1 V), a desna je baždarena u stepenima i odnosi se na fazu. Vrednost amplitude napona $V(p)$ manja je od 1 V, tako da je njena nominalna vrednost oko -19 dB. Imajući u vidu rezultat .tf analize sa sl. D1.31, prema kome je naponsko pojačanje -11.6195 i vrednost pobudnog generatora od 10 mV, očekivana vrednost modula amplitude napona u propusnom opsegu iznosi 116.19 mV, što odgovara -18.6966 dB. Tačne vrednosti modula i faze mogu se očitati u prozoru koji se otvara kada se kursorom dođe do oznake $V(p)$ iznad grafika. Tada se kursor transformiše u kažiprst . Pritisak na levi taster otvara prozor prikazan desno dole na sl. D1.37. Vertikalna isprekidana linija nalazi se na poziciji ispod oznake $V(p)$. Kada se kursor spusti niže od oznake, transformiše se u cifru 1. Ako se drži pritisnut levi taster miša, pozicija vertikalne linije može da se menja po horizontali, dok se taster ne oslobodi. U primeru sa sl. D1.37 postavili smo ga na poziciju $f=1$ kHz. Tada se u polju prozora označenom kao Cursor 1 ispisuju vrednost frekvencije (*Freq*: 1 kHz), amplitude (*Mag*: -18.642611 dB), faze (*Phase*: 179.99982°) i grupnog kašnjenja (*Group delay*: 494.6876 ps). Ponovljenim postupkom aktivira se nova vertikalna linija, ali označena cifrom 2. Ona se, takođe, može pomerati proizvoljno po



Slika D1.37. Aktiviranje kursora za bolji uvid u rezultat analize

horizontali. Na sl. D1.37 pomerana je udesno dok se na dnu prozora *Ratio Cursor2/Cursor1* u polju *Mag:* nije dobila vrednost -3 dB. Može se očitati da je granična frekvencija 330.60796 MHz i fazni stav od 134.82528° što je za -45.174543° manje od faznog stava na frekvenciji 1 kHz.

Obično se AC simulacija radi sa ciljem da se vide frekvencijske karakteristike pojačanja. Da je vrednost amplitude V_g bila 1 V, vrednost napona $V(p)$ odgovarala bi pojačanju. Alternativni način da se dođe do tog podatka jeste da se umesto $V(p)$ prikaže $V(p)/V(u)$. Slika D1.38 ilustruje ovaj slučaj. Da bi se sa dijagrama $V(p)$ prešlo na $V(p)/V(u)$, pride se kursorom do oznake $V(p)$ dok se kursor ne transformiše u kažiprst . Desni taster miša otvara novi prozor u kome se može menjati boja (engl. *Default Color*); dodati kursor (engl. *Attached Cursor*) i to prvi, drugi ili oba; dodati nova promenljiva ili izraz, upisom u polje ispod teksta *Enter an algebraic expression to plot*. U ovo polje ukucan je izraz $V(p)/V(u)$. U dnu ovog menija nalazi se polje označeno sa *Delete this trace* čijim se aktiviranjem, po potrebi, briše grafik tekuće promenljive. Brisanje grafika moguće je i izborom ikonice  i pozicioniranjem makazica uz oznaku grafika koji treba obrisati.



Slika D1.38. Pristup meniju za grafičku interpretaciju izraza

D1. 4. Analiza kola

Slika D1.39 prikazuje efekat crtanja frekvencijskih karakteristika pojačanja $V(p)/V(ul)$. Valja приметiti da, za razliku od $V(p)$, pojačanje iznosi preko 20 dB.

Na istoj slici demonstrirano je otvaranje menija za detaljnu kontrolu grafičke interpretacije rezultata. On se otvara desnim tasterom miša dok se kursor nalazi ma gde u gornjem prozoru i kada ima standardnu formu u obliku krsta (nije kažiprst).

Kontrolu zumiranja dela grafika:	 Zoom Area Ctrl+Z  Zoom Back Ctrl+B  Zoom to Fit Ctrl+E  Pan
Podešavanje skale na ordinatama:	 Autorange Y axis Ctrl+Y  Manual Limits ☒ Autoranging
Dodavanje novog ili brisanje postojećeg grafika:	 Visible Traces  Add Trace Ctrl+A  Delete Traces F5  Select Steps
Dodavanje ili brisanje novog grafičkog prozora:	 Add Plot Pane  Delete this Pane ☒ Sync. Horiz. Axes
Animaciju promene talasnih oblika u vremenu:	Marchina Waveforms Grid  Reset Colors  Mark Data Points Eye Diagram View
Kontrolu izgleda grafičkog prozora:	

Na sl. D1.41 ilustrovan je efekat dodavanja $V(p)$ postojećim frekvencijskim

Takođe je aktiviranjem ikonice  **Manual Limits**



Slika D1.39. Otvaranje menija za detaljnu kontrolu grafičke interpretacije rezultata

D1. 4. Analiza kola



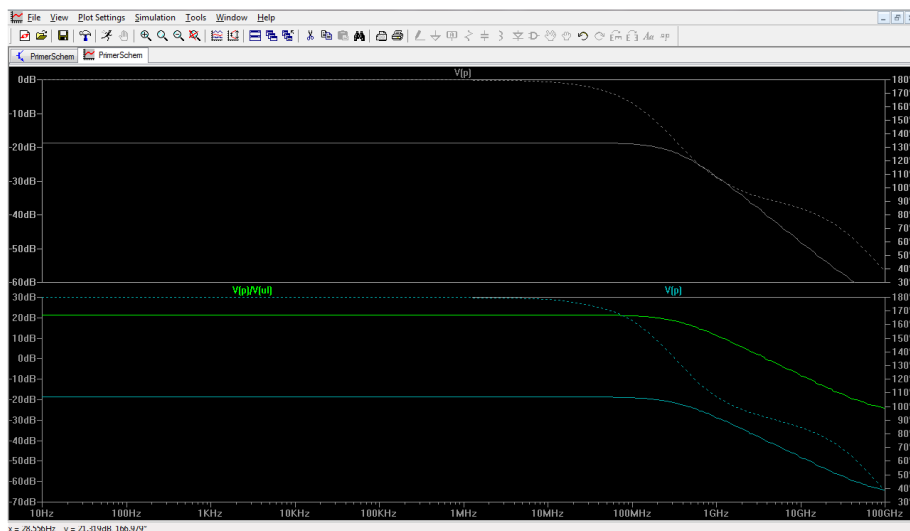
a)



b)

Slika D1.40. Ručno podešavanje granica levih vertikalnih osa na a) donjem i b) gornjem grafičkom prozoru sa slike D1.41

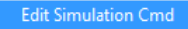
Bilo koji od grafičkih prozora za prikaz rezultata može da se obriše selektovanjem ikonice  **Delete this Pane**. Prozor sa električnom šemom može se učiniti vidljivim zajedno sa prozorima za prikaz rezultata u prethodnom obliku (jedan iznad drugog), aktiviranjem ikonice . Alternativno, mogu se



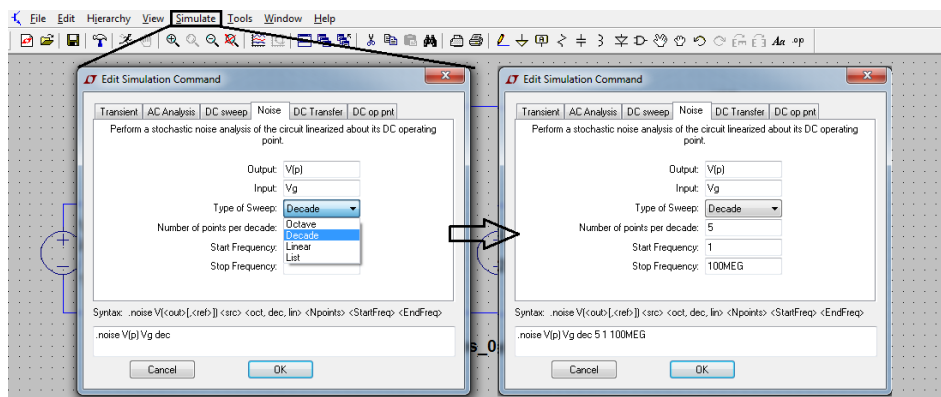
Slika D1.41. Otvaranja novog prozora za prikaz rezultata analize

prikazati, jedan ispred drugog, aktiviranjem ikonice . Više pojedinosti oko upravljanja prozorom za prikaz rezultata analize biće ilustrirano u narednom poglavlju koje se odnosi na analizu u vremenskom domenu.

Analiza šuma – *Noise*

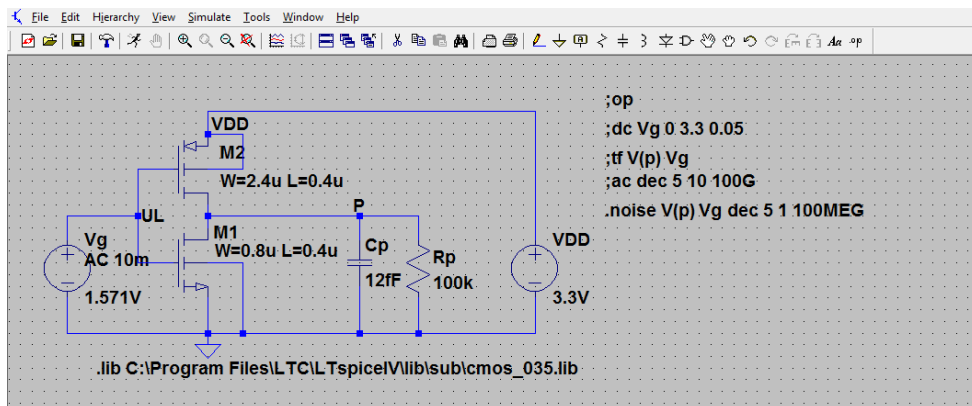
Drugi tip AC analize odnosi se na analizu šuma. Parametri ove analize podešavaju se u prozoru *Edit Simulation Command* kome se pristupa iz *Simulate* menija selektovanjem opcije . Parametri simulacije su: izlazna promenljiva (engl. *Output*); pobudni generator, izvor šuma (engl. *Source*); tip skaliranja frekvencije (engl. *Type of Sweep*) koji se bira iz padajućeg menija i može biti logaritamski po oktavi, po dekadi, linearni ili zadat u obliku liste. Zavisno od izabranog tipa, kao parametar zadaje se broj tačaka po oktavi, po dekadi ili ukupan broj tačaka, ukoliko je skala promene frekvencije linearna. Takođe, postoje polja za definisanje početne (engl. *Start Frequency*) i završne (engl. *Stop Frequency*) frekvencije.

Na sl. D1.42 prikazane su faze unosa parametara *Noise* analize. Po završenom unosu (potvrđeno polje *OK*), sadržaj `.noise` naredbe koja je ispisana u dnu prozora sa sl. D1.42 prenosi se u kursor. Kao i kod prethodnih tipova analize, sadržaj kursora pozicionira se na ekranu i levim klikom fiksira na izabranu lokaciju. Prethodni tip analize `.ac` automatski se prevodi u komentar, tako da se dobije izgled radnog ekrana prikazan na sl. D1.43.



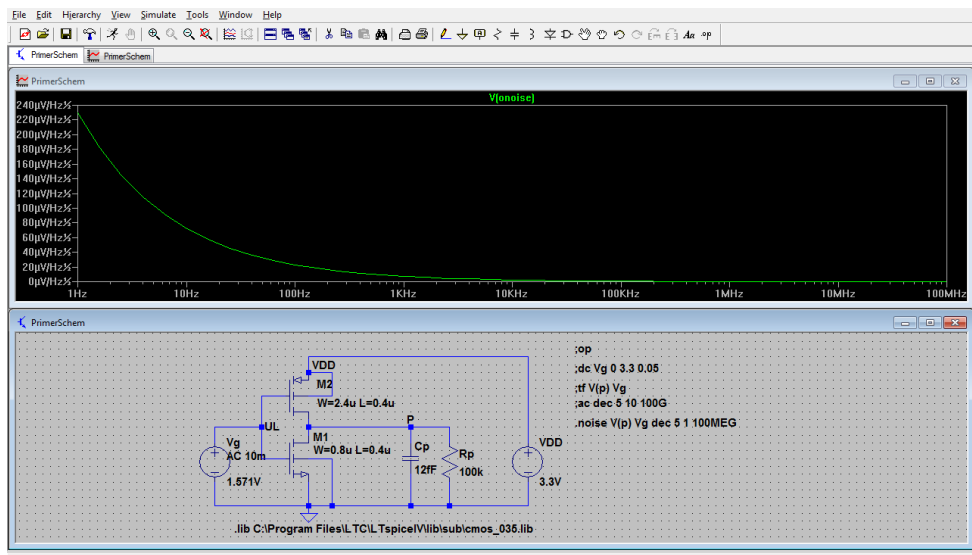
Slika D1.42. Unos parametara analize šuma u prozoru *Noise*

D1. 4. Analiza kola



Slika D1.43. Izgled ekrana posle zadavanja parametara za analizu šuma

Simulacija se pokreće aktiviranjem ikonice . Po završetku analize otvara se prazan prozor za grafički prikaz rezultata analize, sličan onome sa sl. D1.35. Izborom izlaznog čvora P iz donjeg prozora (kursor dobija formu sonde ), u gornjem se prikazuje zavisnost snage šuma, kao što ilustruje sl. D1.44.



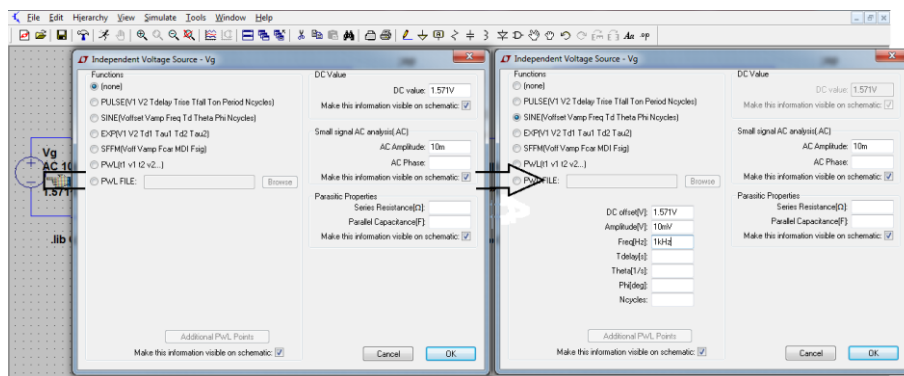
Slika D1.44. Rezultat analize šuma u čvoru P izazvanog generatorom V_g

D1.4.3. Analiza u vremenskom domenu

Analiza u vremenskom domenu sprovodi se sa ciljem da se dobiju talasni oblici napona i struja u kolu. To znači da se, kao rezultat analize, očekuje vizuelizacija slična onoj koju daju osciloskopi. Pri tome, treba obezbediti da promene pobudnih generatora u vremenu budu usklađene sa zahtevima realne pubude kola. To znači da je za analizu pojačavača pogodno da se pubudi sinusnim talasnim oblikom, dok pobuda digitalnih kola zahteva pravougaone, odnosno talasne oblike u vidu trapeza. Naravno, praksa nalaže da se obezbede i drugi talasni oblici. Za svaki treba definisati karakteristične nivoe signala, počev od DC ofseta do graničnih vrednosti, kao što su minimalni, odnosno maksimalni nivoi. Osim toga treba definisati i vremenske parametre kojima se specificira kašnjenje, brzina promene vrednosti i dužina trajanja pojedinih stanja signala. LTspice je prilagođen ovim zahtevima, tako da dopušta definisanje različitih talasnih oblika pobudnih signala aktiviranjem prozora za specifikaciju nezavisnih naponskih i strujnih izvora (engl. *Independant Voltage (Current) Source*). On sadrži opciju i za definisanje pobude za AC analizu koja je opisana na sl. D1.32. U slučaju primera koji se ovde razmatra, ilustrovaćemo promenu parametara generatora V_g . Meni za podešavanje vrednosti nezavisnih generatora otvara se iz prozora u kome se nalazi električna šema. Kada se pride mišem do komponente V_g , kursor dobija formu kažiprsta . Tada se desnim klikom otvara meni za promenu parametara generatora, kao što pokazuje sl. D1.45. U levom gornjem uglu menija ponuđene su sledeće funkcije:

- PULSE – impulsi u obliku trapeza (zavisno od setovanih parametara mogu da budu od trougaonih do kvazi-pravougaonih),
- SINE – sinusni talasni oblik, sa ofsetom i kontrolom faze i frekvencije,
- EXP – eksponencijalna promena rastuće i opadajuće ivice,
- SFFM – modulisani signal i
- PWL – signal zadat u obliku linearnih segmenata (direktno ili iz fajla).

D1. 4. Analiza kola



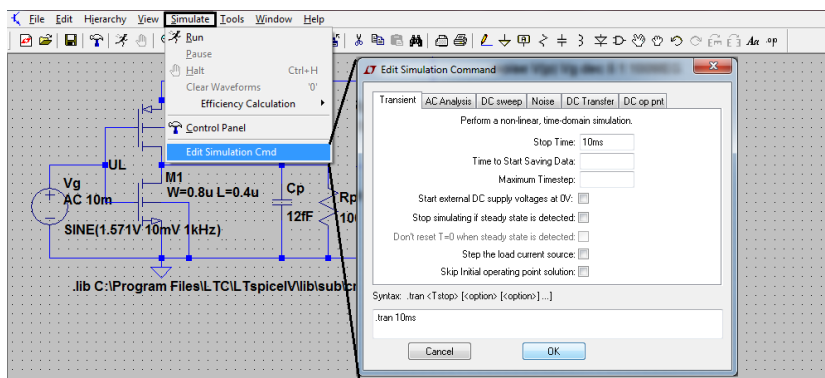
Slika D1.45. Podešavanje parametara V_g u obliku prostoperiodičnog signala

S obzirom da u primeru razmatramo rad kola kao pojačivača, za početak, želimo da posmatramo odziv pri pobudi sinusnim signalom amplitude 10 mV, frekvencije 1 kHz. Zato je aktiviran kružić uz oznaku SINE. Istovremeno otvaraju se polja za definisanje generatora prostoperiodičnog talasnog oblika: jednosmerni ofset (*DC offset* [V]), amplituda (*Amplitude* [V]), frekvencija (*Freq* [Hz]), kašnjenje (*Tdelay* [s]), eksponencijalno prigušenje amplitude – recipročna vrednost vremenske konstante (*Theta* [1/s]), faza (*Phi* [deg]) i broj perioda (*Ncycle*).

Da bi se zadržala jednosmerna polarizacija na gejtju, kao *DC offset* upisujemo 1.571 V, amplitudu fiksiramo na 10 mV, a frekvenciju na 1 kHz. Ostala polja ignorišemo što znači da sinusoida kreće bez kašnjenja, bez prigušenja amplitude sa nultim faznim stavom i sa neograničenim brojem perioda. Potvrdimo unete podatke selekcijom polja *OK*.

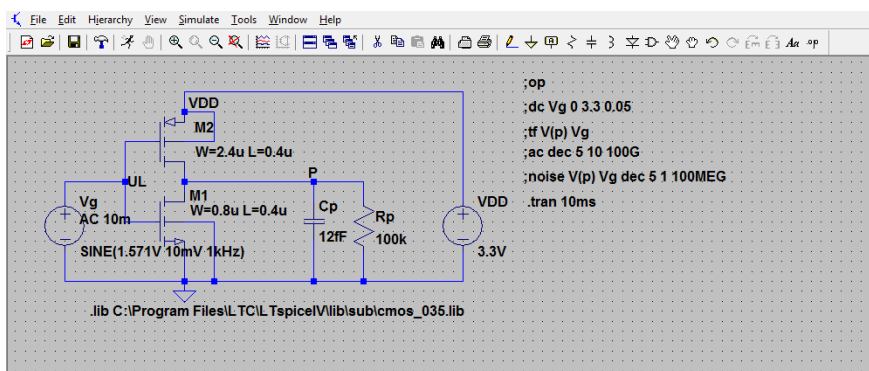
Pre početka simulacije treba podesiti parametre *TRAN* analize. To se radi iz menija *Edit Simulation Command* do koga se dolazi selekcijom opcije **Edit Simulation Cmd** u *Simulate* meniju i to izborom tipa analize *Transient*. Prozor za postavljanje parametara *Tran*analize omogućava da se unesu vreme završetka analize (engl. *Stop Time*), vreme početka memorisanja rezultata analize (engl. *Time to Start Saving Data*) i maksimalni vremenski korak analize (engl. *Maximum Timestep*).

Osim toga, po želji, mogu da se aktiviraju sledeće opcije: početak analize sa porastom jednosmernih izvora od nulte vrednosti (engl. *Start external DC supply voltages at 0V*), zaustavljanje analize ukoliko se detektuje ustaljeno stanje (engl. *Stop simulating if steady state is detected*) i/ili resetovanje

Slika D1.46. Podešavanje parametara `.tran` analize

vremena na 0 u tom trenutku (engl. *Don't reset $T=0$ when steady state is detected*), postepeno skokovito povećanje opterećenja strujnih izvora (engl. *Step the load current sources*) i preskakanje početnih rešenja (engl. *Skip initial operating point solution*). U konkretnom primeru opredeljujemo se za završetak analize u trenutku $T=10$ ms, što odgovara vremenu od deset perioda ulaznog signala. Sve ostale opcije zadržavaju predefinisane vrednosti.

Po završenom unosu podataka, prozor se napušta potvrdom polja *OK*. Tada se tekst sa tipom i parametrima analize prebacuje u kursor i levim klikom oslobađa na izabranoj poziciji ekrana. Time se prethodni tip analize (u ovom slučaju `.noise`) isključuje, tako što mu se dodaje simbol „;” kao prefiks. U polju gde se nalazi električna šema na sl. D1.47 vidi se efekat promene vrednosti generatora V_g i nova aktivna komandna linija `.tran 10 ms`.

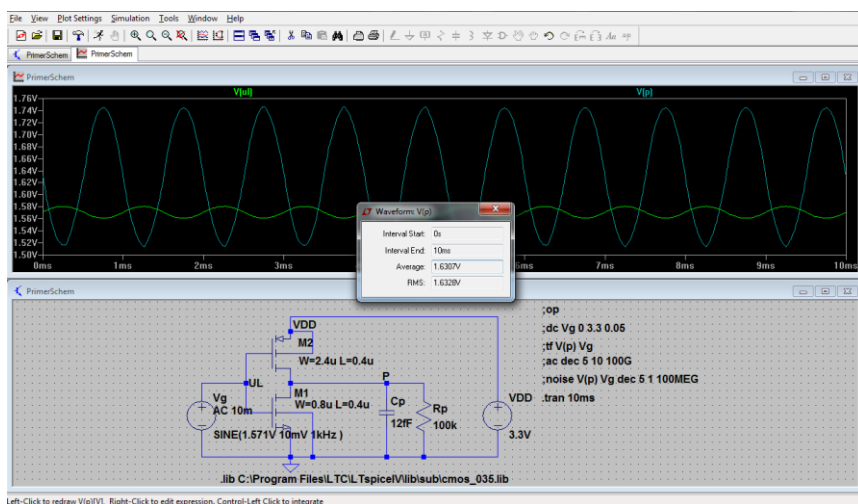


Slika D1.47. Izgled ekrana posle zadavanja parametara analize u vremenskom domenu

D1. 4. Analiza kola

Analiza se pokreće preko ikonice . Po završetku, otvara se prozor za prikaz rezultata sličan onom sa sl. D1.35, ali je horizontalna osa baždarena linearno od 0 ms do 10 ms. Talasni oblik ulaznog napona na ekranu dobija se kada se u donjem prozoru, sa prikazom šeme, kursor približi čvoru UL , dok ne promeni izgled u sondu , a onda se aktivira levi taster na mišu. Kada se “sonda” aktivira i na izlaznom čvoru, na ekranu se dobiju talasni oblici napona $V(ul)$ i $V(p)$. Slika D1.48 prikazuje rezultat analize. Automatski izabrana skala na vertikalnoj osi dovoljno jasno pokazuje i jednosmernu i naizmeničnu komponentu signala. Da bi se dobio detaljniji uvid, dovoljno je da se pride oznaci talasnog oblika i kada se kursor transformiše u kažiprst, pritisnuti istovremeno dugme *Control* na tastaturi i levi taster miša. Tada se otvara prozor u kome se ispisuju podaci o jednosmernoj (srednjoj) i efektivnoj (RMS) vrednosti izabranog signala. U primeru sa sl. D1.48 to je urađeno za $V(p)$. Izborom opcija za zumiranje u gornjem prozoru, interval za koji se računaju srednja i efektivna vrednost mogu da se menjaju.

Pored talasnih oblika napona, mogu da se prikazuju i talasni oblici struja kao i matematičkih izraza nad promenljivima. Struja grane može da se selektuje na dva načina. Prvi je iz električne šeme. Potrebno je kursorom



Slika D1.48. Talasni oblici ulaznog, $V(ul)$ i napona na opterećenju $V(p)$

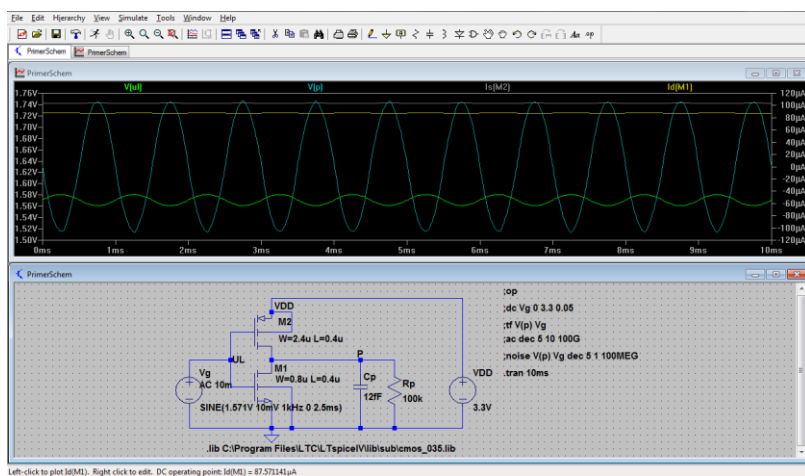
prići elementu čija se struja traži. Tada kursor dobija oblik strujne sonde , a preko levog tastera miša aktivira se prikaz na ekranu. Ukoliko se pride sorsu tranzistora M2 struja se automatski označi kao $I_s(M2)$. Slično važi za struju drejna tranzistora M1. Dok je uključen kursor u obliku strujne sonde, u dnu ekrana pojavljuje se tekst koji bliže definiše selektovanu promenljivu.

Na sl. D1.49 dodati su talasni oblici struja $I_s(M2)$ i $I_d(M1)$. Dok je selektovana $I_d(M1)$, u dnu ekrana ispisano je kratko uputstvo „*Left click to plot $I_d(M1)$. Right click to edit. DC operating point: $I_d(M1)=87.51141\mu A$* koje ukazuje da se levim tasterom prikazuje $I_d(M1)$; desnim se uključuje prozor za editovanje; jednosmerna vrednost u radnoj tački iznosi $87.51141\mu A$. Sa desne strane prikazana je vertikalna osa za struju baždarena u mikroamperima.

Selektovanjem struje kroz dvopol (recimo otpornik R_p) u donjem delu ekrana pojavljuje se i informacija o disipaciji:

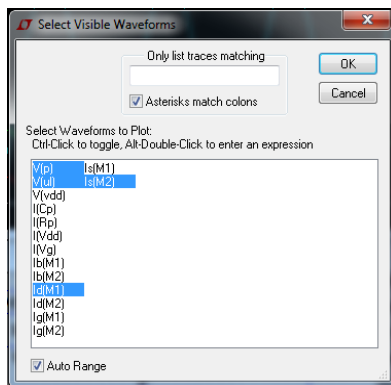
Left-click to plot $I(R_p)$. Right click to edit. DC operating point: $I(R_p) = 16.311502\mu A$ Dissipation= $26.60651\mu W$.

Drugi način da se selektuju promenljive koje se grafički prikazuju jeste aktiviranjem ikonice  čime se otvara meni sa sl. D1.50. U njemu se, uz



Slika D1.49. Talasni oblici struja $I_s(M2)$ i $I_d(M1)$ na istom dijagramu sa naponima $V(u)$ i $V(p)$

D1. 4. Analiza kola

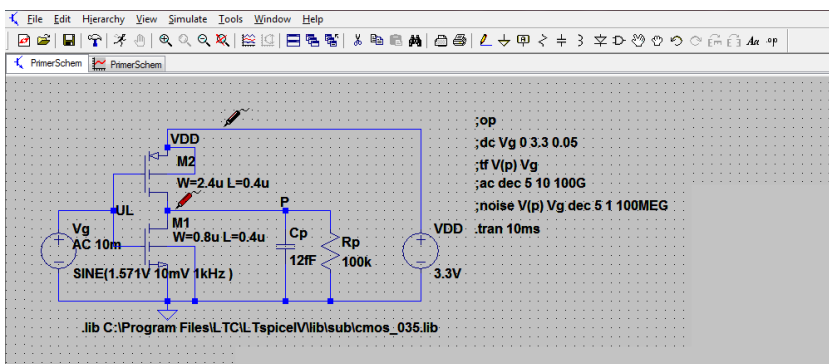


Slika D1.50. Selektovanje promenljivih za prikaz na ekranu

držanje tastera *Control* na tastaturi, mogu markirati promenljive koje treba prikazati na ekranu. Da bi markiranje imalo efekta, treba potvrditi polje *OK*.

Podsećamo na još jedan način dodavanja novih promenljivih i/ili izraza koji je opisan uz sl. D1.39. Ukoliko bi se dijagramima sa sl. D1.49 dodala još neka promenljiva ili izraz, rezultati bi postali nepregledni. Ovo se rešava otvaranjem novih prozora za prikaz rezultata izborom ikonice  **Add Plot Pane**, kao što je opisano u prethodnom poglavlju.

LTspice dozvoljava da se prikaže razlika napona između dva čvora. Tada treba selektovati jedan čvor kursorem u obliku sonde  levim tasterom miša i držati ga dok se kursor ne premesti na drugi čvor. Sonda na

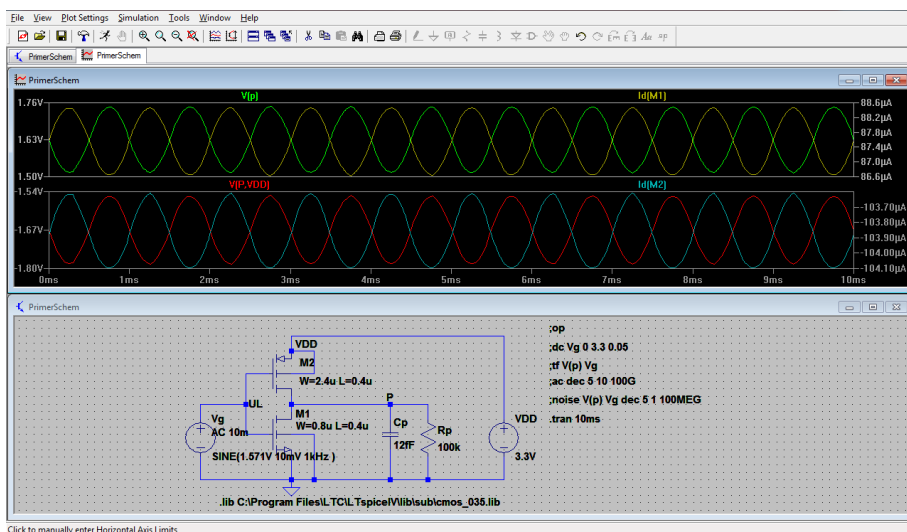


Slika D1.51. Selektovanje razlike napona $V(p, V_{DD}) = V(p) - V(V_{DD})$

drugom čvoru ukazuje na napon koji se oduzima. U primeru sa sl. D1.51 selektovana je razlika napona između čvorova P i V_{DD} : $V(p) - V(V_{DD})$, a to se u prozoru za prikaz rezultata označava kao $V(p, V_{DD})$. Ova razlika odgovara naponu V_{DS} tranzistora M2 i on je negativan. Napon V_{DS} tranzistora M1 jednak je naponu $V(p)$.

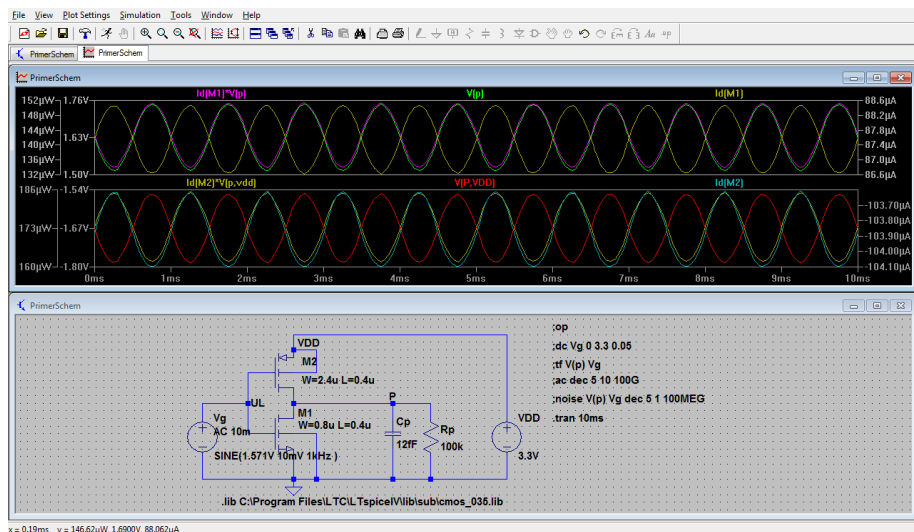
Pri radu sa više prozora za prikaz rezultata, treba voditi računa kom prozoru se dodeljuje određeni dijagram. Kontrola je veoma jednostavna. Pre izbora promenljive sondom na šemi, treba kliknuti na prozor u kome želimo da se ona prikaže. Na sl. D1.52 ilustrovan je primer u kome posmatramo napone i struje tranzistora M1 u gornjem, a tranzistora M2 u donjem prozoru. Najpre se klikne u gornji prozor, a onda sa šeme selektuju $V(p)$ i $I_d(M1)$. Zatim se klikne u prostor donjeg prozora i sa električne šeme se selektuju $V(p, V_{DD})$ i $I_d(M2)$.

Može se posmatrati i promena snage disipacije na svakom tranzistoru, ukoliko se definiše izraz $I_D * V_{DS}$. To se obavlja iz menija *Add Traces to Plot* (sl. D1.39) preko ikonice  **Add Trace**, ili istovremenim pritiskom tastera *Control* i *A* na tastaturi (*Ctrl+A*).



Slika D1.52. Prikaz talasnih oblika I_D i V_{DS} tranzistora M1 i M2 u dva različita prozora

D1. 4. Analiza kola

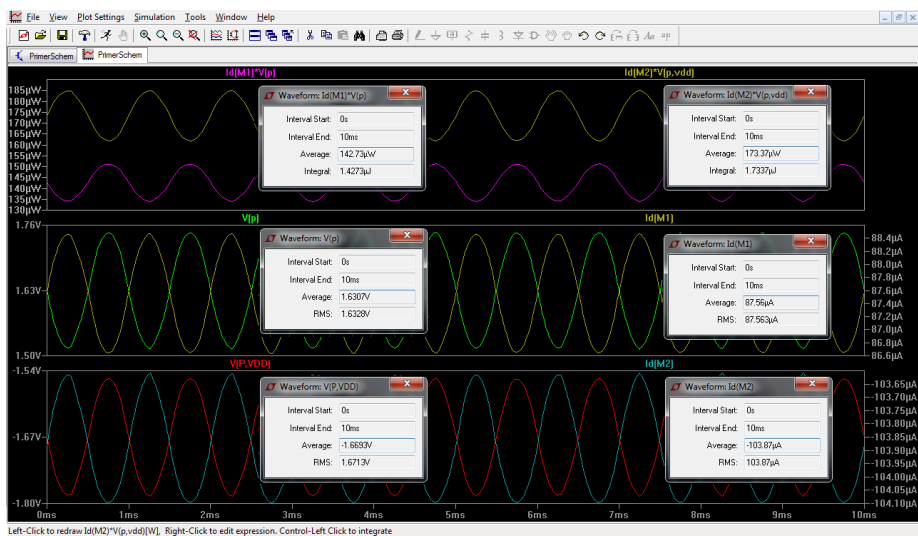


Slika D1.53. Dodavanje dijagrama za prikaz snage disipacije tranzistora M1 i M2 dijagramima sa slike D1.52.

U polje za upis izraza unosimo $I_d(M1)*V(p)$ za snagu tranzistora M1, odnosno $I_d(M2)*V(p, V_{DD})$ za tranzistor M2. Tada se dijagramima sa sl. D1.52 pridodaju novi, tako da ekran za prikaz rezultata dobija izgled sa sl. D1.53.

Dobijena je slika sa koje se ne uočavaju detalji promene snage, zato što su ose automatski skalirane za struju, napon i snagu tako da idu od vrha do dna talasnog oblika. Dijagrami promene disipacije postaće „čitljiviji”, ukoliko se, primenom ručnog alata za upis opsega skale, podesi da je donji opseg snage 150 mW. Alternativno, može se otvoriti novi prozor i u njemu prikazati snaga disipacije. Po otvaranju novog prozora, nema potrebe da se ponovo upisuju izrazi za izračunavanje snage disipacije. Dovoljno je da se oznake promenljivih iz postojećih dijagrama, $I_d(M1)*V(p)$ iz gornjeg i $I_d(M2)*V(p, V_{DD})$ iz donjeg, prevuku mišem u novi prozor i u njemu će se pojaviti selektovani dijagrami. Tako se dobija izgled sa sl. D1.54. U ovom slučaju proširen je prozor za prikaz rezultata analize preko celog ekrana, da bi se povećala preglednost.

Podsećamo da se levim klikom uz držanje tastera *Control* pored oznake svake prikazane promenljive, otvara prozor u kome se ispisuju srednja i RMS vrednost napona i struja, odnosno srednja vrednost snage i integral u vremenu za prikazani interval na vremenskoj osi (energija). Ovo je učinjeno



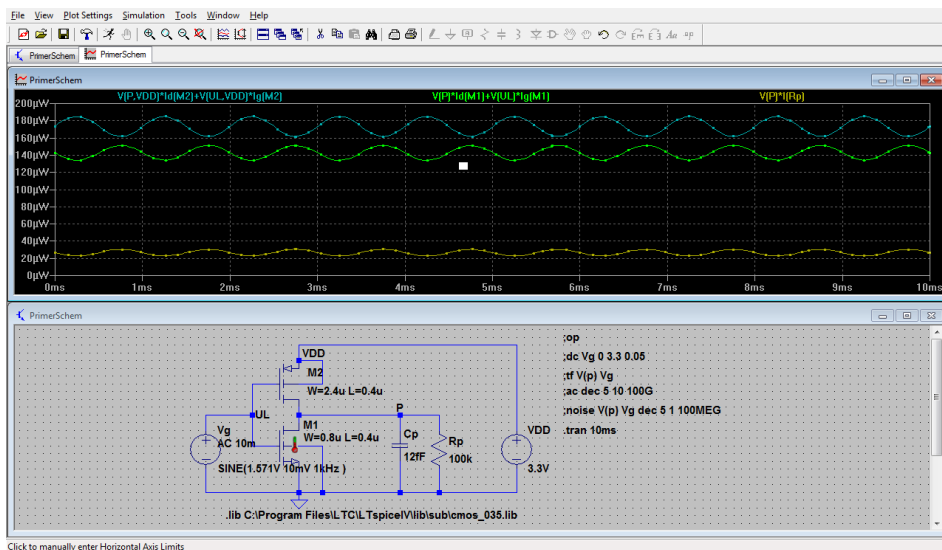
Slika D1.54. Dijagrami snage disipacije tranzistora M1 i M2 u novootvorenom prozoru (prvi odozgo); prikaz srednjih i RMS vrednosti napona i struje, odnosno srednje vrednosti snage i energije u prikazanom vremenskom intervalu.

za svaku prikazanu promenljivu. Napominjemo da se ovo može uraditi samo sukcesivno, tako da nije moguće istovremeno posmatranje ovih informacija za sve promenljive istovremeno, iako je to prikazano na sl. D1.54.

Dijagram disipacije snage na bilo kojoj komponenti može da se dobije direktno iz prozora za crtanje električne šeme. Dovoljno je da se drži pritisnut taster *Alt* dok je kursor na poziciji komponente. Tada se kursor transformiše u oblik termometra . Izraz kojim se računa ukupna snaga disipacije te komponente, automatski se prenosi u polje za prikaz rezultata analize. Na sl. D1.55 to je urađeno za tranzistore M1 i M2 i otpornik *Rp*. (Prethodno su izbrisani svi raniji dijagrami).

Treba uočiti da se za tranzistore ukupna disipacija računa kao: $V_{DS} * I_D + V_{GS} * I_G$. To za M1 znači: $V(p) * Id(M1) + V(UL) * Ig(M1)$, a za M2 iznosi $V(p, V_{DD}) * Id(M2) + V(UL, V_{DD}) * Ig(M2)$. Kada se radi o dvopolima, snaga se računa kao proizvod napona na priključcima i struje kroz komponentu, što u slučaju *Rp* iznosi: $V(p) * I(Rp)$.

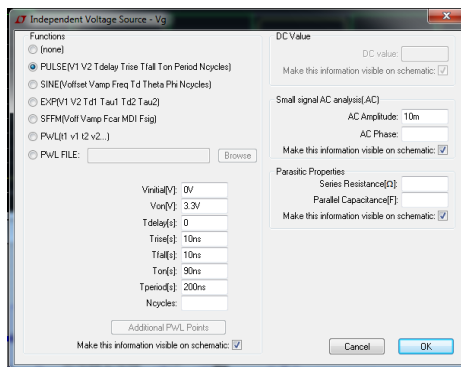
D1. 4. Analiza kola



Slika D1.55. Demonstracija selektovanja disipacije tranzistora M1 sa električne šeme (*Alt*+levi taster uključuje kursor u vidu termometra) i uticaja opcija **Mark Data Points** i *Grid* u polju za prikaz rezultata analize.

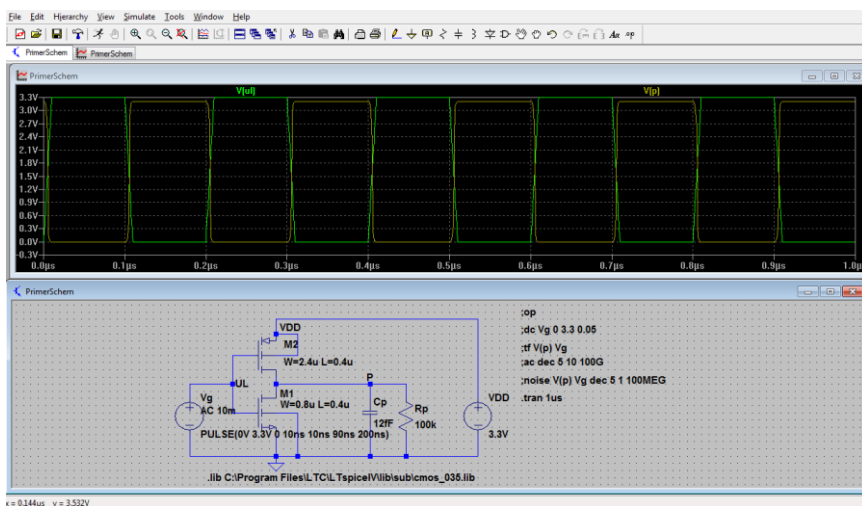
Na sl. D1.55 prikazan je kursor termometar na tranzistoru M1. U prozoru za prikaz rezultata analize demonstriran je uticaj aktiviranja opcije markiranja tačaka na dijagramima: **Mark Data Points** i opcije za crtanje mreže preko polja za prikaz rezultata: **Grid**.

Ista električna šema poslužiće kao primer primene LTspice za karakterizaciju digitalnih logičkih ćelija. Umesto pobude malim signalom u okolini radne tačke, kolo treba pobuditi pravougaonim impulsima. Zato treba ući u meni za podešavanje parametara nezavisnog naponskog generatora Vg na način opisan uz sl. D1.45. U meniju *Independent Voltage Source*, treba selektovati opciju *PULSE*. Time se otvaraju polja za unos parametara signala i to: početne vrednosti napona ($V_{initial}$ [V]), vrednost visokog naponskog nivoa (V_{on} [V]), vreme kašnjenja (T_{delay} [s]), vreme porasta prednje ivice (T_{rise} [V]), vreme opadanja zadnje ivice (T_{fall} [V]), vreme trajanja visokog naponskog nivoa (T_{on} [s]), vreme periode signala (T_{period} [s]), broj perioda (N_{cycles}). Vrednosti unetih parametara prikazane su na sl. D1.56.



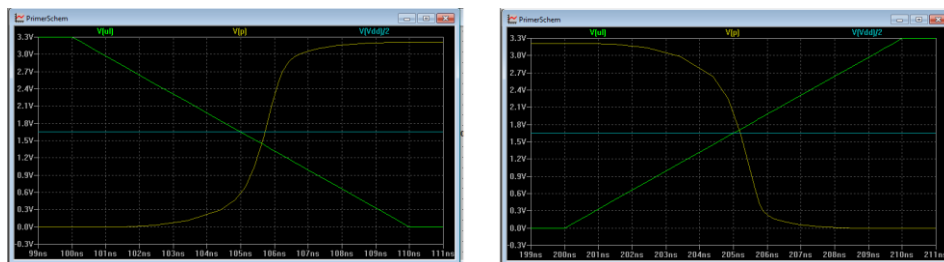
Slika D1.56. Unos parametara generatora V_g za pobudu invertora

Ukoliko bi vreme simulacije ostalo iz prethodnog primera, 10 ms, dobio bi se odziv za 50000 perioda signala. Zato skraćujemo vreme simulacije na 1 μ s, čime se obezbeđuje odziv na 5 perioda signala (od po 200 ns). Ovo je moguće podesiti iz prozora *Tran* kao na sl. D1.46, ali je jednostavnije da se to uradi direktno na električnoj šemi aktiviranjem desnog tastera na mišu dok se kursor nalazi preko postojeće naredbe `.tran 10 ms`. Time se otvara polje u kome se može promeniti vrednost 10 ms u 1 μ s. Aktiviranjem ikonice  pokreće se simulacija. Po njenom završetku otvara se prazan prozor za



Slika D1.57. Rezultat `.tran` analize invertora pobuđenog trapezastim naponom.

D1. 4. Analiza kola



Slika D1.58. Uvećani detalji oko prednje i zadnje ivice signala koji omogućavaju određivanje kašnjenja i vremena uspostavljanja signala.

prikaz rezultata, ukoliko su, pre toga, svi prozori bili zatvoreni. Ukoliko nisu, pojaviće se odziv postojećih promenljivih na novu pobudu. Na sl. D1.57 pokazani su rezultati simulacije zajedno sa modifikovanom električnom šemom.

Obično je od značaja da se posmatra kašnjenje prednje odnosno zadnje ivice signala. Zato, uz primenu alata za zumiranje, treba uvećati te intervale. Na sl. D1.58 prikazan je i jedan „trik”. Naime u polje za dodavanje novog dijagrama u obliku izraza upisali smo $V(VDD)/2$, tako da se na dijagramu dobila prava linija. Da bi se odredilo kašnjenje signala dovoljno je posmatrati vremenski interval između tačaka gde ulazni signal seku $V(VDD)/2$. Na sl. D1.59 prikazan je detalj prethodne analize sa koga se određuje potrošnja tranzistora tokom jednog ciklusa promene signala.



Slika D1.59. Određivanje potrošnje invertora tokom jedno takta

Tabela D1.4. Spisak naredbi za kontrolu tipa i toka simulacije (dopuna tabele D1.2)

Naredba	Opis	
.BACKANNO	Značenje	Omogućava referenciranje na struju kroz komponentu na osnovu naziva komponente.
	Sintaksa	<code>.backanno</code>
	Primer/ komentar	Automatski se dodaje net listi generisanoj iz električne šeme
.FOUR	Značenje	Izračunava FFT nakon <code>.tran</code> analize do Nharmonics harmonika frekvencije frequency na poslednjih Nperiods perioda nad podacima data trace1
	Sintaksa	<code>.four <frequency> [Nharmonics „9"] [Nperiods „1"] <data trace1> [<data trace2> ...]</code>
	Primer/ komentar	<code>.four 1kHz V(out)</code> računa FFT za poslednju periodu napona V(out) do 9. harmonika frekvencije 1 kHz
.GLOBAL	Značenje	Deklarisanje globalnih čvorova za potkolo (.SUBCKT). Podrazumeva se da su referentni čvor (0) i čvorovi označeni sa \$G_ globalni i ne treba ih navoditi
	Sintaksa	<code>.global <node1> [node2 [node3] [...]]</code>
	Primer/ komentar	<code>.global VDD VCC</code> definiše čvorove VDD i VCC kao globalne
.LOADBIAS	Značenje	Upisuje rezultate DC analize sačuvane u fajlu filename korišćenjem naredbe <code>.savebias</code>
	Sintaksa	<code>.loadbias <filename></code>
	Primer/ komentar	<code>.loadbias DCpolarizacija</code> učitava iz fajla „DCpolarizacija”

D1. 4. Analiza kola

		rezultate prethodno obavljene DC analize (pogodno za višestruke TR i AC analize složenih kola)
.MEASURE	Značenje	Vraća vrednost promenljive ili izraza expr1 kada je po count1 puta ispunjen uslov expr2, ali nakon kašnjenja val1 ili u tački definisanoj na apscisi sa expr3 i rezultat smešta u fajl pod imenom name.
	Sintaksa	.MEAS [SURE] [AC DC OP TRAN TF NOISE] <name> [<FIND DERIV PARAM> <expr1>] [WHEN <expr2> AT=<expr3>]] [TD=<val1>] [<RISE FALL CROSS>=[<count1> LAST]]
	Primer/ komentar	.MEAS TRAN res1 FIND V(out) AT=5m .MEAS TRAN res2 FIND V(out)*I(Vout) WHEN V(x)=3*V(y) .MEAS TRAN res3 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) cross=3 .MEAS TRAN res4 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) rise=last .MEAS TRAN res5 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) cross=3 TD=1m .MEAS TRAN res6 WHEN V(x)=3*V(y)
	Značenje	Vraća srednju (AVG) ili maksimalnu (MAX) ili minimalnu (MIN) ili raspon od najmanje do najveće (PP) ili RMS ili integral promenljive ili izraza expr1 u intervalu od TRIG do TARG na apscisi. TRIG/TARG se definiše kada promenljiva ili izraz lhs1/lhs2 po count1/count2 put dostiže vrednost rhs1/rhs2 ali nakon kašnjenja val1/val2. i rezultat smešta u fajl pod imenom name. Ukoliko se

		izostave TRIG i/ili TARG podrazumeva se početak, odnosno kraj simulacije.
	Sintaksa	<pre>.MEAS [AC DC OP TRAN TF NOISE] <name> [<AVG MAX MIN PP RMS INTEG> <expr1>] [TRIG <lhs1> [[VAL]=]<rhs1>] [TD=<val1>] [<RISE FALL CROSS>=<count1>] [TARG <lhs2> [[VAL]=]<rhs2>] [TD=<val2>] [<RISE FALL CROSS>=<count2>]</pre>
	Primer/ komentar	<pre>.MEAS TRAN res7 AVG V(NS01) + TRIG V(NS05) VAL=1.5 TD=1.1u FALL=1 + TARG V(NS03) VAL=1.5 TD=1.1u FALL=1 .MEAS AC tmp max mag(V(out)) .MEAS AC BW trig mag(V(out))=tmp/sqrt(2) rise=1 + targ mag(V(out))=tmp/sqrt(2) fall=last .MEAS NOISE out_totn INTEG V(onoise) .MEAS NOISE in_totn INTEG V(inoise)</pre>
.NET	Značenje	Izračunava ulazno/izlazne impedanse, admitanse, y - z - h - i s -parametre četvoropola čiji izlaz definišu napon $V(out[,ref])$ ili struja kroz $Rout$ kada su pristupni krajevi zatvorni sa Rin , odnosno $Rout$.
	Sintaksa	<pre>.net [V(out[,ref]) I(Rout)] <Vin Iin> [Rin=<val> „1"] [Rout=<val> „1"]</pre>
	Primer/ komentar	<pre>.net I(Rout) V4</pre>
.NODESET	Značenje	Definiše DC napone u kolima u bistabilnim kolima (flip-flop)

D1. 4. Analiza kola

	Sintaksa	.NODESET V(node1)=<voltage> [V(node2)=<voltage [...]]
	Primer/ komentar	.NODESET V(out1)=10 V(out2)=0
.SAVE	Značenje	Memoriše samo navedene napone čvorova i struje grana. Dozvoljena je upotreba karaktera * da označi „bilo koji”
	Sintaksa	.save V(node1) [V(node2) [I(branch1) [I(branch2)]]]
	Primer/ komentar	.save V(out) V(in) I(R1) I(Q2) Id(*) čuva rezultatae za napone čvorova out i in, struju kroz R1, Ib, Ic i Ie tranzistora Q1 i struje drejna svih tranzistora
.SAVEBIAS	Značenje	Beleži rezultate DC analize u fajl filename. Alternativno beleži rezultate: TR analize dobijene posle vremena tvalue i to ponovljeno repeat puta; DC analize u svalue koraku naredbe step ili u value koraku naredbe sweep.
	Sintaksa	.savebias <filename> [internal] [temp=<value>] [time=<tvalue> [repeat]] [step=<svalue>] [DC1=<value1>] [DC2=<value2>] [DC3=<value3>]
	Primer/ komentar	.savebias DCpolarizacija smešta rezultate dc analize u fajl „DCpolarizacija”