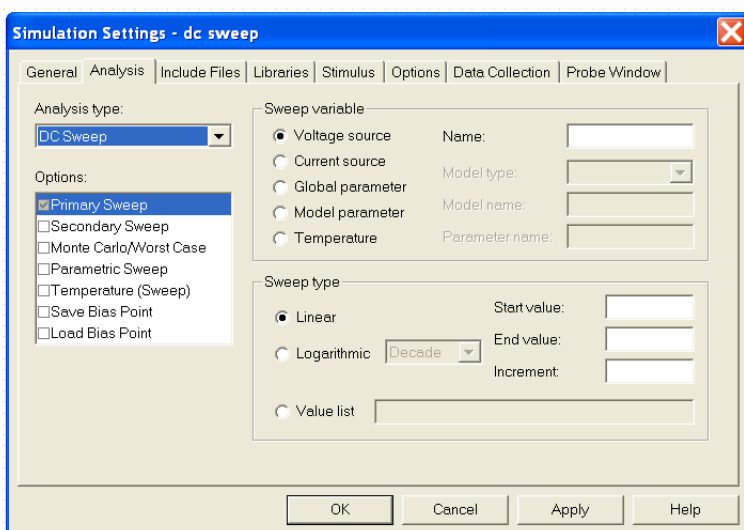


3. DC SWEEP ANALIZA



Slika 3.1 Zadavanje DC Sweep analize.

Ovo je analiza kojom se određuje zavisnost jednosmernih veličina (napona i struja) u funkciji promene neke promenljive (napona, struje, parametra...), odnosno jednosmerna prenosna karakteristika. **Pri ovoj analizi su svi kondenzatori u kolu otvorene veze, a svi kalemovi kratki spojevi.** DC Sweep analiza se zadaje prema slici slici 3.1, a promenljive mogu biti:

- **Voltage Source**- nezavisni naponski izvor čije ime treba upisati u polje **Name**
- **Current Source**- nezavisni strujni izvor čije ime treba upisati u polje **Name**
- **Global Parameter**- globalni parametar (npr. otpornost ili kapacitivnost u šemi) čije se ime specificira u polju **Name**, a čija se vrednost definiše uz pomoć simbola **Parameters**:
- **Model Parameter**- parametar (**Param. Name**) u nekom modelu elementa (**Model Name**) koji se još specificira i tipom modela (**Model Type**) (primer **.model QX NPN BF=10**)
- **Temperature** - temperatura

Nezavisne promenljive u **DC Sweep** analizi mogu se menjati na jedan od sledećih načina:

- **Linear**-linearno od vrednosti koja se upisuje u polje **Start value** do vrednosti **End value**, sa korakom **Increment**.
- **Logarithmic (Octave)** - logaritamski po oktavama (dva puta manja prethodna vrednost od sledeće) od početne vrednosti (**Start value**) do krajnje vrednosti (**End value**), sa brojem tačaka po oktavi koji se specificira u polju **Points/Octave**
- **Logarithmic (Decade)** - logaritamski po dekadama (deset puta veća prethodna vrednost od sledeće) od početne vrednosti (**Start value**) do krajnje vrednosti (**End value**), sa brojem tačaka po dekadi koji se specificira u polju **Points/Decade**
- **Value List** - po listi vrednosti koje se specificiraju u polju **Value list** (vrednosti se unose sa razmacima, npr. 10 20 25)

Pored ovoga **DC Sweep** analizom se mogu snimati i familije krivih (npr. $I_C = I_C(V_{CE})|_{I_B=const}$).

Za ovo je posle podešavanja osnovne promenljive (**Primary Sweep**) potrebno selektovati i **Secondary Sweep**, a potom podesiti parametre druge promenljive.

DC Sweep analiza se može koristiti zajedno sa **Monte Carlo/Worst Case**, **Parametric Sweep** i **Temperature (Sweep)** analizom.

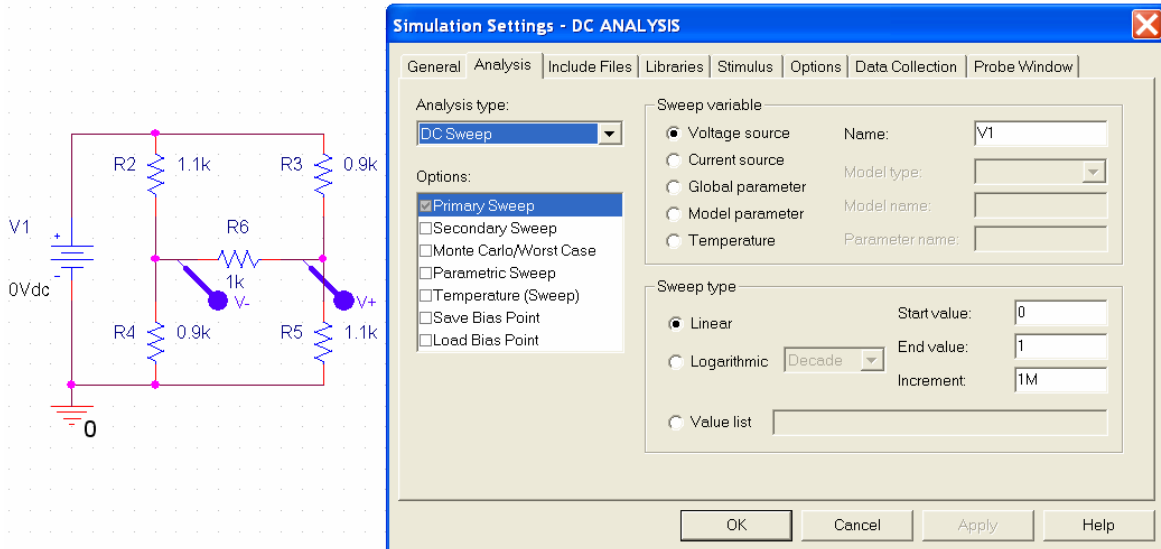
Primeri DC Sweep analize

1. Rezistivna kola

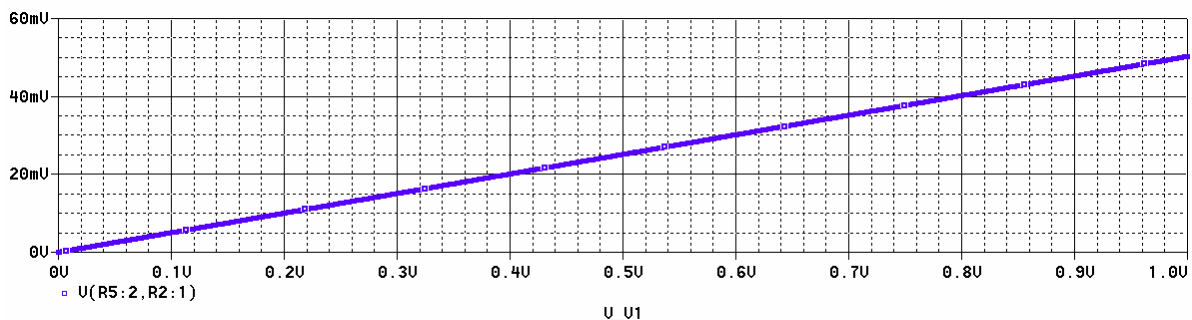
Na slici 3.2 prikazana je šema jednog rezistivnog kola korišćenog u **ORCAD PSPICE** simulaciji. Potrebno je odrediti zavisnost promene napona na otpornosti R6, kada se napon naponskog generatora V1 menja od 0 do 1V sa korakom od 1mV.

Na slici 3.2 su prikazane vrednosti parametara **DC Sweep** analize, a na šemi je postavljen marker za prikazivanje napona na krajevima otpornika R6. Po obavljenoj analizi u programu za grafičko prikazivanje rezultata simulacije **PROBE** dobijen je dijagram prikazan na slici 3.3. Kolo je

linearno, tako da je i zavisnost napona na otpornosti R6 u funkciji ulaznog napona takođe linearna funkcija.

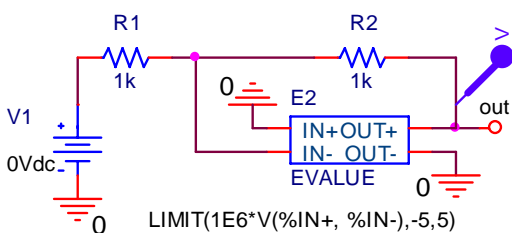


Slika 3.2 Šema jednog rezistivnog kola i vrednosti parametara DC Sweep analize.



Slika 3.3 Rezultat DC Sweep analize kola sa slike 3.2.

2. Rezistivna kola sa zavisnim izvorima



Slika 3.4 Rezistivno kolo sa zavisnim naponskim generatorom.

Na slici 3.4 je prikazano jedno rezistivno kolo sa naponski kontrolisanim naponskim generatorom čija je vrednost: **LIMIT(1E6*V(%IN+), %IN-), -5,5)**.

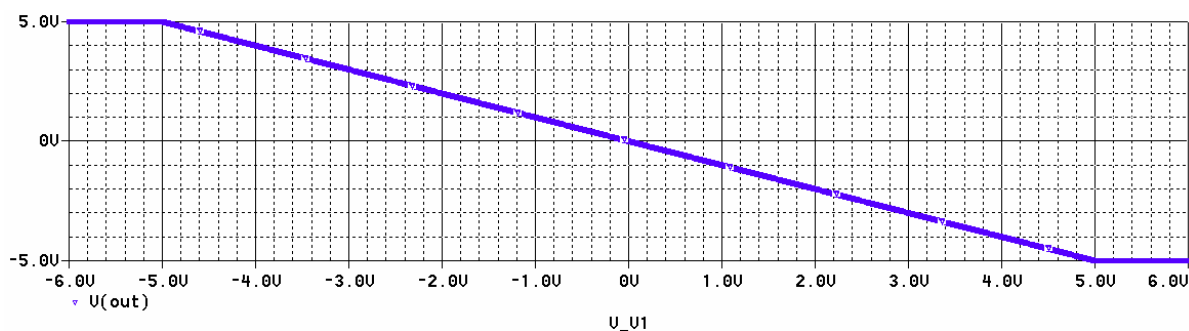
Funkcija **Limit** predstavlja limiter (ograničavač) čiji su nivoi ograničavanja $-5V$ i $5V$. Između ova dva nivoa prenosna karakteristika ima pojačanje od 10^6 ($1E6$).

Potrebno je odrediti zavisnost izlaznog napona $V(out)$ u funkciji promene napona $V1$ kada se ovaj menja u opsegu od $-6V$ do $6V$, sa korakom $1mV$. Parametri u **DC Sweep** analizi su:

- Sweep variable Voltage source Name: V1
- Sweep type Linear
- Start value: -6 End value: 6 Increment: 10m

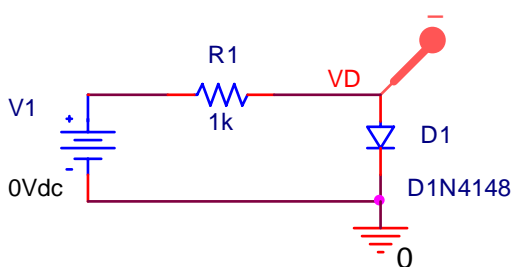
Po obavljenoj simulaciji u grafičkom prozoru za prikazivanje rezultata analiza **PROBE** dobija se prenosna karakteristika prikazana na slici 3.5. Sa ove slike se vidi da je ova karakteristika nelinearna. U opsegu ulaznog napona u kome je napon na izlazu izvan oblasti ograničenja $-5V < v_{out} < 5V$ kolo je linearno. Sa slike se vidi i da je nagib karakteristike u ovoj oblasti

$$a = \frac{dv_{out}}{dv_1} = -1.$$



Slika 3.5 Prenosna karakteristika kola sa slike 3.4.

3. Kola sa diodama – određivanje strujno-naponske karakteristike diode



Slika 3.6 Kolo za snimanje strujno-naponske karakteristike diode.

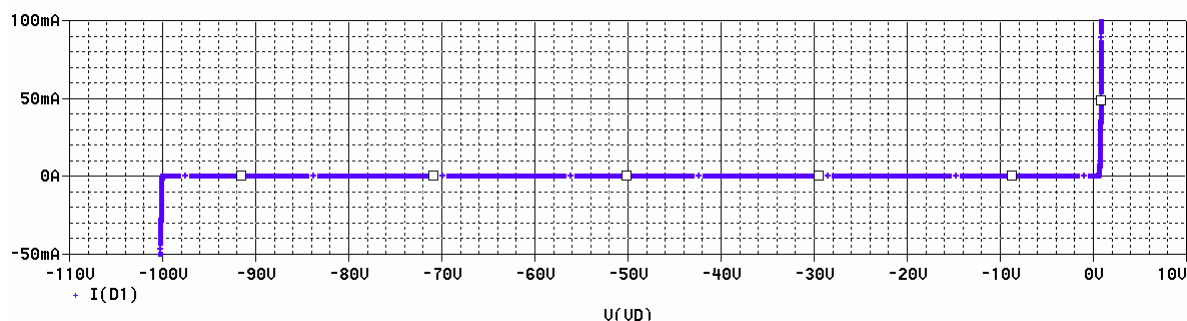
Na slici 3.6 je prikazano standardno kolo za snimanje strujno-naponske karakteristike diode. Potrebno je snimiti zavisnost $I_D = f(V_D)$ kada se napon pobudnog generatora menja u opsegu -150V do 100V sa korakom od 10mV. Posle otvaranja prozora za zadavanje analiza, aktivirana je **DC Sweep** analiza. Za ovu analizu je podešeno da bude:

- Sweep variable Voltage source Name: V1
- Sweep type Linear
- Start value: -150 End value: 100 Increment: 100m

Po završetku analize automatski se ulazi u **PROBE**, a pošto je na slici 3.6 postavljen marker za merenje struje diode, u ovom prozoru će biti prikazana struja diode u funkciji ulaznog napona V1 (V_{V1}). Da bi se u ovom prozoru prikazala statička karakteristika diode, potrebno je promeniti x osu ovog dijagrama, tako da nezavisna promenljiva ne bude ulazni napon, već napon na diodi $V(VD)$. Ovo se podešava u prozoru **PROBE** redoslednim pokretanjem sledećih opcija:

- aktiviranjem **Plot/Axis Settings/X axis/Axis Variable**
- u prozoru **Simulation Output Variables** levim tasterom miša označiti $V(VD)$ i sa **OK** zatvoriti ovaj prozor
- aktiviranjem još jednog **OK** u sledećem prozoru vratiti se u **PROBE** gde apscisa postojećeg grafika treba da bude promenjena na novu vrednost $V(VD)$

Rezultat prethodnih aktivnosti daje strujno-naponsku karakteristiku diode 1N4148 prikazanu na slici 3.7. Sa slike se vidi da je inverzni napon pri kome dolazi do proboja ove diode $V_{Dinv} = 100V$, kao i da je napon na direktno polarisanoj diodi manji od 1V.



Slika 3.7 Strujno-naponska karakteristika diode 1N4148.

4. Kola sa diodama – snimanje familije krivih $I_D = f(V_D)|_{T=const}$

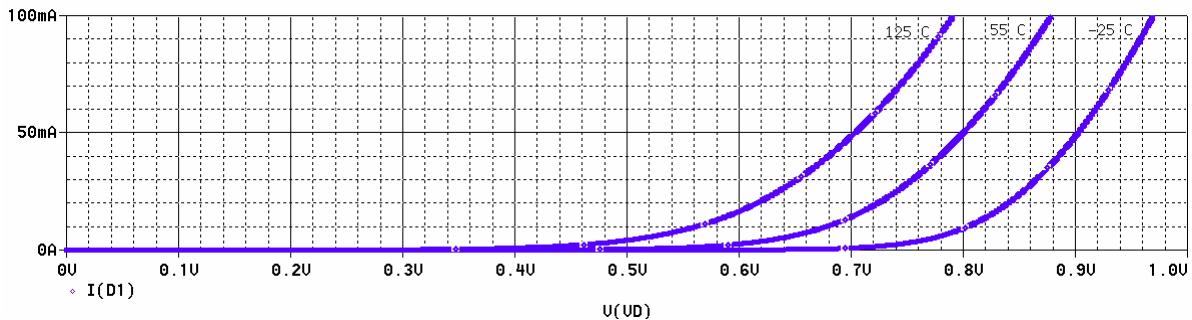
Koristi se isto kolo kao u prethodnoj tački, slika 3.6, ali se sada koristi i opcija za promenu druge promenljive u **DC Sweep** analizi (**Secondary Sweep**). Potrebno je snimiti strujno-naponsku karakteristiku diode $I_D = f(V_D)$ kada se ulazni napon menja u opsegu od 0 do 100V, sa korakom

od 0.1V, a temperatura uzima vrednosti: -25°C , 55°C i 125°C .

Parametri **DC Sweep** analize u ovom slučaju su:

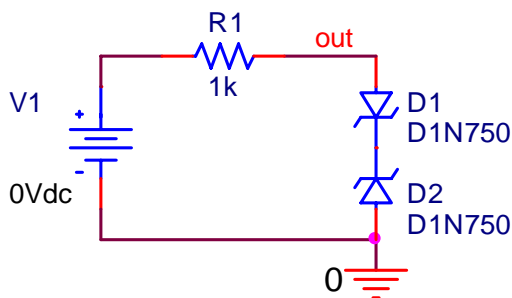
- **Primary Sweep:**
 - Sweep variable Voltage source Name: V1
 - Sweep type Linear
 - Start value: 0 End value: 100 Increment: 100m
- **Secondary Sweep:**
 - Sweep variable Temperature
 - Sweep type Value list: -25 55 125

Rezultat analize, familija krivih $I_D = f(V_D)|_{T=const}$ prikazan je na slici 3.8.



Slika 3.8 Familija krivih $I_D = f(V_D)|_{T=const}$.

5. Kola sa Zener diodama – dvostrani ograničavač napona



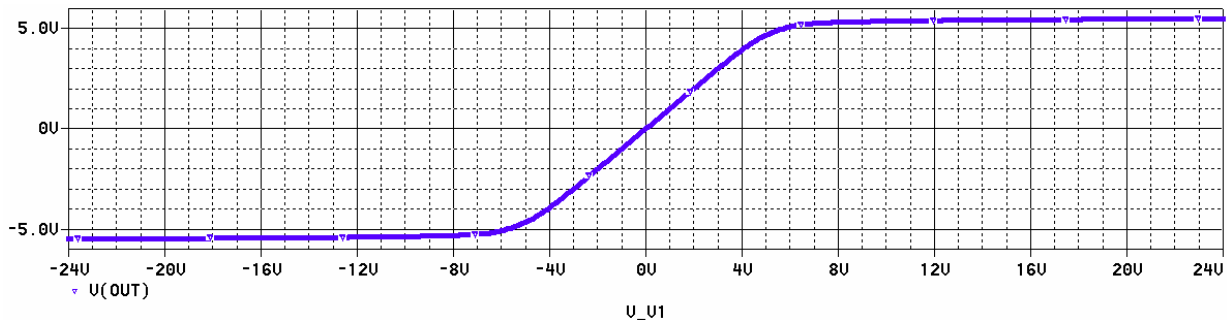
Slika 3.9 Dvostrani ograničavač napona sa Zener diodama.

Na slici 3.9 prikazano kolo dvostranog ograničavača napona sa Zener diodama 1N750. Ulazni napon se menja u opsegu -24V do 24V sa korakom od 0.1V . Potrebno je snimiti prenosnu karakteristiku ovog ograničavača napona.

Parametri **DC Sweep** analize su:

- Sweep variable Voltage source Name: V1
- Sweep type Linear
- Start value: -24 End value: 24 Increment: 0.1

Rezultat **DC Sweep** analize, prenosna karakteristika $v_{out} = f(v_1)$, je prikazan na slici 3.10.

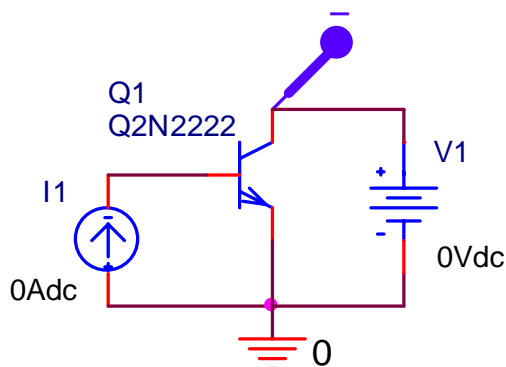


Slika 3.10 Prenosna karakteristika dvostranog ograničavača napona.

6. Kola sa bipolarnim tranzistorima – određivanje zavisnosti $I_C = I_C(V_{CE})|_{I_B=const}$

Da bi se dobila familija krivih $I_C = I_C(V_{CE})|_{I_B=const}$ potrebno je u **DC Sweep** analizi menjati dva parametra V_{CE} i I_C , pa se stoga mora koristiti i **Secondary Sweep**.

Na slici 3.11 je prikazano kolo sa bipolarnim tranzistorom 2N2222 čija se strujno-naponska



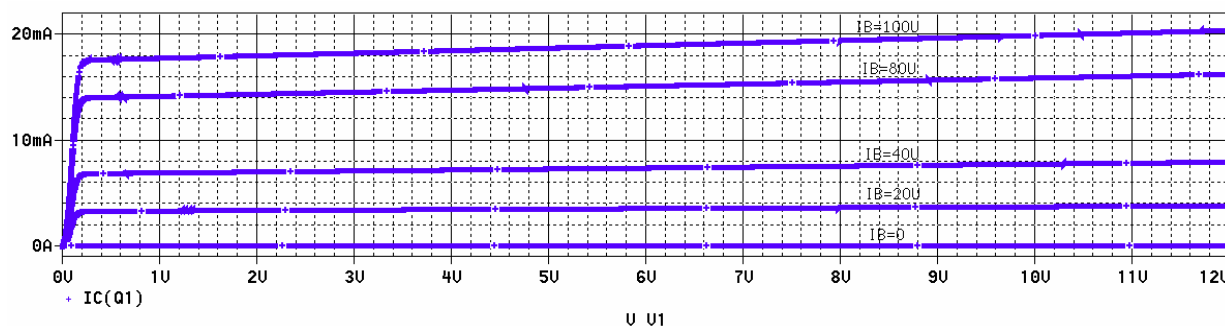
Slika 3.11 Kolo za snimanje zavisnosti

$$I_C = I_C(V_{CE})|_{I_B=const}$$

karakteristika određuje. Primarna promenljiva je napon između kolektora i emitora, V1, a sekundarna struja baze I1. Parametri DC Sweep analize imaju sledeće vrednosti:

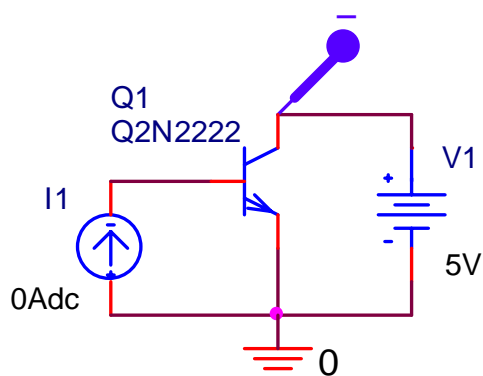
- **Primary Sweep:**
 - Sweep variable Voltage source Name: V1
 - Sweep type Linear
 - Start value: 0 End value: 12 Increment: 1m
- **Secondary Sweep:**
 - Sweep variable Current source Name: I1
 - Sweep Type Value list: 0 20u 40u 80u 100u

Na slici 3.12 je prikazana zavisnost $I_C = I_C(V_{CE})|_{I_B=const}$ dobijena pomoću DC Sweep analize.

Slika 3.12 Zavisnost $I_C = I_C(V_{CE})|_{I_B=const}$ kod bipolarnog tranzistora 2N2222.

7. Kola sa bipolarnim tranzistorima – određivanje zavisnosti koeficijenta strujnog pojačanja bipolarnog tranzistora $\beta_{DC} = I_C / I_B|_{V_{CE}=const} = f(I_C)$ kada se menja temperatura ambijenta

Na slici 3.13 je prikazano kolo na osnovu koga se kod bipolarnog tranzistora 2N2222 određuje zavisnost $\beta_{DC} = f(I_C)$ kada se temperatura ambijenta menja. Potrebno je snimiti zavisnost $\beta_{DC} = f(I_C)$ kada temperatura ambijenta uzima dve vrednosti -25°C i 85°C .

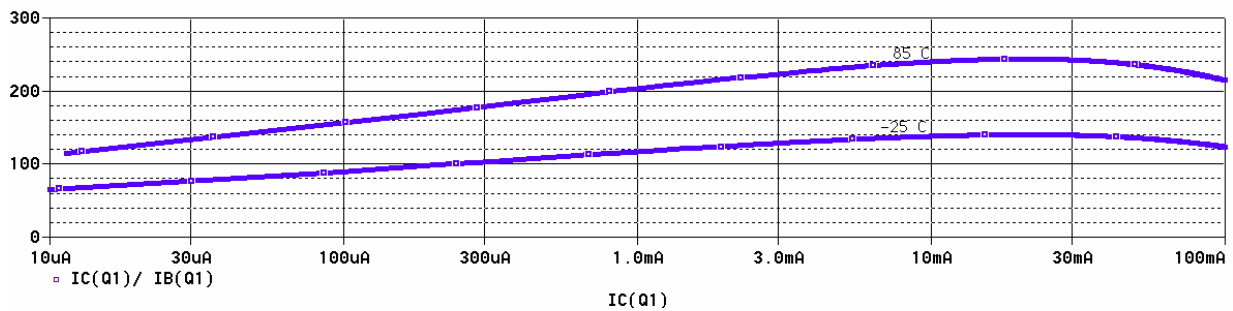


Slika 3.13 Kolo za snimanje zavisnosti koeficijenta strujnog pojačanja bipolarnog tranzistora u funkciji struje kolektora.

Parametri DC Sweep analize imaju sledeće vrednosti:

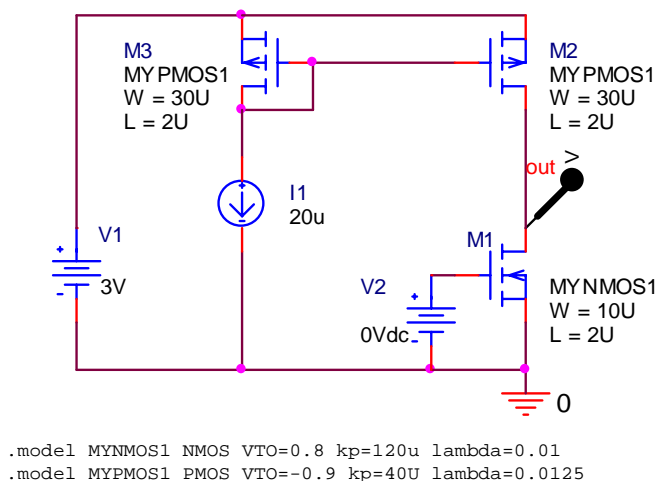
- **Primary Sweep:**
 - Sweep variable Current source Name: I1
 - Sweep type Linear
 - Start value: 0.1u End value: 1m Increment: 1u
- **Secondary Sweep:**
 - Sweep variable Temperature
 - Sweep Type Value list: -25 85

Rezultat analize je prikazan na slici 3.14. Koeficijent strujnog pojačanja dobijen je nalaženjem odnosa kolektorske i bazne struje $\beta_{DC} = I_C(Q_1) / I_B(Q_1)$. Potom je promenjena x osa dijagrama redoslednim aktiviranjem sledećih opcija iz prozora **PROBE: Plot/ Axis Settings/ X axis/ Axis Variable/ IC(Q1)/ OK/ OK**. Pošto se struja kolektora menja u širokom opsegu vrednosti uzeta je i logaritamska podela po ovoj promenljivoj. Ovo je postavljeno pomoću **Plot/ Axis Settings/ X axis/ Scale/ Log/ OK**.



Slika 3.14 Zavisnost $\beta_{DC} = f(I_C)$ kod bipolarnog tranzistora 2N2222, za dve vrednosti temperature ambijenta.

8. Kola sa MOS tranzistorima – CMOS pojačavač



Slika 3.15 CMOS pojačavač.

Na slici 3.15 prikazana je šema veza jednog CMOS pojačavača. Za ovaj pojačavač potrebno je odrediti prenosnu karakteristiku $v_{out} = f(v_2)$ i zavisnost modula naponskog pojačanja $dv_{out}/dv_2 = g(v_2)$.

U kolu su upotrebljeni tranzistori čiji je model dobijen prepravkom **mbreakn** i **mbreakp** modela, a vrednosti parametara u modelu dati su na slici 3.15. Ovi parametri se odnose na standardni model **MOSFET-a** (LEVEL=1). Prema ovom modelu struja drejna NMOS tranzistora u zasićenju data je sledećim izrazom:

$$I_D = \frac{KP}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}),$$

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{PHI + V_{SB}} - \sqrt{PHI} \right),$$

dok je u triodnoj oblasti

$$I_D = \frac{KP}{2} \frac{W}{L} \left[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 \right] (1 + \lambda V_{DS}).$$

Kod PMOS tranzistora struja drejna je:

$$I_D = \begin{cases} \frac{KP}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{SD}), & \text{saturation} \\ \frac{KP}{2} \frac{W}{L} \left[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 \right] (1 + \lambda V_{SD}), & \text{triode} \end{cases}, \quad V_T = V_{T0} - \gamma \left(\sqrt{PHI + V_{BS}} - \sqrt{PHI} \right).$$

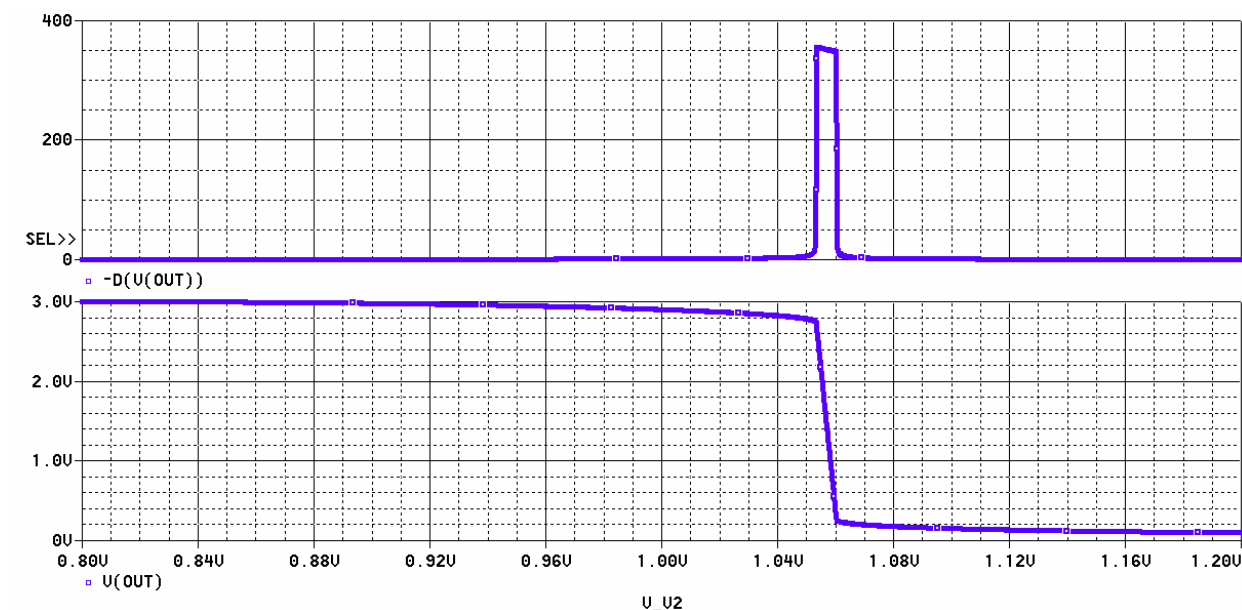
Vrednosti parametara u modelu tranzistora su: $KP = \mu C_{ox}$, $\lambda = \lambda$, $V_{T0} = V_{T0}$, $\gamma = \gamma$ i $PHI = 2\phi_F$.

Parametri DC Sweep analize su:

- Sweep variable Voltage source Name: V2
- Sweep type Linear
- Start value: 0.8 End value: 1.2 Increment: 0.1m

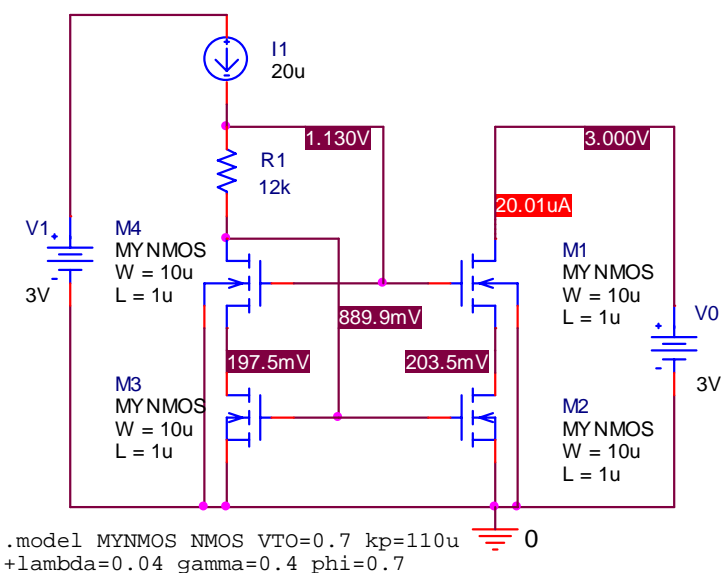
Po završetku analize otvara se prozor **PROBE**. Da bi se dobila zavisnost naponskog pojačanja dv_{out}/dv_2 u funkciji ulaznog napona v_2 , potrebno je redosledno aktivirati: **Trace/ Add Trace/ D(V(OUT))/ OK**. Ovim se aktivira funkcija diferenciranja iz polja **Functions or Macros/Analog Operators or Functions**.

Rezultat analize je prikazan na slici 3.16. Da bi se dobio moduo naponskog pojačanja, na slici je naponskom pojačanju dodat predznak minus.



Slika 3.16 Naponsko pojačanje i prenosna karakteristika CMOS pojačavača sa slike 3.15.

9. Kola sa MOS tranzistorima - strujno ogledalo



Slika 3.17 Strujno ogledalo sa NMOS tranzistorima.

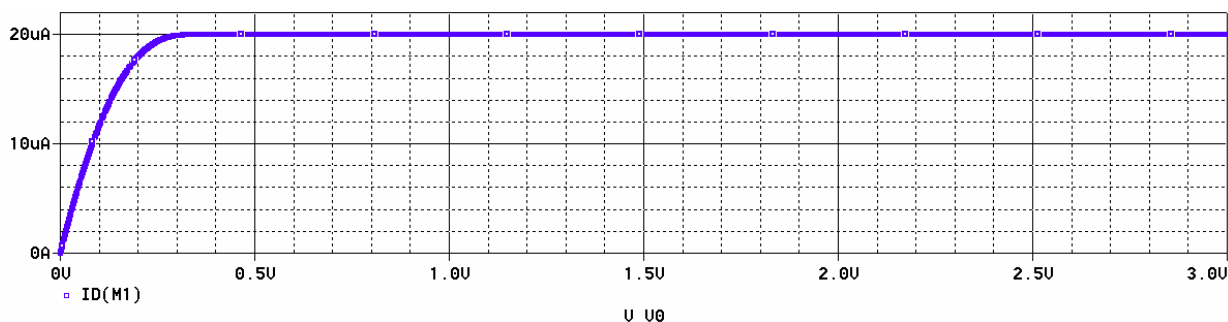
Na slici 3.17 prikazano je kolo jednog strujnog ogledala. Na istoj slici su dati i parametri modela upotrebljenog tranzistora. Potrebno je snimiti zavisnost struje $ID(M1)$ u funkciji promene napona na krajevima izlazne struje strujnog ogledala ($V0$), kada se on menja u opsegu od 0 do 3V sa korakom 0.1mV.

Na slici 3.17 prikazane su vrednosti napona svih čvorova i izlazne struje strujnog ogledala dobijene **Bias Point** analizom kada je $V0=3V$. Na osnovu raspodele napona u kolu zaključuje se da su svi MOS tranzistori u zasićenju. Potom je zadata DC Sweep analiza, a parametri ove analize su:

- Sweep variable Voltage source Name: V0

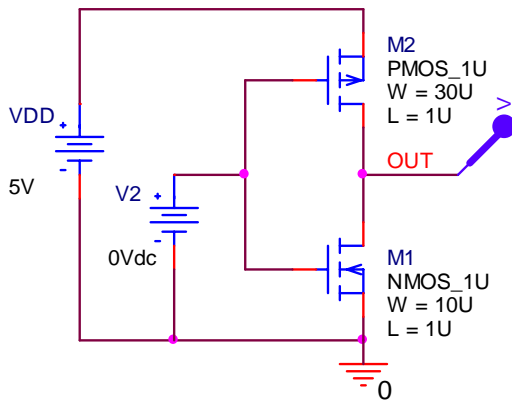
- Sweep type Linear
- Start value: 0 End value: 3 Increment: 0.1m

Rezultat DC Sweep analize prikazan je na slici 3.18.



Slika 3.18 Zavisnost izlazne struje strujnog ogledala sa slike 3.17 u funkciji napona V0.

10. Kola sa MOS tranzistorima – CMOS invertor



Slika 3.19 CMOS invertor.

Na slici 3.19 prikazan je jedan CMOS invertor. Parametri MOS tranzistora definisani su sledećim modelima:

```
.MODEL NMOS_1U NMOS LEVEL=3 TOX=200E-10
+NSUB=1E17 GAMMA=0.5 PHI=0.7 VTO=0.8 DELTA=3.0
+UO=650 ETA=3.0E-6 THETA=0.1 KP=120E-6 VMAX=1E5
+KAPPA=0.3 RSH=0 NFS=1E12 TPG=1 XJ=500E-9
+LD=100E-9 CGDO=200E-12 CGSO=200E-12 CGBO=1E-10
+CJ=400E-6 PB=1 MJ=0.5 CJSW=300E-12 MJSW=0.5
.MODEL PMOS_1U PMOS LEVEL=3 TOX=200E-10
+NSUB=1E17 GAMMA=0.6 PHI=0.7 VTO=-0.9 DELTA=0.1
+UO=250 ETA=0 THETA=0.1 KP=40E-6 VMAX=5E4
+KAPPA=1 RSH=0 NFS=1E12 TPG=-1 XJ=500E-9
+LD=100E-9 CGDO=200E-12 CGSO=200E-12 CGBO=1E-10
CJ=400E-6 PB=1 MJ=0.5 CJSW=300E-12 MJSW=0.5
```

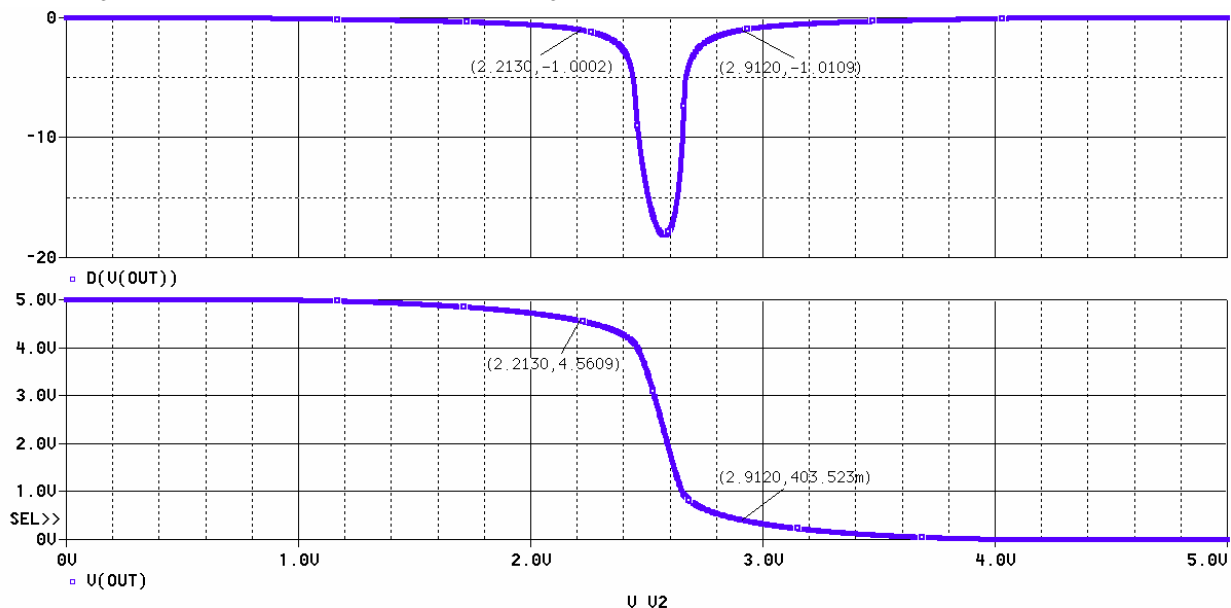
Za CMOS invertor sa slike potrebno je odrediti logičke nivoe V_{OH} (Output High=logička jedinica), V_{OL} (Output Low=Logička nula), V_{IH} (Input High) i V_{IL} (Input Low), kao i margine šuma logičke nule i jedinice $NML=V_{IL}-V_{OL}$ i $NMH=V_{OH}-V_{IH}$. Naponski nivo V_{IH} predstavlja najmanji napon na ulazu za koji se još uvek može smatrati da predstavlja logičku jedinicu, dok V_{IL} predstavlja najveći napon na ulazu za koji se još uvek može smatrati da predstavlja logičku nulu. Ova dva nivoa se određuju pronalaženjem tačaka na prenosnoj karakteristici gde je $dv_{out}/dv_{in} = -1$.

Parametri DC Sweep analize su:

- Sweep variable Voltage source Name: V2
- Sweep type Linear
- Start value: 0 End value: 5 Increment: 1m

Na slici 3.20 prikazani su rezultati analize $v_{out} = f(v_2)$ i $dv_{out}/dv_2 = g(v_2)$. Aktiviranjem ikonice **Toggle cursor** na dijagramu će se pojaviti kursor (na onom dijagramu gde stoji SEL>>), pomoću koga se pronađe tačka na gornjem grafiku koja ima vrednost na y osi -1. Potom se levim tasterom miša, ne menjajući položaj kursora, označi donji grafik i na kraju aktivira ikonica **Mark label**, kako bi se na grafiku označile koordinate željene tačke.

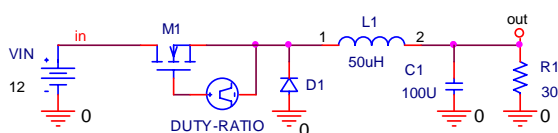
Na osnovu slike 3.20 se zaključuje da logički nivoi imaju sledeće vrednosti: $V_{OH} = 5V$, $V_{OL} = 0$, $V_{IL} = 2,21V$ i $V_{IH} = 2,91V$. Na osnovu ovih vrednosti određuju se i margine šuma $NM_H = V_{OH} - V_{IH} = 2,09V$ i $NM_L = V_{IL} - V_{OL} = 2,21V$.



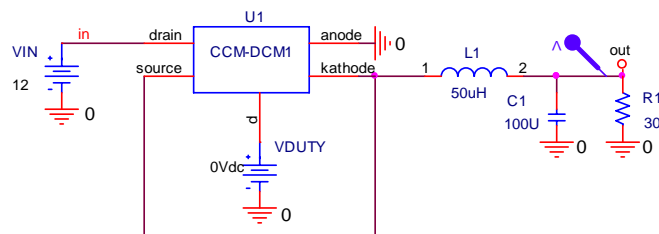
Slika 3.20 Određivanje logičkih nivoo i margina šuma CMOS invertora sa slike3.19.

11. DC-DC konvertori – Buck konvertor

Na slici 3.21 prikazan je jedan Buck konvertor, dok je na slici 3.22 prikazana njegova uprošćena šema. Ova šema je dobijena tako što je umesto prekidača (M1 i D1) sada u kolu usrednjen model vremenskih dijagrama napona i struja ove prekidačke mreže. Ovaj model je dobijen na osnovu zavisnosti vremenskih oblika napona i struja koje važe za prekidačku mrežu u diskontinualnom i kontinualnom režimu rada konvertora. Usrednjavanje omogućava znatno bržu analizu DC-DC konvertora, a daje dovoljno dobre rezultate u ustaljenom stanju i na učestanostima znatno nižim od prekidačke učestanosti f_s . Pošto je propusni opseg DC-DC konvertora obično znatno niži od prekidačke učestanosti, ovaj način analize se često primenjuje u praksi.



Slika 3.21 Buck DC-DC konvertor.



Slika 3.22 Usrednjeni model Buck DC-DC konvertora.

Model prekidačke mreže opisan je sledećim potkolom:

```
.subckt CCM-DCM1 1 2 3 4 5
+ params: L=50u fs=100k
Et 1 2 value={(1-v(u))*v(3,4)/v(u)}
Gd 4 3 value={(1-v(u))*i(Et)/v(u)}
Ga 0 a value={MAX(i(Et),0)}
Va a b
Ra b 0 10k
Eu u 0 table {MAX(v(5), v(5)*v(5)/(v(5)*v(5)+2*L*fs*i(Va)/v(3,4)))} (0 0) (1 1)
.ends
```

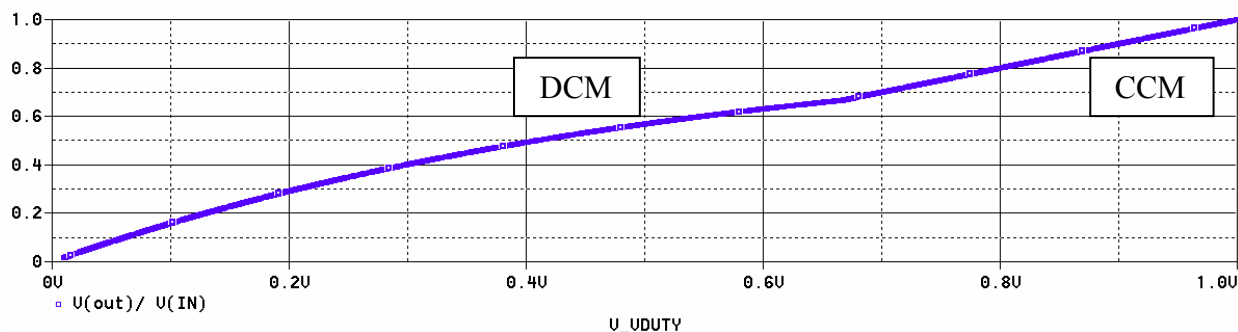
Potrebno je odrediti zavisnost odnosa napona na izlazu i ulazu Buck konvertora u ustaljenom stanju V_{out}/V_{in} u funkciji promene odnosa impuls-perioda prekidačkih impulsa D , odnosno $VDUTY$, $0.01 \leq VDUTY \leq 1$.

Parametri **DC Sweep** analize su:

- Sweep variable Voltage source Name: **VDUTY**
- Sweep type **Linear**
- Start value: **0.01** End value: **1** Increment: **1m**

Rezultat **DC Sweep** analize prikazan je na slici 3.23. Nelinearni deo prenosne karakteristike odgovara radu Buck konvertora u diskontinualnom režimu rada (**DCM**), dok je u kontinualnom režimu ova karakteristika linearna. Nelinearnost DCM-a i granica između DCM-a i CCM-a zavise

od odnosa $K = \frac{2Lf_s}{R}$, gde je R otpornost potrošača.

Slika 3.23 Zavisnost V_{out}/V_{in} u funkciji odnosa impuls-perioda pobudnih impulsa D kod Buck konvertora.