

CHALMERS

LTSPICE

Introduktion till kretssimulering

Göran Hult

2014-08-12

Simulering av elektriska kretsar med LTSpice

1 Introduktion

Det finns hundratals program för simulering av elektriska kretsar. Huvuddelen av dessa bygger på programmet SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). SPICE är ett gratis textbaserat program som utvecklades på Berkeleyuniversitetet på 1970-talet. Det är ganska knöligt att använda då man måste mata in sin krets i form av s k nätlistor i en texteditor.

För att underlätta användandet har det utvecklats grafiska skal som gör att man kan mata in sin krets genom att rita sitt kretsschema i en schemaeditor samt välja simuleringskommandon i dialogrutor.

Det som främst skiljer de olika SPICE-programmen åt är hur schemaediteringen, "Schematic Capture", fungerar samt hur simuleringsresultaten presenteras i en s k "Waveform Viewer".

Även hur man väljer olika simuleringskommandon skiljer sig åt mellan de olika programmen.

Ett vanligt SPICE program är PSPICE från Cadence som ingår i ett komplett CAD-paket för elektronikkonstruktion. En begränsad demo finns att ladda ner från tillverkaren. Nackdelen med PSPICE är att tröskeln för att komma igång med programmet är hög och att det är dyrt att skaffa en fullversion.

Multisim från National Instruments är ett annat mycket bra simuleringsprogram. Programmet använder "virtuella instrument" för att presentera simuleringsresultatet. Man ser med andra ord simuleringsresultatet m h a oscilloskop, multimetrar mm som placeras ut i schemat.

Det ser snyggt ut och är enkelt att använda men nackdelen är att det kan vara svårt att gå över till andra Spiceprogram eftersom man kanske inte inser vilket simuleringsalternativ som används av de olika "virtuella instrumenten".

LTSpice från Linear Technology är ett annat program som är mycket bra.

En gratis fullversion finns att ladda ner från tillverkaren på adressen:

<http://www.linear.com/designtools/softwareRegistration.jsp>

Fördelarna med detta program är att det är gratis och har inga begränsningar då det gäller kretsstorlek. Andra fördelar är: Snabb simulering, relativt enkelt att använda och att det är relativt enkelt att gå över till andra SPICE program då man lärt sig LTSpice. Nackdelen med LTSpice är att grafiken inte är lika snygg som i många andra program.

Adress till en bra diskussionsgrupp som behandlar LTSpice är:

<http://tech.groups.yahoo.com/group/LTspice/>

I denna diskussionsgrupp finns tusentals SPICE-modeller att ladda ner samt hur mycket material som helst att ta del av.

Ett alternativt bra gratis SPICE-program är TINA-TI som har snyggare grafik än LTSpice men är lite svårare att använda. TINA-TI har inga begränsningar på kretsstorlek men licensen tillåter inte att programmet används i utbildningssammanhang.

Standard simuleringsalternativ i SPICE

DC-operating point

Potentialer i alla noder beräknas likspänningsmässigt med ideala spolar behandlade som kortslutningar, ideala kondensatorer behandlade som avbrott samt med alla växelspanningskällor nollställda.

Transient analysis

Analys i tidplanet som använder sig av komponenternas kompletta olinjära modeller.

Detta är den vanligaste analysen och kan användas för att studera såväl insvängningsförlopp som stationärförlopp. Eventuella insignaler kan ha godtyckligt utseende. Frekvensinnehållet i kretsens alla signaler kan studeras med FFT. Vid transientanalys ingår vanligen att programvaran gör en inledande DC-operating point analys vilket medför att man inte behöver göra någon sådan separat.

AC analysis

Denna analys är en småsignalanalys som först gör en bestämning av likströmsarbetspunkten för kretsen, DC-operating point. Sedan beräknas en linjär småsignalmodell av kretsen runt arbetspunkten för växelspanningar. Används för att plotta frekvensfunktioner (Bodediagram) för kretsar samt beräkna t ex in- och utimpedans.

DC sweep

Stegar en eller flera DC-källor i ett intervall och beräknar likströmsarbetspunkten för kretsen med ideala spolar behandlade som kortslutningar, ideala kondensatorer behandlade som avbrott samt med alla växelspanningskällor nollställda. Används t ex för att plotta statisk överföringskaraktistik för komponent eller krets.

Noise

Denna analys är en småsignalanalys som först gör en bestämning av likströmsarbetspunkten för kretsen. Sedan beräknas en linjär småsignalmodell av kretsen runt arbetspunkten för växelspanningar. Slutligen skapas en brusmodell för kretsen.

DC transfer

Denna analys är en småsignalanalys som först gör en bestämning av likströmsarbetspunkten för kretsen. Sedan beräknas en linjär småsignalmodell av kretsen runt arbetspunkten för likspänningar. Slutligen beräknas förstärkning samt in- och utresistans för kretsen vid frekvensen 0 Hz.

Denna analys är inte så mycket använd eftersom man enbart erhåller resultatet för frekvensen 0 Hz.

2 LTSpice

De följande avsnitten är en lathund för att snabbt komma igång med schemaritning och de vanligaste simuleringstyperna i LTSpice. Som vanligt kan det mesta annat hittas i programmets hjälpfiler. Idéer kan även fås i exemplen i katalogen: C:\.....\LTC\LTspice\examples\Educational.

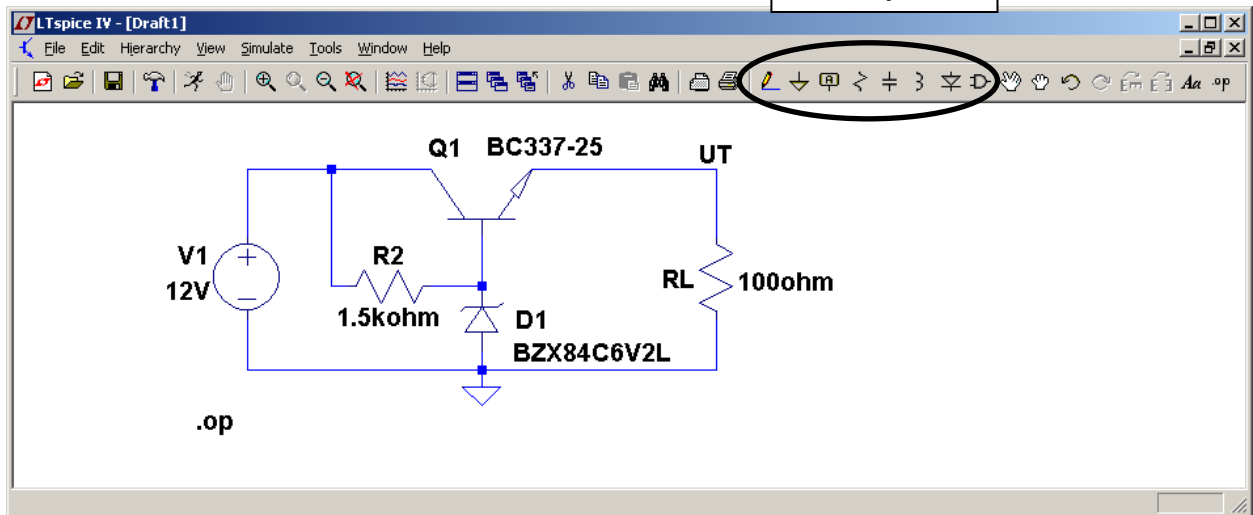
Rita kretsschema i LTSpice

Starta LTSpice.

Välj **File > New Schematic**

Fönstret kommer att se ut som på nästa sida förutom det uppritade schemat.

För att rita upp schemat gör på följande sätt:



För att placera ut ett motstånd klicka .

Flytta musmarkör till önskad position.

Om du vill rotera komponenten medurs tryck: **Ctrl+R**

Om du vill spegelvända komponenten tryck: **Ctrl+E**

Vänsterklicka för att placera komponenten.

Fortsätt att placera ut de andra motstånden på samma sätt. Högerklicka för att avsluta.

Kondensatorer, spolar, dioder och jordsymboler placeras på samma sätt.

OBS! Kondensatorer, spolar och spänningskällor i schemat kan tilldelas serie- och parallellresistans mm. De är alltså inte nödvändigtvis ideala utan motsvaras i ett beräkningsschema av den ideala komponenten serie- och parallellkopplade med andra ideala komponenter.

OBS! Varje krets måste innehålla minst en jordsymbol  eftersom programmet arbetar med nodanalys.

Övriga komponenter finns under symbolen .

Placera ut spänningskälla, transistor och zenerdiod: **voltage**, **npn** och **zener** under symbolen .

Koppla samman komponenterna genom att välja "wire-verktyget" .

Vänsterklicka på en punkt först, klicka sen på en mellanliggande punkt där du önskar en 90 graders krök, klicka slutligen på ändpunkten.

Då alla "trådar" dragits avsluta med högerklick.

Andra verktyg som kan vara användbara vid schemaritning:



"Cut"

Raderar komponenter, förbindelsetrådar, text m m.



"Move"

Flyttar komponent (eller text) utan att förbindelsetrådar följer med.
Används även då man vill rotera eller spegelvända en redan placerad symbol



"Drag"

Flyttar komponent. Förbindelsetrådar följer med.



"Text"

Placerar ut kommentartext i schemat.



”Label Net” Tilldela de noder som är av intresse lämpliga unika namn. I exemplet: UT.
De noder som inte tilldelats namn får ett nodnummer tilldelat av programmet som ej syns i schemat. Noder som har samma namn är elektrisk hopkopplade vilket kan användas för att ge ett snyggare schema.

Tilldela komponenterna värden genom att högerklicka på dem.

Använd decimalpunkt. (Decimalkomma kan ge svårfunna fel utan varningsmeddelande)

Man behöver inte skriva ut enheterna V, A, ohm, F, H, Hz e t c men det är ibland bra att göra det.

LTspice är "case insensitive" d v s skiljer inte på gemener och versaler.

Användbara prefix: (OBS prefix måste skrivas direkt efter komponentvärdet utan mellanslag)

f = femto **OBS!! F=f=femto**

p = piko

n = nano

u = mikro

m = milli

k = kilo

Meg = mega **OBS!! M=m=milli**

G = giga

T = tera

För zenerdioden: Högerklicka, Välj: **Pick New Diode**, Välj: BZX84C6V2L

Välj transistor på samma sätt.

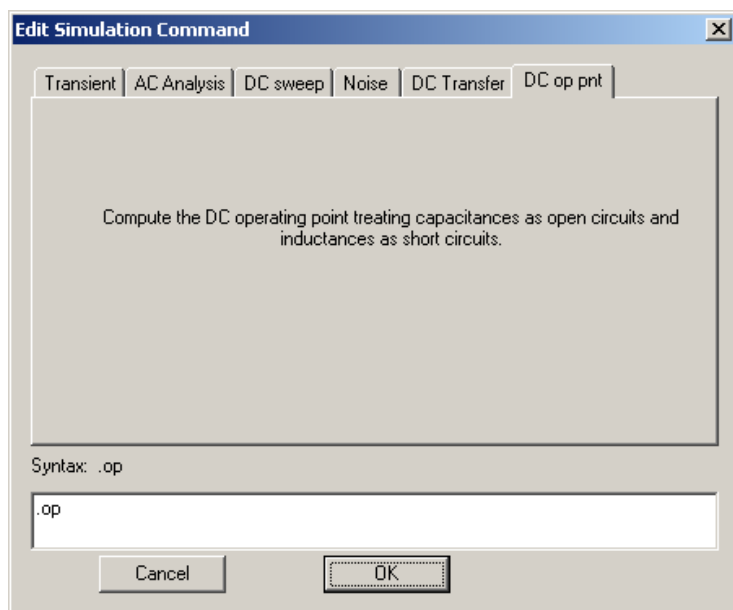
Om man vill ändra texten vid komponenten t ex R2 och V1:

Högerklicka på texten och skriv in önskad text samt välj eventuell textjustering.

3 Simulera krets. DC-analys av arbetspunkt

Välj **Simulate > Edit Simulation Command**

Här kan man välja typ av simulering.



För DC analys välj fliken **DC op pnt**. Bekräfta med OK

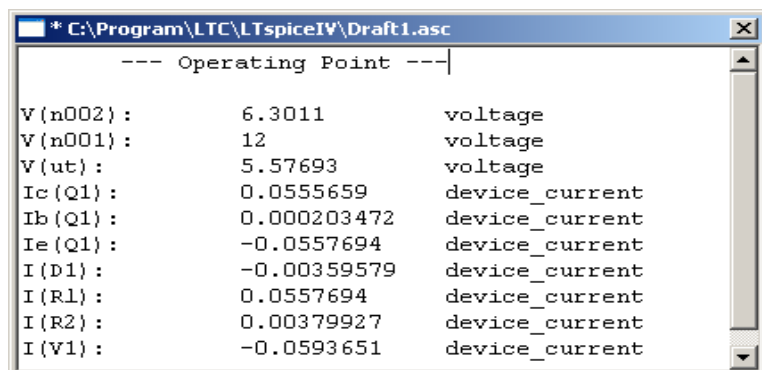
SPICE-direktivet **.op** som talar om typen av simulering kan nu placeras i schemat.

Kör en simulering



Simulate>Run

LTSpice beräknar nu alla nodpotentialer och strömmar genom komponenterna med ideala spolar behandlade som kortslutningar, ideala kondensatorer behandlade som avbrott samt med alla växelspanningskällor nollställda. En lista med nodpotentialer och strömmar genereras. Se nedan:



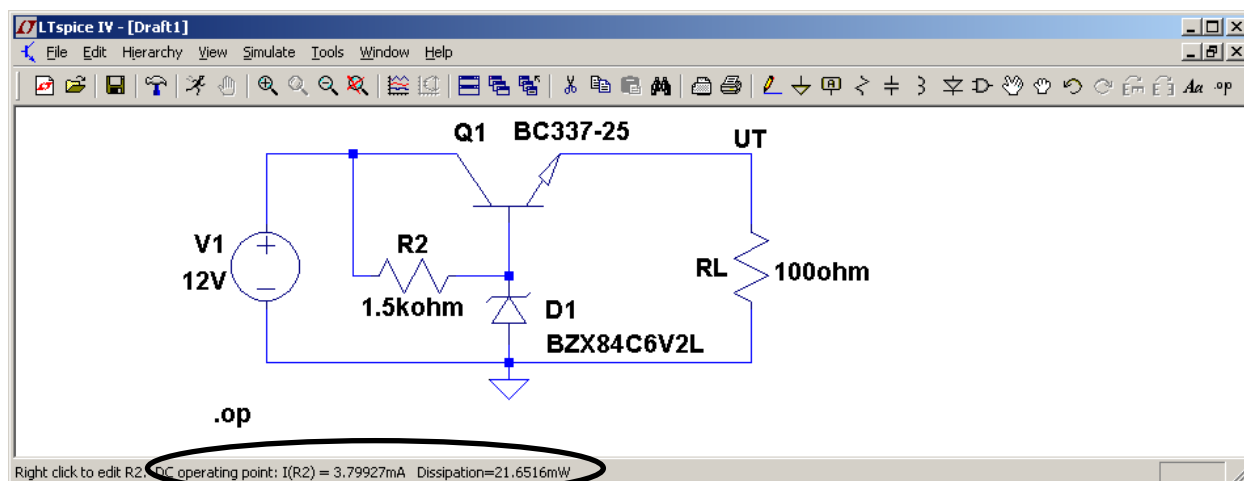
Strömmar genom spänningskällor har referensriktning in på +, därav minustecknet för I(V1) ovan. Strömmar genom motstånd, kondensatorer och spolar har referensriktning beroende på hur de placeras i schemat så ignorera eventuellt minustecken framför strömmarna och avgör strömmens riktning m h a nodpotentialerna. Tycker du att eventuella minustecknen för strömmar genom motstånd, kondensatorer och spolar är störande kan man göra på något av följande två sätt:

1. Välj  "Move" verktyget och rotera komponenten ett halvt varv m h a **Ctrl+R**.
2. Ta hänsyn till komponentens riktning redan då du ritar schemat.
Strömmens referensriktning är in i komponenten uppfifrån då du valt komponent.
Roterar du komponenten är strömmens referensriktning in från höger.
Roterar du komponenten och spegelvänder den är strömmens referensriktning in från vänster.

Om man stänger fönstret ovan kan man ändå studera nodpotentialer och strömmar genom komponenter samt även förlusteffekt i komponenter genom att placera musmarkören i noder respektive på komponenter. Aktuell storhet kan avläsas i statusraden längst ner till vänster i fönstret. På samma sätt kan man erhålla information om arbetspunkten då man har valt simuleringstyperna **Transient**, **DC Transfer** eller **AC Analysis** vilket gör att val av **DC op pnt** oftast är onödig. I bilden nedan har musmarkören (hand) pekat på R2.

Om man vill se nodpotentialerna inne i schemat gör på ett av följande två sätt:

1. Klicka på önskad nod. Detta fungerar bara då endast DC-analys görs.
2. Högerklicka på tom yta i schemat. Välj: **View>Place .op Data Label**. Klicka på önskad nod.
Detta alternativ fungerar även vid Transientanalys och AC-analys

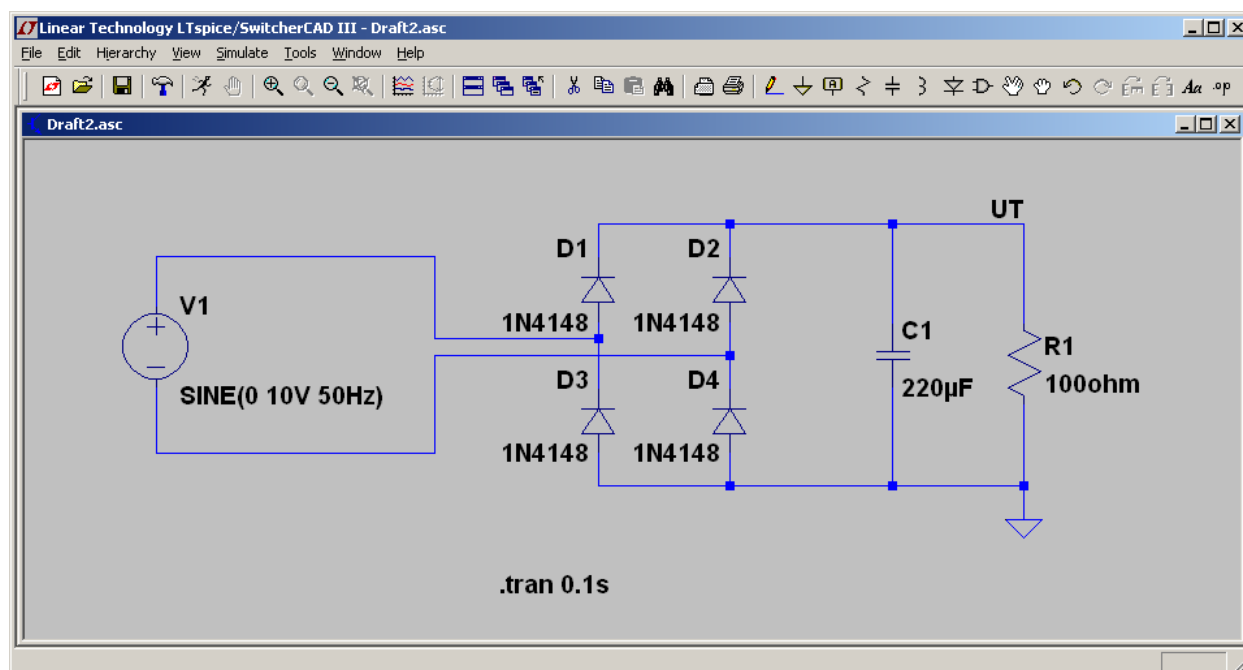


Ström och förlusteffekt

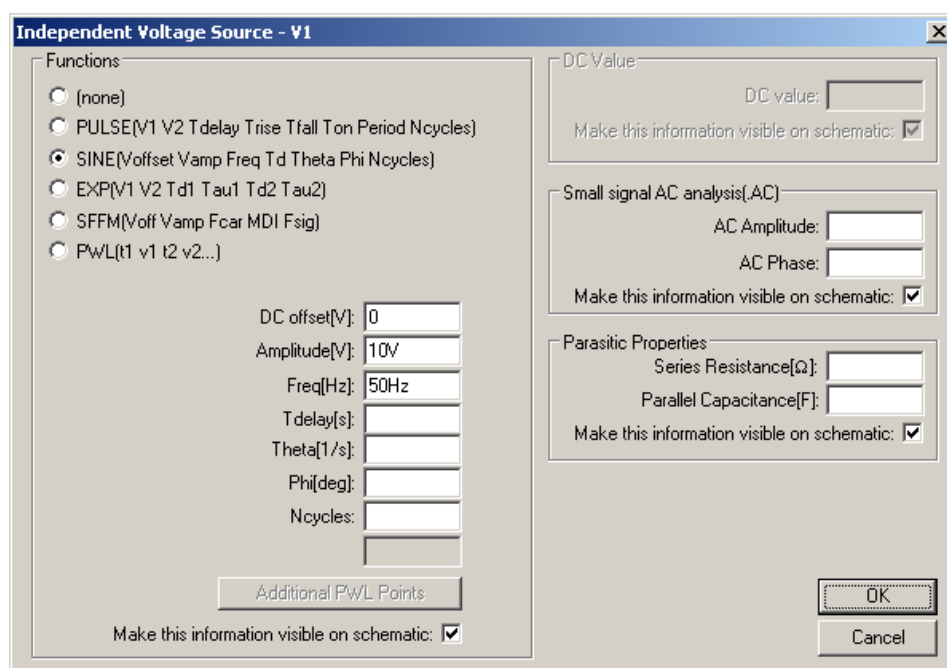
4 Simulera krets. Transientanalys

Detta är den vanligaste simuleringstypen där man erhåller information om både arbetspunkt och insvängningsförlopp samt stationärtillstånd om simuleringstiden är tillräckligt lång. Man kan även erhålla frekvensspektrum m h a FFT.

Rita upp nedanstående schema:



För att erhålla sinusformad växelspanning från spänningskällan högerklicka på källan och välj **Advanced**. Fyll i dialogrutan som dyker upp enligt figur nedan:



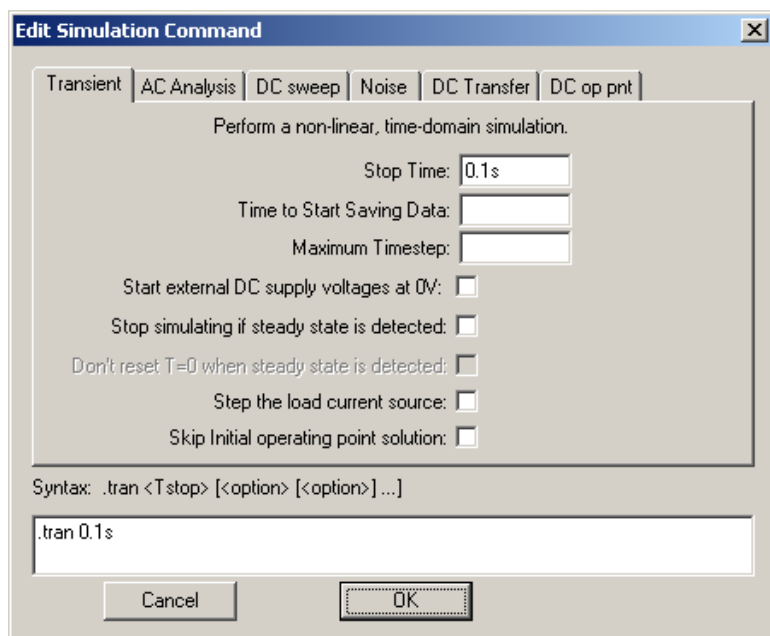
Bekräfta med OK.

Välj **Simulate > Edit Simulation Command**

Här kan man välja typ av simulering.

För Transientanalys välj fliken **Transient**.

Fyll i önskad simuleringstid enligt figur nedan Bekräfta med OK



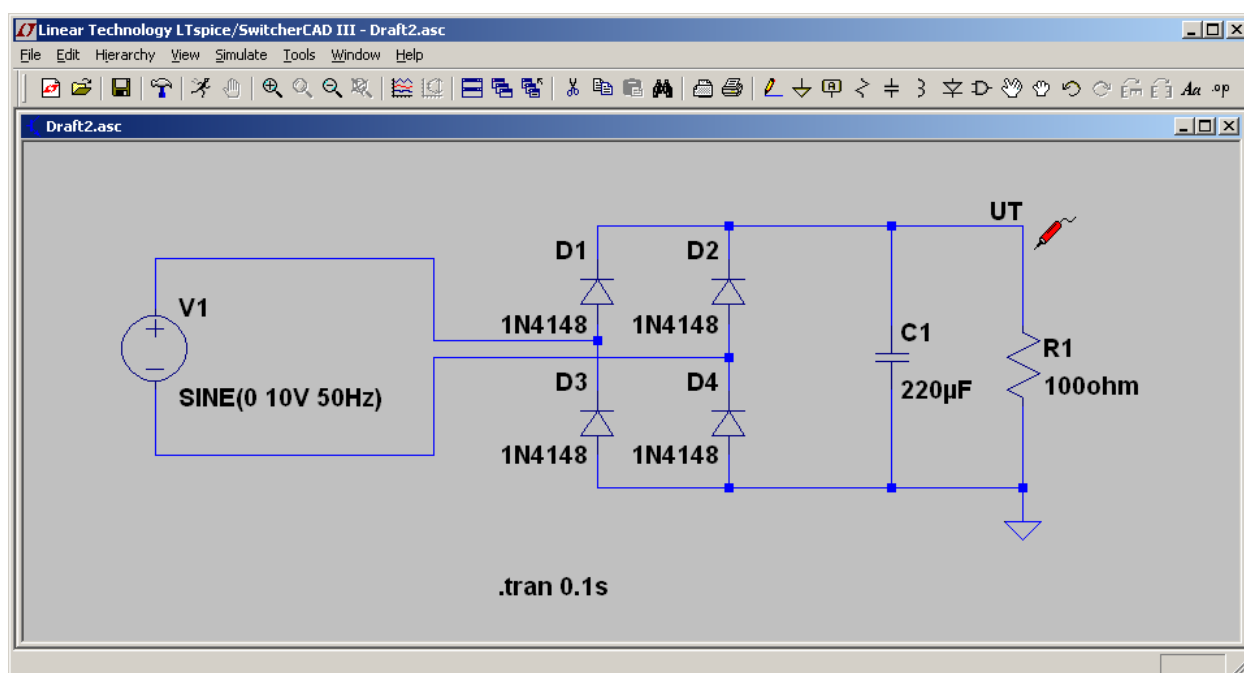
SPICE-direktivet **.tran** som talar om typen av simulering kan nu placeras i schemat

Kör en simulering  **Simulate>Run**.

Antag att vi vill plotta potentialen i noden UT:

Ställ musmarkören i noden UT och en röd mätprob dyker upp.

Klicka och potentialen i noden UT ritas i plotfönstret.



För att plotta strömmen genom exempelvis dioden D1:

Ställ musmarkören över komponenten och en "strömtång" dyker upp.  Pilen anger strömmens referensriktning. Klicka och strömmen ritas i plotfönstret.

Man kan plotta momentaneffekten i en komponent genom att hålla nere **Alt** + Klicka på komponent.

(Musmarkören ändrar utseende till en termometer när den befinner sig på en komponent) 

Mätningar i plotfönstret kan göras på två sätt:

1. Håll musmarkören över en punkt på kurvan, koordinaterna visas i statusraden nere till vänster i fönstret.
2. Inför mätmarkörer genom att klicka på variabelnamn i plotfönstret. Om man klickar ytterligare en gång fås 2 markörer. Dra markörer med musen.

Man kan ändra skala i plotfönstret genom att klicka på skalorna i plotfönstret.

Man kan också zooma in en del av plotfönstret genom att hålla ner vänster musknapp och dra upp en rektangulär ruta för det intressanta området.

Man kan få två 2 diagram i plotfönstret genom att högerklicka och välja Add Plot Pane.

Man kan mäta spänningen mellan 2 noder genom att klicka på ena noden och hålla vänster musknapp nere medan man flyttar musmarkören till den andra noden.

Man kan mäta strömmen i en ledare genom att hålla nere **Alt** + Klicka på ledaren.

Man kan ta reda på medelvärdet och effektivvärdet för en plottad storhet genom att hålla nere **Ctrl** + Klicka på intressant storhet i plotfönstret.

Man kan erhålla tjockare kurvor i plotfönstret:

Tools>Control Panel> eller 

Under fliken **Waveforms**: Välj: Plot data with thick lines.

Vid utskrift av plotfönstret kan det ibland vara fördelaktigt med vit bakgrund:

Tools>Color Preferences>

Under fliken **Waveform , Selected Item>Background**, Välj vit bakgrundsfärg genom att ställa skjutreglagen för rött, grönt och blått på maximum.

Om man önskar ett FFT-spektrum:

Placera SPICE-direktivet: ".options plotwinsize=0" på ritningen med knappen .

Välj: **Simulate > Edit Simulation Command**, under fliken **Transient** välj Maximum Timestep så att antalet beräkningspunkter under simuleringstiden är mycket större än antal datapunkter i FFT:n.

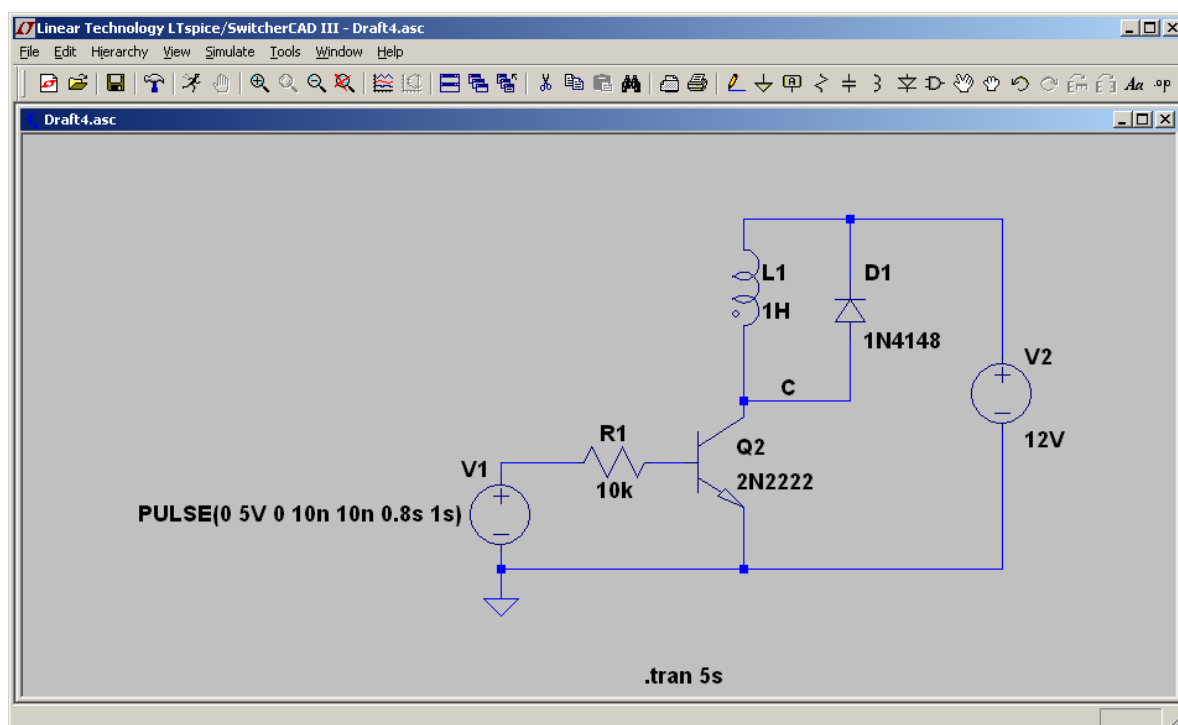
Dessa 2 val gör att dynamiska området för FFT-spektrat blir mycket större en defaultinställningen i LTSpice.

Kör en simulering  **Simulate>Run**.

Klicka på plotfönstret och välj: **View>FFT**.

5 Simulera krets. Transientanalys med pulståg.

Nedan syns ett schema som beskriver hur man driver reläspolar med en transistor, en mycket viktig tillämpning. Rita upp schemat.



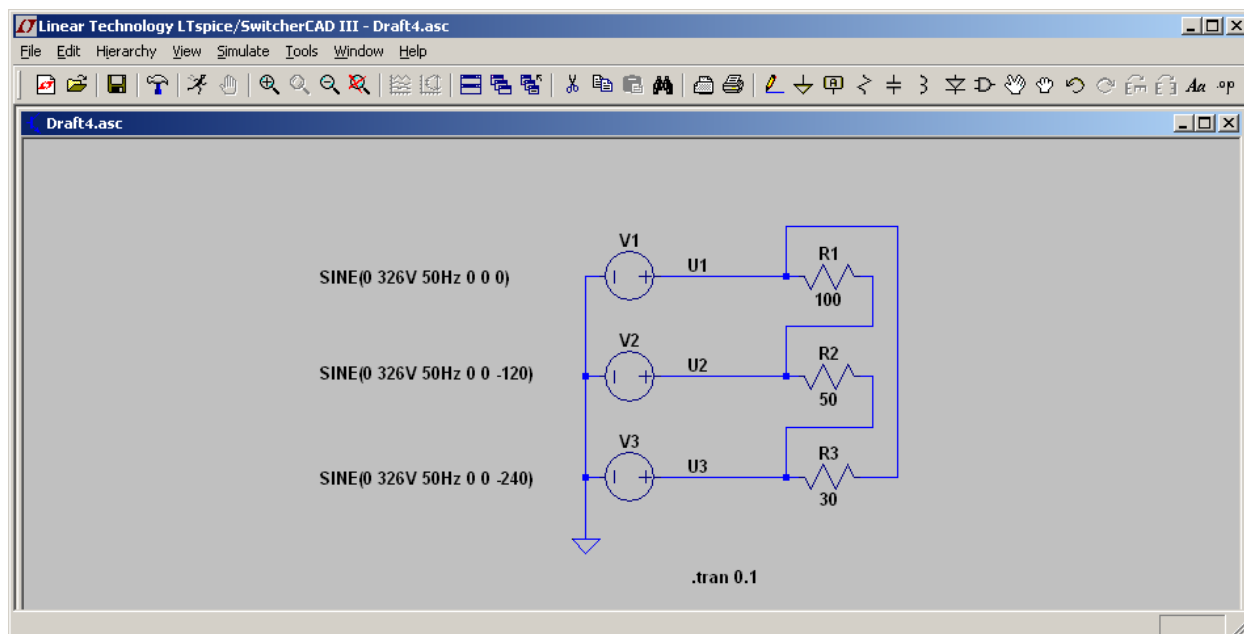
Spole L1 ska representera en reläspole. Välj dess induktans till 1H och dess serieresistans till 1 kohm. Källan V1 skall representera utgången på en mikroprocessor. Vi önskar ett periodiskt pulståg med perioden 1s och pulser som är 5V under 0.8s. För att efterlikna mikroprocessorutgången väljer vi stig- och falltid till 10 ns.

Fyll i egenskaperna för källan V1 enligt figur nedan:

Välj transientanalys med en simuleringstid på 5 sekunder. Kör en simulering
Nu kan man t ex mäta upp max kollektorpotential för transistorn samt transistorns bottenningsspänning.

6 Simulera trefasssystem

Antag att man vill simulera ett trefasssystem med 400V huvudspänning och frekvensen 50Hz.
Rita upp schemat nedan.



Fasförskjutningen på -120° resp. -240° erhålls genom att fylla i Phi[deg] enligt dialogrutan nedan.

Välj transientanalys med en simuleringstid på 0.1 sekunder. Kör en simulering.

Plotta samtliga linjeströmmar.

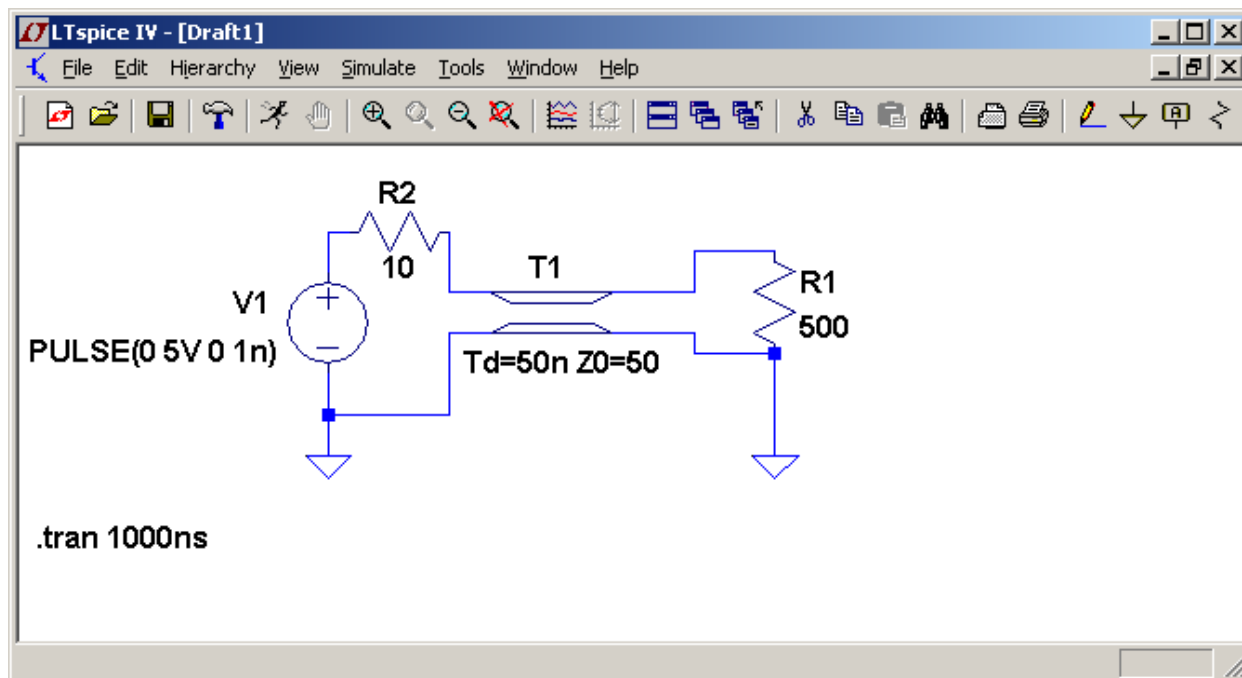
Man kan mäta strömmen i en ledare genom att hålla nere **Alt** + vänsterklicka på ledaren.

Man kan ta reda på medelvärde och effektivvärde för en plottad storhet genom att hålla nere **Ctrl** + vänsterklicka på intressant storhet i plotfönstret. Bestäm på detta sätt samtliga linjeströmmars effektivvärden.

7 Simulera transmissionsledning

Antag att man vill simulera hur ett 5 V spänningssteg uppför sig på en förlustfri transmissionsledning med karakteristiska impedansen $Z_0 = 50 \Omega$ och löptiden $T_d = 50 \text{ ns}$.

Rita upp schemat nedan. Förlustfri transmissionsledning: **tline** under symbolen



Steget på 5 V med stigtid 1 ns erhålls genom att välja parametrar för spänningskällan enligt nedan:

Independent Voltage Source - V1

Functions

- ☐ (none)
- ☒ PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Ncycles)
- ☐ SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Ncycles)
- ☐ EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)
- ☐ SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)
- ☐ PWL(t1 v1 t2 v2...)
- ☐ PwL FILE: Browse

Vinitial[V]: 0

Von[V]: 5V

Tdelay[s]: 0

Trise[s]: 1n

Tfall[s]:

Ton[s]:

Tperiod[s]:

Ncycles:

Additional PwL Points

Make this information visible on schematic: ☒

DC Value

DC value:

Make this information visible on schematic: ☒

Small signal AC analysis(AC)

AC Amplitude:

AC Phase:

Make this information visible on schematic: ☒

Parasitic Properties

Series Resistance[Ω]:

Parallel Capacitance[F]:

Make this information visible on schematic: ☒

Cancel OK

Välj transientanalys med en simuleringstid på 1000 ns. Kör en simulering.

Genom att klicka på när- respektive fjärrände på transmissionsledningen kan man studera spänningarna i ledningens båda ändar.

8 Simulera krets. DC sweep

Om man är intresserad av överföringskaraktistik för en komponent eller en krets kan man använda simuleringstypen DC sweep. DC sweep stegar en eller flera oberoende spännings- eller strömkällor i ett intervall. Ideala spolar behandlas som kortslutningar, ideala kondensatorer behandlas som avbrott och alla växelspänningskällor är nollställda.

Man kan sedan välja att visa valfri ström eller spänning som funktion av den variabla stegade spänningen/strömmen.

Vi ska här använda funktionen för att rita upp ström-spänningskaraktistiken för en diod.

Rita upp nedanstående schema. Högerklicka på spänningskällan välj OK

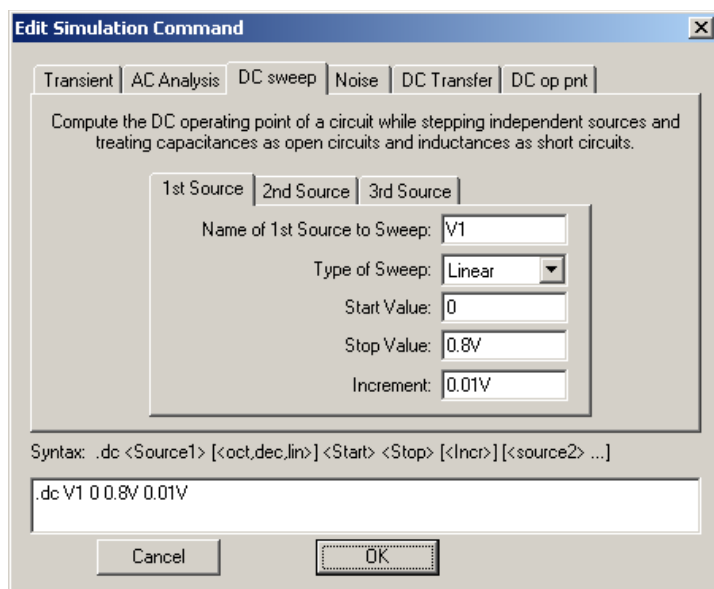


Välj **Simulate > Edit Simulation Command**

Här kan man välja typ av simulering.

För DC sweep välj fliken **DC sweep**.

Fyll i enligt fig nedan. Bekräfta med OK



SPICE-direktivet **.dc** som talar om typen av simulering kan nu placeras i schemat.

Källan V1 kommer nu att stegas mellan 0V och 0.8V i steg om 0.01V

Kör en simulering  **Simulate>Run**

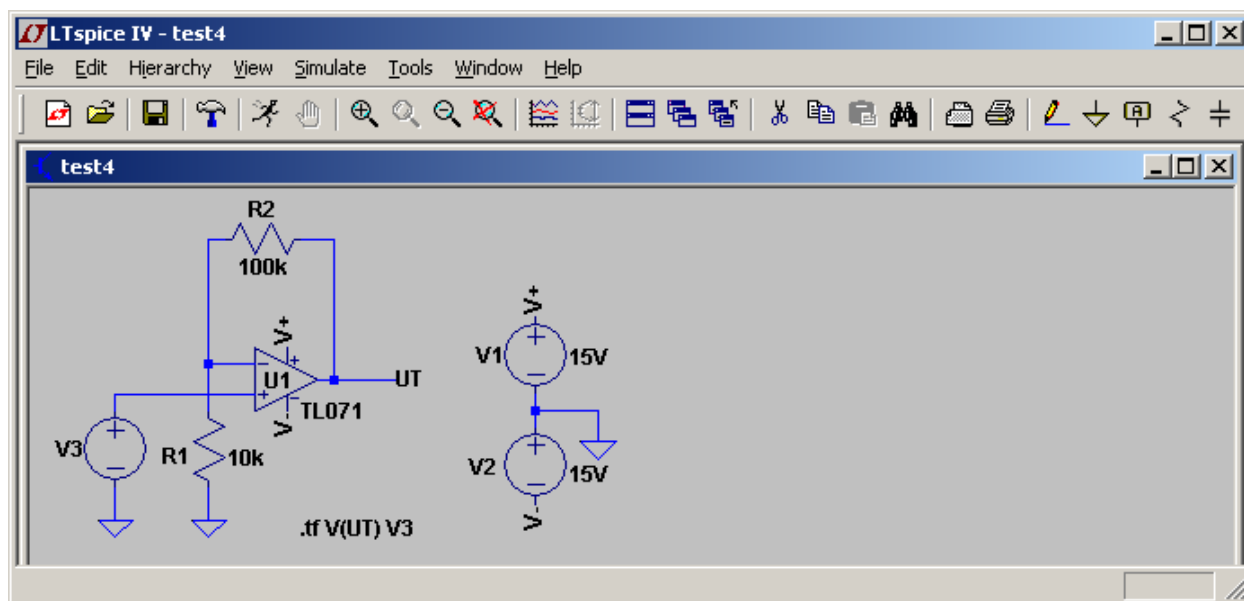
Välj önskad storhet att plotta. Välj strömmen genom dioden genom att klicka på dioden.

Nu ska du kunna studera strömmen genom dioden $I(D1)$ som funktion av spänningen V1 över dioden.

9 Simulera krets. DC Transfer

Om man har en DC-kopplad förstärkare, dvs en förstärkare som kan förstärka likspänningar kan man enkelt få reda på likspänningsförstärkning samt in- och utresistans för förstärkaren.

Rita upp schemat nedan.

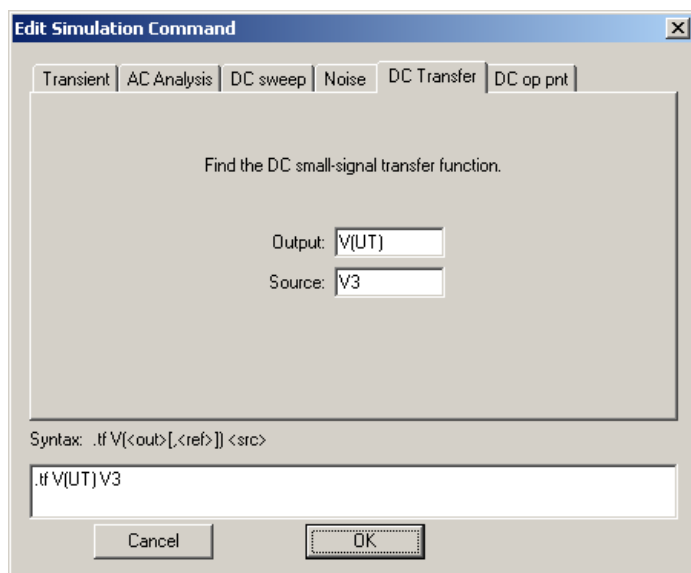


Välj **Simulate > Edit Simulation Command**

Här kan man välja typ av simulering.

Välj fliken **DC Transfer**.

Fyll i enligt fig nedan. Bekräfta med OK



SPICE-direktivet **.tf** som talar om typen av simulering kan nu placeras i schemat.

Denna analys är en småsignalanalys som först gör en bestämning av likströmsarbetspunkten för kretsen. Sedan beräknas en linjär småsignalmodell av kretsen runt arbetspunkten. Slutligen beräknas förstärkning samt in- och utresistans för kretsen vid frekvensen 0 Hz.

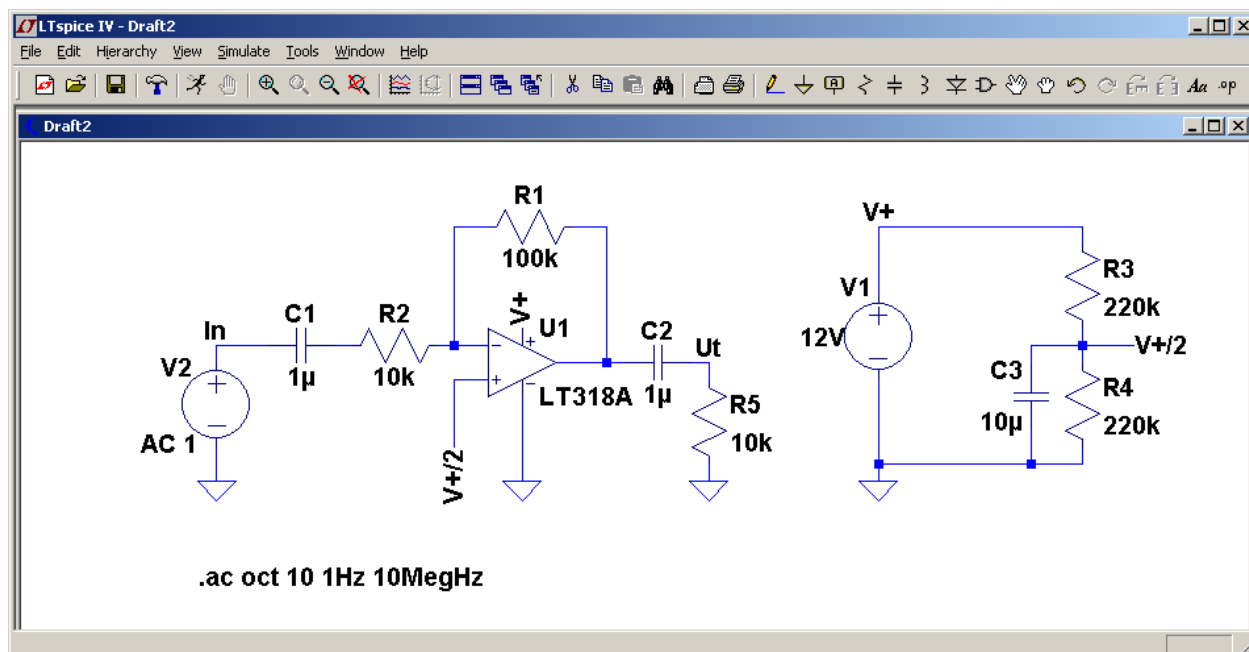
Kör en simulering



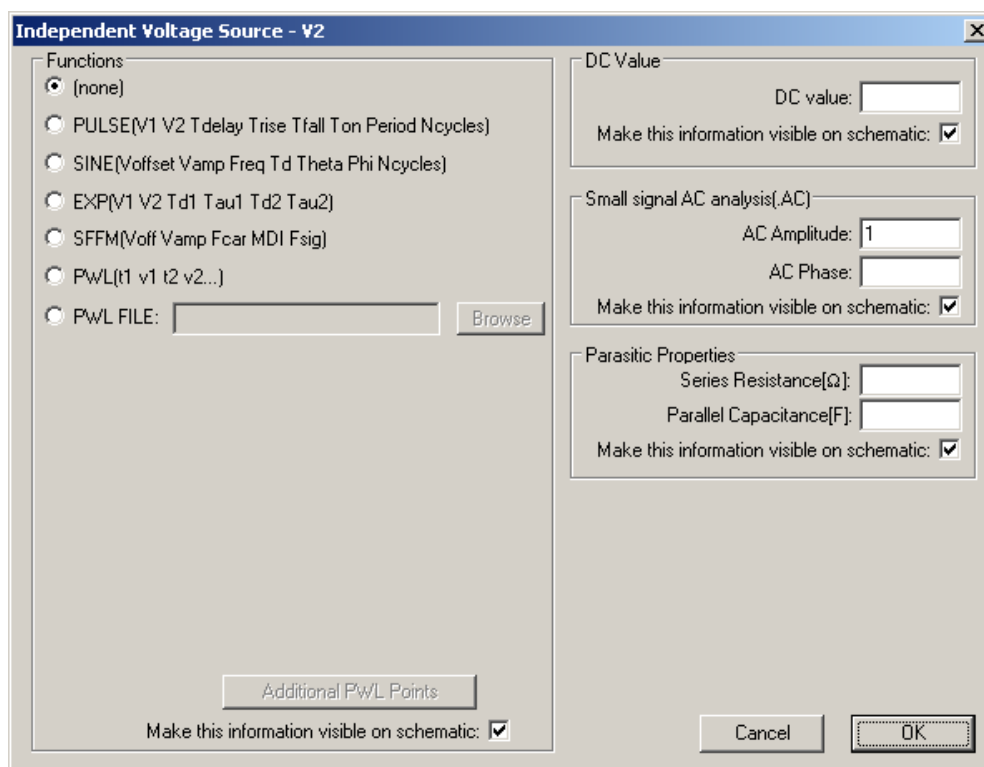
Simulate>Run.

10 Simulera krets. AC-analys (Småsignalanalys)

Antag att vi vill ta reda på övre och undre gränshänsen för en inverterande operationsförstärkarkoppling. Rita upp nedanstående schema:



För att erhålla en signalkälla som är anpassad för småsignalanalysen: Högerklicka på källan, välj **Advanced**. Fyll i dialogrutan som dyker upp enligt figur nedan:



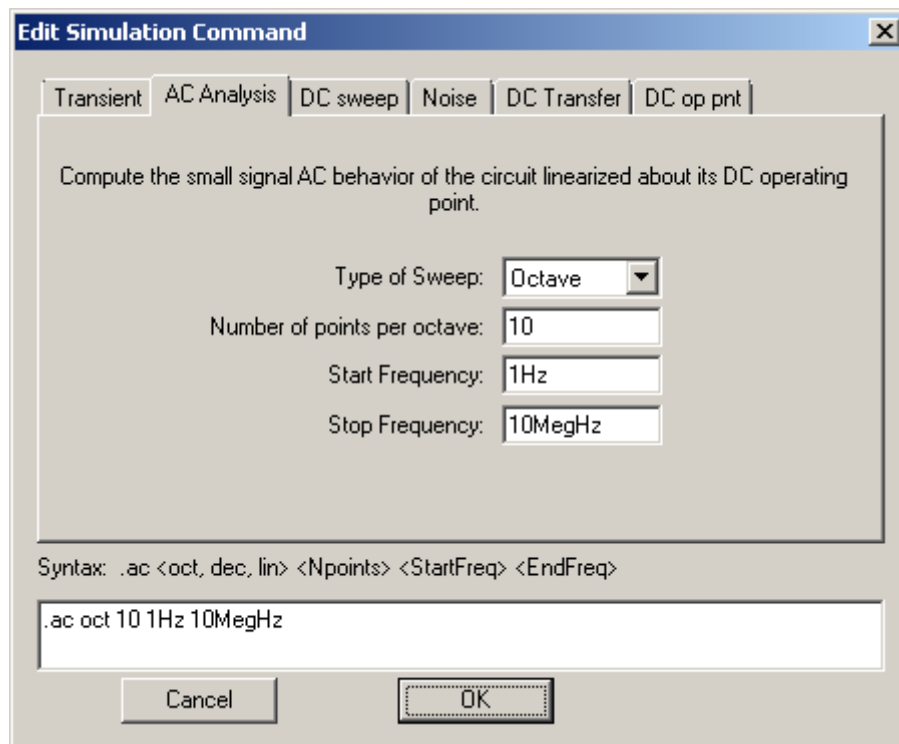
Bekräfta med OK.

Välj **Simulate > Edit Simulation Command**

Här kan man välja typ av simulering.

För AC-analys välj fliken **AC Analysis**.

Fyll i enligt figur nedan. Bekräfta med OK



SPICE-direktivet **.ac** som talar om typen av simulering kan nu placeras i schemat.

Denna analys är en småsignalanalys som först gör en bestämning av likströmsarbetspunkten för kretsen. Sedan beräknas en linjär småsignalmodell av kretsen runt arbetspunkten. Slutligen skapas ett Bodediagram som beskriver kretsens frekvensfunktion från spänningskällan (**AC 1**) till den valda utsignalen. Bodediagrammet plottas mellan en undre startfrekvens och en övre stoppfrekvens.

Kör en simulering



Simulate>Run.

Plotta bodediagrammet genom att välja V(ut) som plotstorhet.

AC-analys kan också användas till att plotta impedansen som funktion av frekvensen för en krets.

För att plotta inimpedansen i förstärkaren i exemplet: Klicka på noden "In", högerklicka på namnet i plotfönstret och ange algebraiskt uttryck för det som ska plottas. I vårt fall:

$$V(in)/I(C1)$$

Om man klickar på skalan vid vertikalaxeln och anger att vertikalaxeln skall ha linjär skala så blir även enheten korrekt angiven i Ohm.

11 Bestämning av stabilitetsmarginaler

Antag att man önskar bestämma fasmarginalen för en förstärkarkoppling.

Standardmetoden för detta är att bryta upp den slutna slingan på ett lämpligt ställe och bestämma frekvensfunktionen för ett varv runt den slutna slingan och plotta motsvarande Bodediagram.

Nackdelarna med att bryta upp slingan är att likströmsarbetspunkten i kretsen påverkas vilket kan ge en helt felaktig småsignalmodell samt att man måste införa belastningsimpedanser för att inte ändra impedansnivåerna i den öppna kretsen i förhållande till den slutna kretsen.

I nedanstående schema har en bättre metod som brukar kallas Middlebrooks metod använts vilket eliminerar ovanstående nackdelar.

Bryt upp kretsen i återkopplingsslingan vid förstärkarens utgång.

Infoga en växelspänningskälla vid avbrottet enligt föregående avsnitt om AC-analys.

Simulera med AC-analys. Se figur nedan.

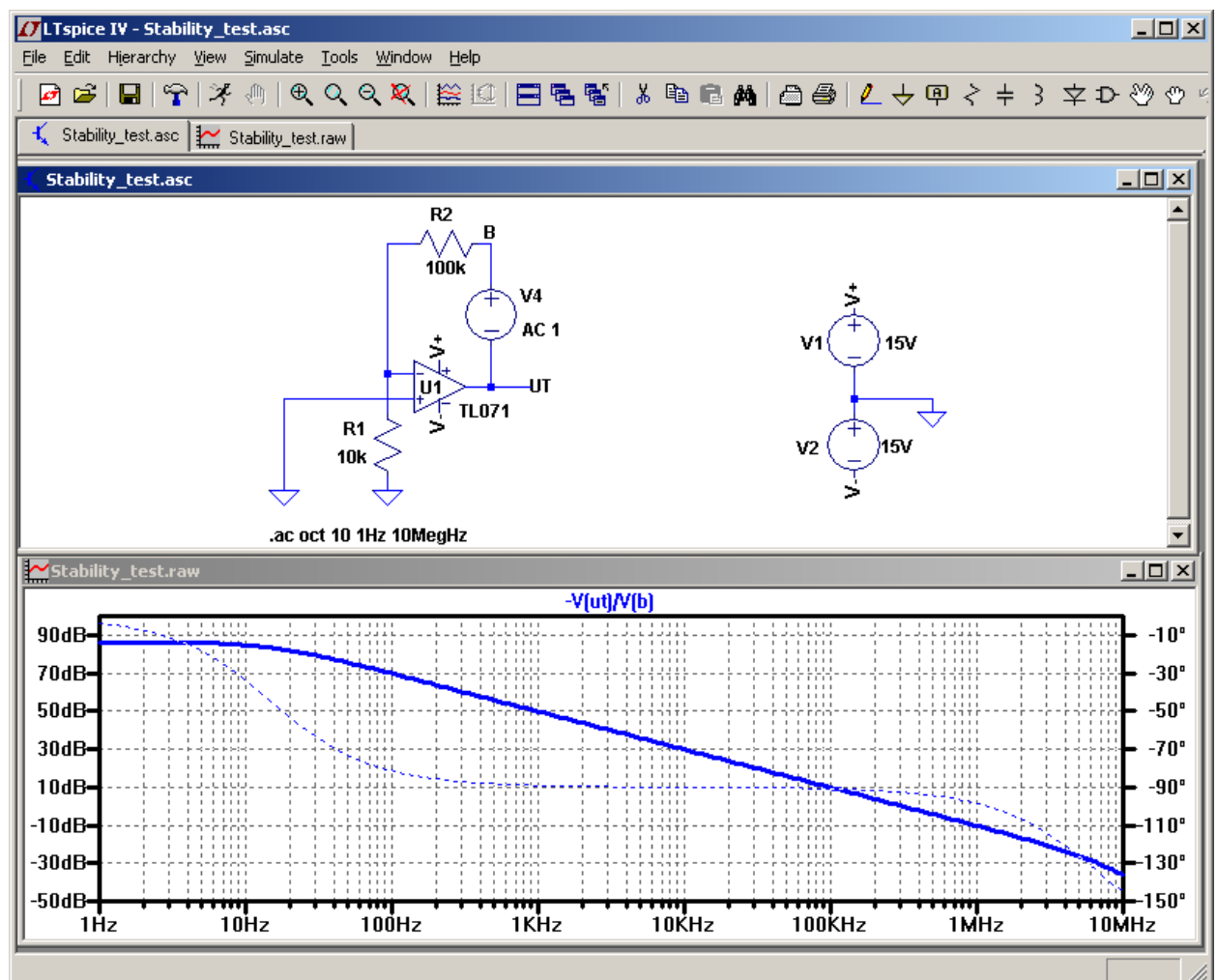
Med plotfönstret aktivt: **Plot Settings > Add trace** eller tryck **Ctrl+A**

Under Expression(s) to add: $-V(u_t)/V(b)$

Bodediagrammet för (-)slingförstärkningen (i reglerteknik kallad kretsöverföringen) plottas nu i plotfönstret. I Bodediagrammet kan man nu avläsa fasmarginal och förstärkningsmarginal.

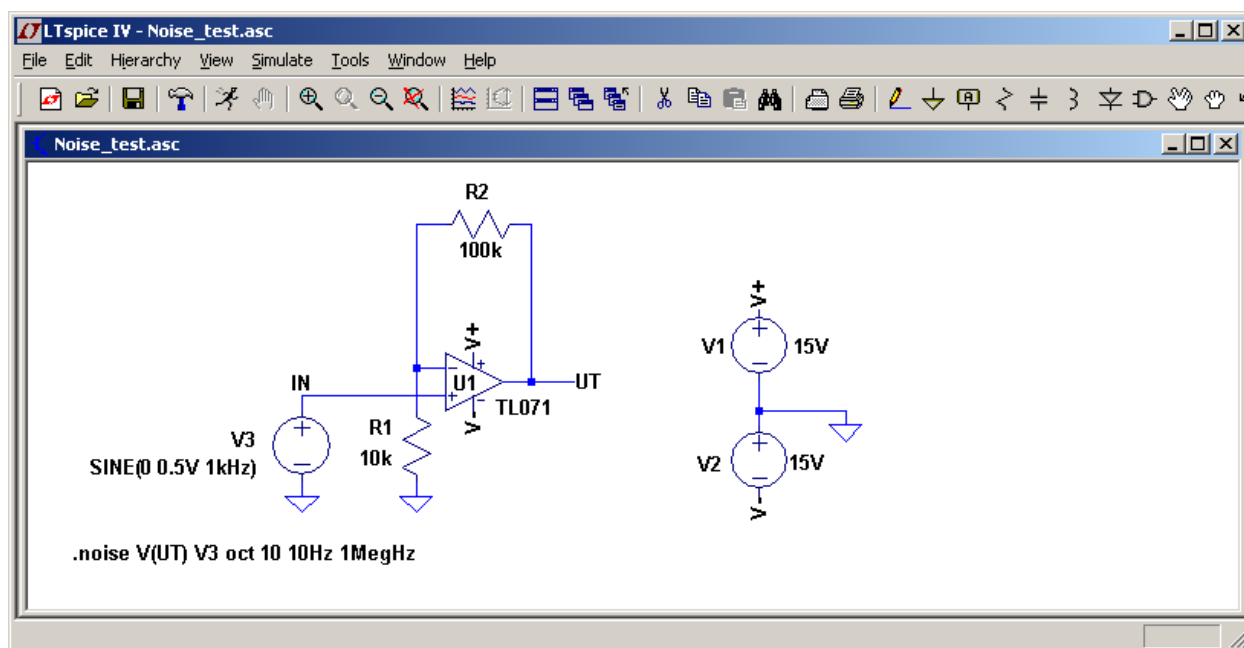
Normalt brukar man önska en fasmarginal större än 45° .

Vill man ha ett översvängningsfritt stegsvar bör fasmarginalen vara större än 75° .



12 Brussimulering

Antag att man vill bestämma brusnivån från en förstärkarkoppling.
Rita upp nedanstående krets:

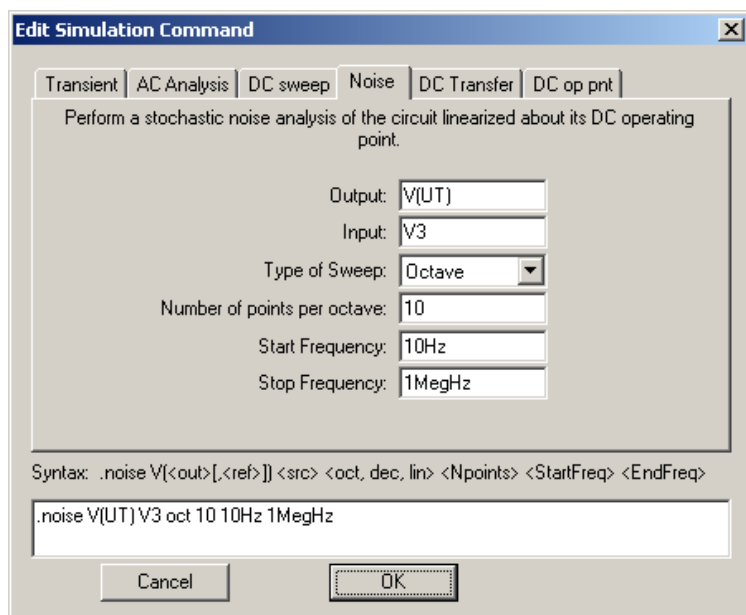


Välj **Simulate > Edit Simulation Command**

Här kan man välja typ av simulering.

För brusanalys välj fliken **Noise**.

Fyll i enligt figur nedan. Bekräfta med OK



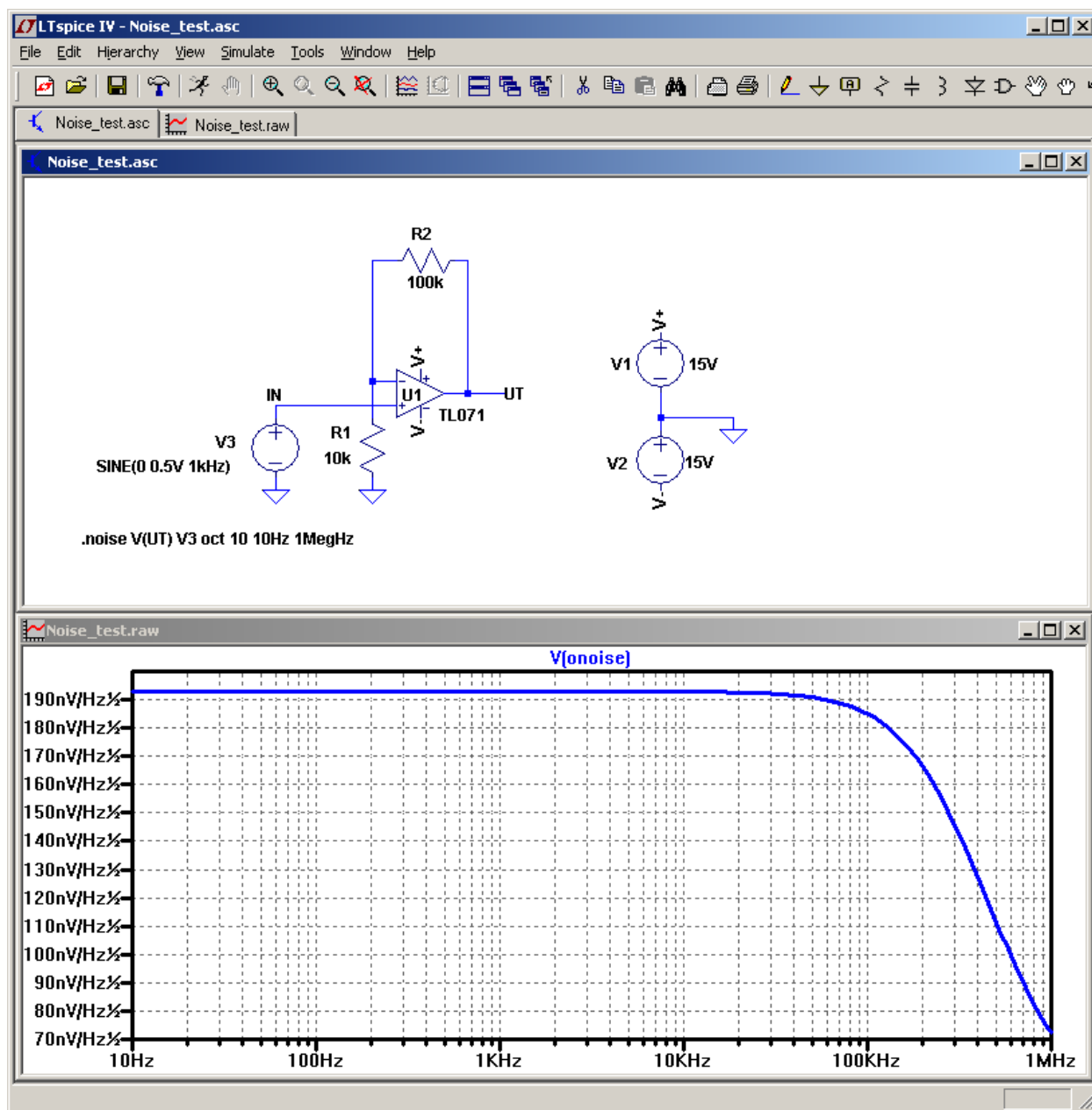
SPICE-direktivet **.noise** som talar om typen av simulering kan nu placeras i schemat.

Denna analys är en småsignalanalys som först gör en bestämning av likströmsarbetspunkten för kretsen. Sedan beräknas en linjär småsignalmodell av kretsen runt arbetspunkten. Slutligen skapas en brusmodell för kretsen mellan en undre startfrekvens f_1 och en övre stoppfrekvens f_2 .

Kör en simulering  **Simulate>Run.**

Plotta den spektrala brustätheten $V[noise]$ på förstärkarens utgång genom att klicka på utnoden UT.

$V[noise]$ är angiven i enheten $\left[\frac{V}{\sqrt{Hz}} \right]$.



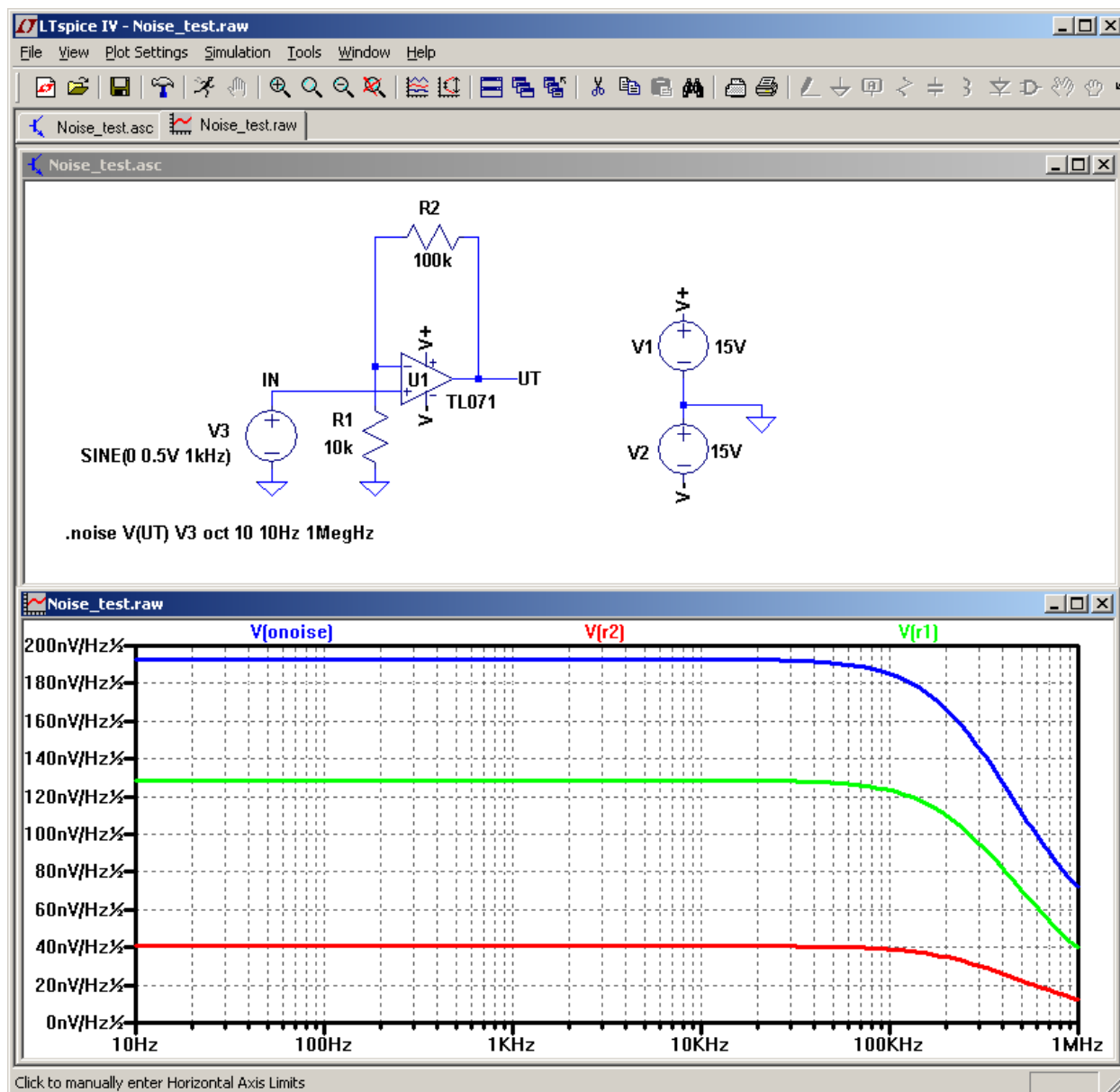
Effektivvärdet av totala brusspänningen på utgången inom frekvensområdet $f_1 < f < f_2$ ges av:

$$V_{RMS} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} V^2[noise] df}$$

V_{RMS} erhålls i LTspice genom att **Ctrl** + Klicka på $V[noise]$ i plotfönstret.

Om man vill undersöka hur mycket varje komponent bidrar till bruset på utgången så är det bara att klicka på komponenten.

I nedanstående figur har man klickat på R1 respektive R2.



Den del av bruset som inte kommer från de yttre komponenterna kommer från operationsförstärkaren, V_{OP} , och kan bestämmas med hjälp av operationsförstärkarens datablad eller enligt följande:

$$V_{OP} = \sqrt{V^2[onoise] - V_1^2 - V_2^2 - V_3^2 - \dots}$$

där $V[onoise]$ är den totala brustätheten på utgången och V_x är brustätheten på utgången som kommer från de yttre komponenterna (ovan $V[r1]$ och $V[r2]$).

Bruset från operationsförstärkaren är oftast högre i verkligheten än vid simuleringen vilket beror på att alla brusktällor oftast inte modelleras i macromodellen för operationsförstärkaren.

13 Stegning av parametrar i krets

Vid alla typer av simulering kan man stega olika parametrar i kretsen, t ex resistans, kapacitans eller spänning. Parametern kan stegas med Spice-direktivet: **.step**

Exempel 1.

.step param R 5k 9k 1k

Parametern R stegas från 5 k Ω till 9 k Ω i steg om 1 k Ω .

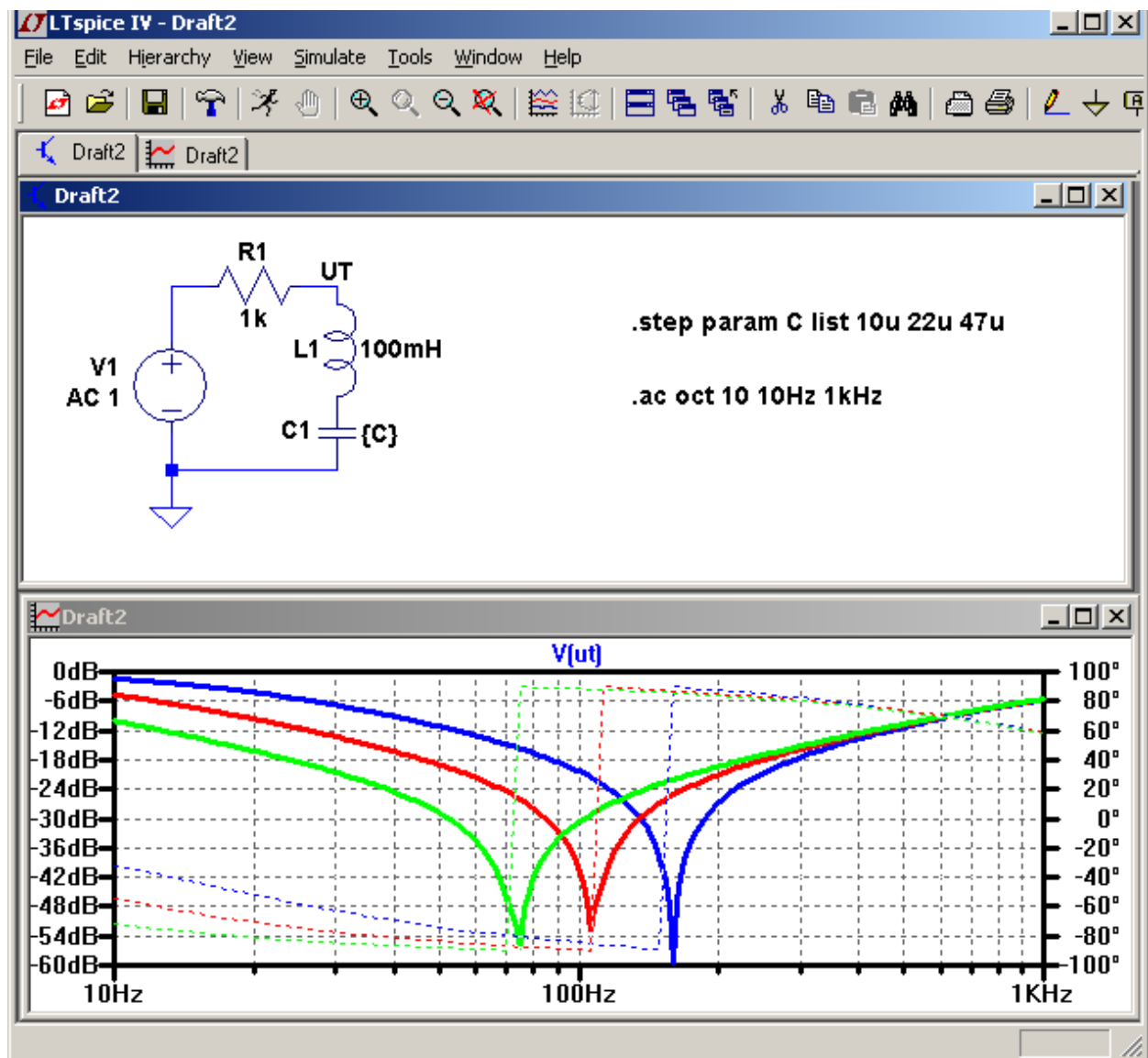
Exempel 2.

.step param C list 10u 22u 100u

Parametern C stegas efter listan och ges värdena: 10 μ F, 22 μ F och 100 μ F

Parametern som ska stegas anges i komponentmodellen inom klammerparenteser {} istället för komponentvärdet.

I exemplet nedan plottas frekvenssvaret för bandspärrfiltret då C antar värdena 10 μ F, 22 μ F och 47 μ F.



14 Simulering av temperaturvariationer

Vid alla typer av simulering kan man variera temperaturen. Om inget anges sker simuleringen vid temperaturen 27 °C.

Temperaturen kan varieras med Spice-direktivet: **.temp** T_1 T_2 T_3 T_4 osv

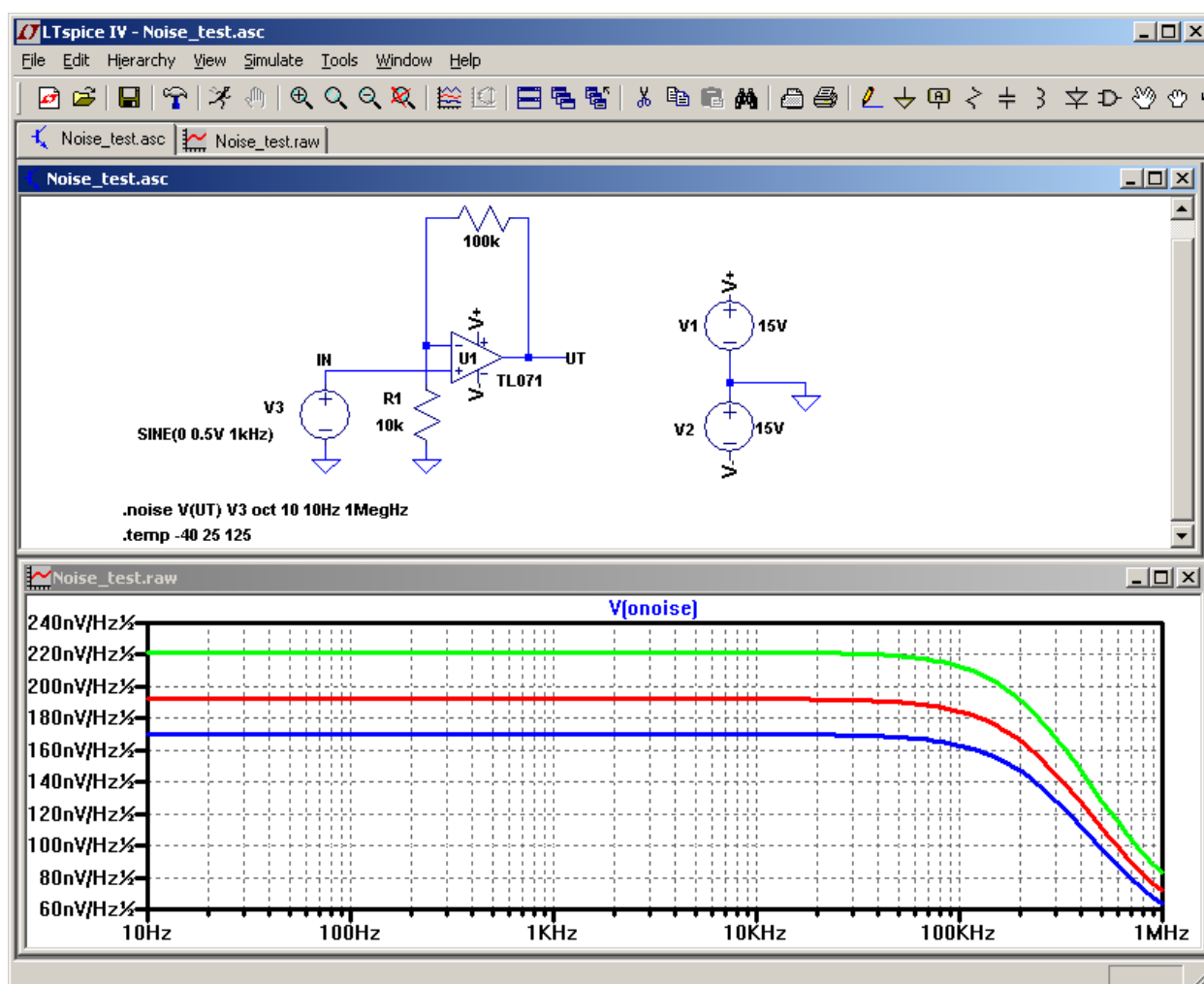
Detta medför att simuleringen kommer att göras vid temperaturerna T_1 T_2 T_3 T_4 osv
Alla temperaturer anges i °C .

Antag att vi i föregående avsnitt vill se hur bruset påverkas av temperaturen vid temperaturerna -40 °C, 25 °C samt 125 °C .

Edit>SPICE Directive eller  och fyll i Spice-direktivet: **.temp** -40 25 125

Placera Spice-direktivet på ditt schema och Simulera.

Nedan syns resultatet av simuleringen vid de tre temperaturerna.



15 Lägga till modeller i LTSpice installationskatalog

Det finns tusentals SPICE-modeller att ladda ner på Internet.

Antag att du har laddat ner följande diodmodell för dioden 1N4004

```
.model 1N4004 D (IS=76.9p RS=42.0m BV=400 IBV=5.00u CJO=39.8p M=0.333 N=1.45 TT=4.32u)
```

Öppna filen *standard.dio*:

File>Open välj filen *standard.dio* och klistra in modellen bland de övriga diodmodellerna. Spara.

Standard.dio finner du i katalogen C:\.....\LTC\LTspice\lib\cmp\.

Starta om LTSpice för att förändringen skall gälla.

På samma sätt klistrar du in nya bipolära transistormodeller i filen *standard.bjt*.

Att lägga till en mer komplicerad krets är bara något svårare.

Antag att du laddat ner en modell med 5 benanslutningar för OP:n TL071.

Modellen börjar med raden:

```
.SUBCKT TL071 .....
```

Öppna filen *opamp.sub*:

File>Open

opamp.sub finner du i katalogen C:\.....\LTC\LTspice\lib\sub\.

Radera innehållet och klistra in din modell.

File>Save As: Välj Save as type: All files. Spara under filnamnet: TL071.sub.

För att koppla en symbol till din modell gör enligt följande:

Öppna filen *LT318A.asy*:

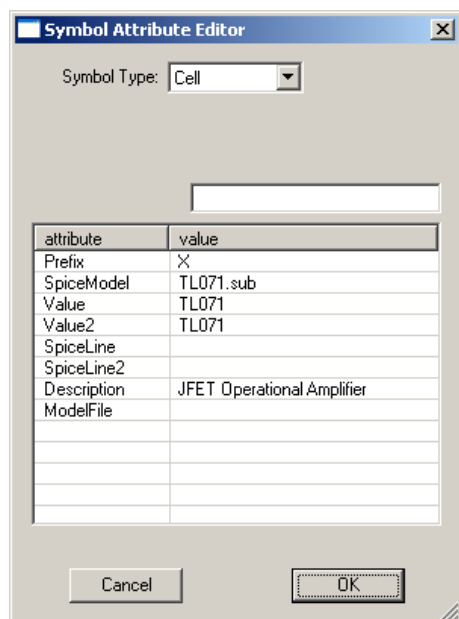
File>Open välj filen *LT318A.asy*

LT318A.asy finner du i katalogen C:\.....\LTC\LTspice\lib\sym\Opamps\.

Nu kan symbolen redigeras. Men om den är till belåtenhet så ändrar vi bara symbolens attribut:

Edit>Attributes>Edit Attributes

Ändra enligt figur nedan:



Bekräfta med OK

File>Save As: Spara under filnamnet: TL071.asy

16 Lägga till modeller i LTSpice om man INTE kan/vill skriva i LTSpice installationskatalog

Det finns tusentals SPICE-modeller att ladda ner på Internet.

Antag att du har laddat ner följande diodmodell för dioden 1N4004

```
.model 1N4004 D (IS=76.9p RS=42.0m BV=400 IBV=5.00u CJO=39.8p M=0.333 N=1.45 TT=4.32u)
```

Skapa m h a en texteditor en biblioteksfil med namnet *xxxx.lib* och spara den i din projektkatalog.
(xxxx godtyckligt namn)

Klistra in din diodmodell i filen *xxxx.lib*.

För att kunna använda modellerna i biblioteket *xxxx.lib* skapa ett Spicedirektiv i LTSpice enligt följande:

Edit>SPICE Directive eller



Skriv in: `.INCLUDE xxxx.lib` och placera Spicedirektivet på din schemaritning.

För att använda diodmodellen placera en diod på schemaritning, högerklicka på värdet *D* och skriv in namnet på din modell d v s 1N4004.

På samma sätt klistrar du in nya transistormodeller i filen *xxxx.lib* och använder dem genom att högerklicka på värdena *NPN*, *PNP* etc och väljer din transistormodell.

Att lägga till en mer komplicerad krets görs på samma sätt.

Antag att du laddat ner en modell med 5 benanslutningar för OP:n TL071.

Modellen börjar med raden:

```
.SUBCKT TL071 .....
```

Klistra in din modell i filen *xxxx.lib*.

För att använda modellen placera *opamp2* på din schemaritning, högerklicka på värdet *opamp2* och skriv in namnet på din modell d v s TL071.

opamp2 hittar du under



[opamps].

Lägga till hela tredjeparts bibliotek med modeller och symboler i LTSpice

Om du laddar ner ett helt bibliotek komplett med symboler sparar du biblioteksfil (*xxxx.lib*) och alla symbolfiler (.asy) i din projektkatalog.

För att kunna använda modellerna i biblioteket *xxxx.lib* skapa ett Spicedirektiv i LTSpice enligt följande:

Edit>SPICE Directive eller



Skriv in: `.INCLUDE xxxx.lib` och placera Spicedirektivet på din schemaritning.

När du vill placera komponent välj  samt välj som Top Directory din projektkatalog vilket ger dig tillgång till alla symbolerna (med tillhörande modell) som finns i din projektkatalog