

Båndbredde i Op-Amp

Øvelsesvejledning

Øvelsen er den fjerde i en serie på 6 øvelser, der når rundt om en række praktiske problemstillinger i anvendelsen af operationsforstærkere. Øvelsen har fokus på analyse, simulering og realisering af Båndbredde og stabilitet i forstærkerkredsløb med operationsforstærkere.

Indhold

Indledning.....	2
Kredsløb til øvelse 4.....	2
Analyse	4
Simulering.....	4
Realisering	5
Resultater	6
Konklusion	7
Appendiks A.....	8
Appendiks B	10
Appendiks C	11
Appendiks D.....	13
Appendiks E	14
Appendiks F	15

Indledning

Denne øvelse har 3 hoveddele:

- **Kredsløbsanalyse** af båndbredde og stabilitet
- **Simulering** af båndbredde og stabilitet
- **Realisering** og måling

Resultaterne samles i Tabel 1 under resultater.

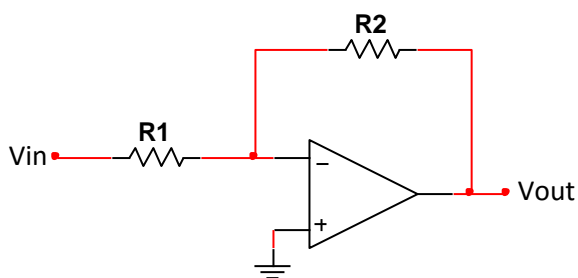
Evalueringen af øvelserne sker ved en mundtlig eksamen, hvor øvelserne udgør 6 spørgsmål suppleret med 6 teorispørgsmål. Ved de 6 teorispørgsmål vil dele af en relevant øvelse blive inddraget i evalueringen.

Vejledningen indeholder appendiks med eksempler på analyse, simulering og realisering for dele af øvelsens kredsløb. Det forudsættes at der er lavet tilsvarende analyse, simulering og realisering for øvelsens øvrige kredsløb.

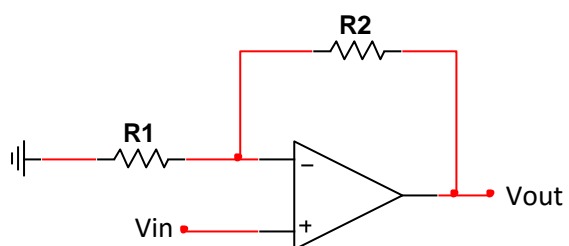
Kredsløb til øvelse 4

Øvelsen undersøger kredsløbene vist nedenfor. Hvert kredsløb analyseres, simuleres og realiseres.

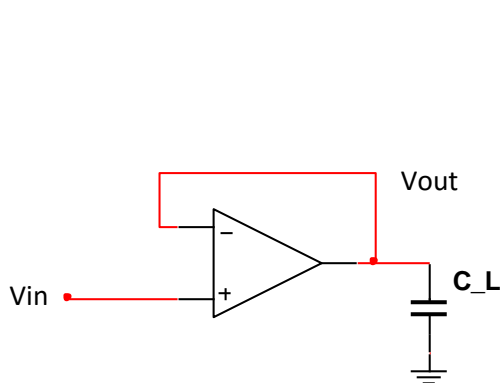
- Kredsløb #1 og #2 undersøges for sammenhængen mellem forstærkning (gain) og båndbredde.
- Kredsløb #3 undersøges for stabilitet når belastningen C_L på udgangen er kapacitiv.
- Kredsløb #4 undersøges for stabilitet når indgangsstrømkilden har en parasitkapacitet C_p og kondensator C_f i tilbagekoblingen anvendes til stabilisering af kredsløbet.



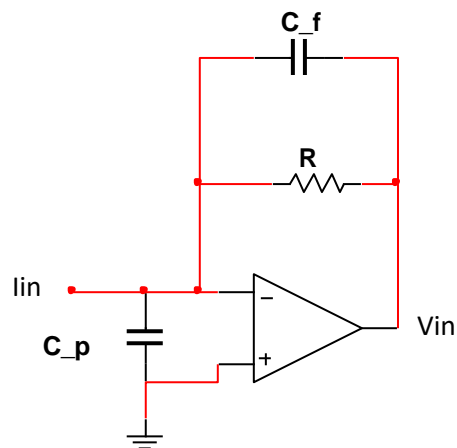
Figur 1 Kredsløb #1 Inverterende forstærker



Figur 2 Kredsløb #2 Non-inverterende forstærker



Figur 3 Kredsløb #3 spændingsfølger



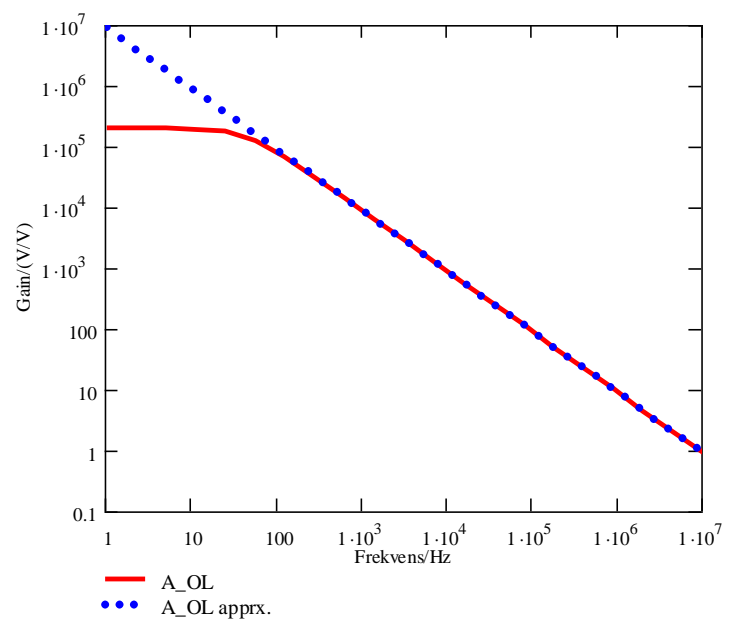
Figur 4 Kredsløb #4 Transimpedansforstærker

I analysen anvendes en approksimation A_{OL_apprx} for open loop gain A_{OL} . Det letter overblikket over analyseresultaterne uden at påvirke konklusionerne. Forskellen mellem de to vises i Figur 5.

I simuleringen anvendes A_{OL} der giver grundlag for en vurdering af analysens approksimation.

$$A_{OL} = \frac{A}{\frac{s}{\omega_G} + 1}$$

$$A_{OL_apprx} = \frac{1}{\frac{s}{\omega_G}}$$



Figur 5 A_{OL} og A_{OL_apprx}

Her er ω_G vinkelfrekvensen ved en forstærkning på 1 og den kan beregnes ud fra databladets oplysning af operationsforstærkerens unity-gain frequency, der også kaldes gain-bandwidth product (GBP), som:

$$\omega_G = 2\pi GBP$$

Analyse

Kredsløbene #1 - #4 analyseres som vist i eksemplet i appendiks A, B og C.

- I analysen antages det at $GBP = 9 \text{ MHz}$ svarende til $\omega_G = 2 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^6 \text{ Hz}$.

Appendiks A behandler sammenhængen mellem forstærkning og båndbredde i kredsløb #1 og #2.

Der skal findes en sammenhæng mellem forstærkerens 3 dB båndbredde f_c og unity-gain f_G (eller 3 dB vinkelfrekvens ω_c og unity-gain vinkelfrekvens ω_G). I kredsløb #1 er forstærkningen (gain) indstillet til -49. Det forventes at der udføres en tilsvarende analyse for kredsløb #2 hvor forstærkningen er 50 og at resultatet sammenlignes med kredsløb #1.

Appendiks B behandler stabilitet i spændingsfølgeren kredsløb #3 med kapacitiv belastning af udgangen med C_L . I analysen beskrives A_{OL} som vist Figur 5. Operationsforstærkerens indre modstand i udgangen kaldes R_O og den maksimalt tilladelige belastningskapacitet C_L findes i forhold til den valgte f_G . Grænsen for stabilitet defineres her som kritisk dæmpning.

Appendiks C behandler stabilitet i transimpedansforstærkeren kredsløb #4 når indgangsstrømkilden har en parallelkapacitet. Stabiliteten sikres ved en feedback kondensator mellem udgangen og den negative indgang på operationsforstærkeren. I analysen findes den største kapacitetsværdi for C_F hvor kredsløbet er stabilt. Kredsløbets feedback modstand er $R = 1 \text{ M}\Omega$ og feedback kondensator $C_F = 4.6 \text{ pF}$. Grænsen for stabilitet defineres her som kritisk dæmpning.

Beregningerne fra analysen medtages i øvelsesjournalen i Tabel 1

Forklar i journalen hvordan Ligningerne i appendiks A, B og C fremkommer og kommenter på hvordan f_G og R_O påvirker resultatet.

Simulering

Kredsløbene #1 - #4 simuleres og resultaterne fra analysen efterprøves. 3 dB båndbredden f_c kan valgfrit findes ved frekvens sweep eller transient respons.

- I kredsløb #1 og 2 er $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ og $R_2 = 490 \text{ k}\Omega$.
- I kredsløb #4 er $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ og $C_F = 4.6 \text{ pF}$.
- I simuleringen antages det at $GBP = 9 \text{ MHz}$ så $\omega_G = 2 \cdot \pi \cdot 9 \text{ MHz}$. Forstærkningen er $A = 200 \text{ kV/V}$.

Appendiks D viser et eksempel på simuleringen af kredsløb #1.

Appendiks E viser et eksempel på simulering af kredsløb #4.

Udskrifter af grafer fra simuleringen medtages i journalen og resultaterne vises i Tabel 1.

Ved kredsløb #3 og #4 findes kondensatorværdier hvor kredsløbet er kritisk dæmpet. Der simuleres også med kondensatorværdier der er 10 gange større for at vise at kredsløbet bliver underdæmpet.

Realisering

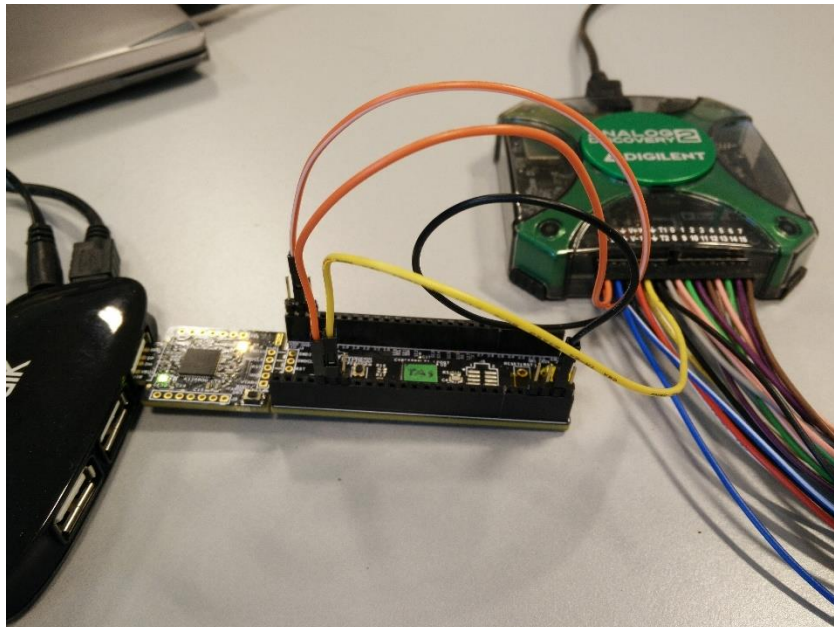
Kredsløbene #1 - #4 fra analyse og simulering realiseres ved de uploadede filer til Campus. PSOC realiseringen af kredsløb #4 er vist i appendiks F.

For kredsløb #1 og #2 bestemmes 3 dB båndbredden f_c . Ud fra de målte f_c ved effektniveauet HIGHPOWER bestemmes unity gain båndbredde GBP frekvensen (vinkelfrekvensen ω_G). Der er ikke en fil for kredsløb #2, så den inverterende forstærker fjernes fra #1 og der indsættes i dens sted en ikke-inverterende PGA.

Kredsløb #2 undersøges med tre forskellige effektniveauer: LOWPOWER, MEDPOWER og HIGHPOWER. Den fundne værdier af GBP (eller ω_G) anvendes ved beregning af C_L for kredsløb #3 og C_p for kredsløb #4. Ved kredsløb #3 og #4 måles også med kondensatorværdier der er 10 gange større end de fundne værdier for at vise at kredsløbet bliver underdæmpet.

Alle målinger skal laves som eksterne målinger med signalgenerator og oscilloskop.

Resultaterne indføres i Tabel 1 og suppleres af udskrifter fra oscilloskopet (USB, foto eller håndskitse).



Øvelsen er et eksempel på hvordan operationsforstærkeren kan analyseres og måles. Det er vigtigt at bemærke vanskelighederne når indgang eller udgang er kapacitivt belastet og hvordan disse problemer kan løses. Det beskriver de arbejdsforhold som en operationsforstærker vil møde i praksis.

Forstærkerne i PSOC rummer foruden variabel feedback kondensator også variabel Miller kompensering. I standardopsætningerne er valgt fornuftige Miller kompenseringer og det ligger ud over rammerne for dette kursus at ændre på disse. Særligt interesserede henvises til Technical Reference Manual kapitel 30.

Der opfordres til at eksperimentere med de viste kredsløb og medtag gerne billeder fra oscilloskop eller mobiltelefonens kamera som uddybende dokumentation.

Resultater

Kredsløb	Analyse	Simulering		Realisering			Kommentar
1	3 dB BW, f_c			3 dB BW, f_c	GBP		
			High Power				
2	3 dB BW, f_c			3 dB BW, f_c	GBP		
			Low Power				
			Medium Power				
			High Power				
3	C_L	C_L	$10 \cdot C_L$	High Power	C_L	$10 \cdot C_L$	
4	C_P	C_P	$10 \cdot C_P$	High Power	C_P	$10 \cdot C_P$	

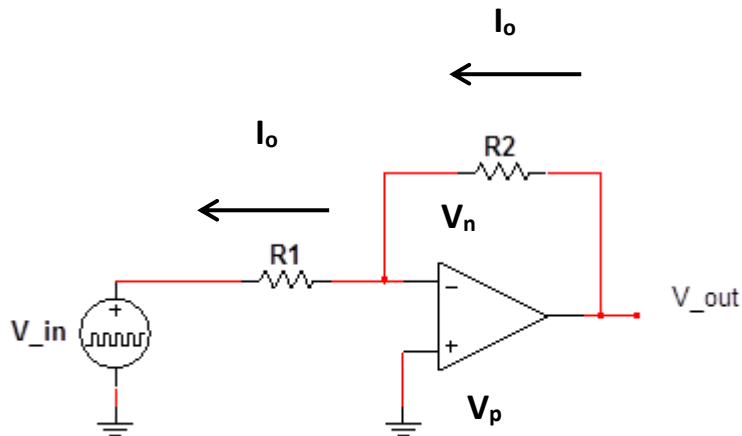
Tabel 1 Sammenligning af resultater

Realiseringsmålingerne skal suppleres med udskrift fra oscilloskop (USB, foto eller håndskitse).

Konklusion

Appendiks A

Analyse af kredsløb #1. Operationsforstærkerens indre modstand i udgangen kaldes R_o .



Figur 6 Analyse af kredsløb #1

Følgende ligninger kan opstilles fra Figur 6:

$$V_o = A_{OL} \cdot (V_p - V_n) - R_o \cdot I_o$$

$$V_o = I_o \cdot R_2 + V_n$$

$$V_n = I_o \cdot R_1 + V_{in}$$

$$V_p = 0$$

$$A_{OL} = \frac{1}{\frac{s}{\omega_G}}$$

Løses ligningerne fås (vis at det er korrekt):

$$V_o = -V_{in} \cdot \frac{R_2 \cdot \omega_G - R_o \cdot s}{(R_2 + R_1 + R_o) \cdot s + \omega_G R_1}$$

Vi antager at $R_o = 0 \Omega$ er rimelig for analysen (begrund dette) og får:

$$V_o = -R_2 \cdot \frac{\omega_G}{(R_2 + R_1) \cdot s + \omega_G R_1} \cdot V_{in}$$

Nu kan sammenhængen mellem 3 dB båndbredde f_c og unity gain båndbredde GBP eller $\omega_G = 2\pi \text{ GBP}$ findes (hvordan?):

$$\omega_c = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \omega_G$$

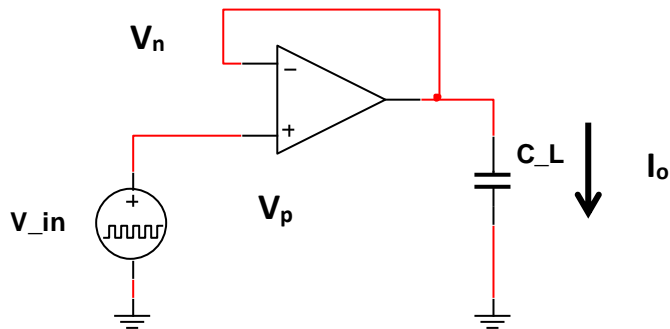
Kredsløbets parametre indsættes i løsningen og f_c (eller ω_c) findes:

$$\omega_G := 2 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^6 \quad R_1 := 10 \text{ k}\Omega \quad R_2 := 490 \text{ k}\Omega$$

Dette resultat indføres i Tabel 1

Appendiks B

Analyse af kredsløb #3 hvor operationsforstærkeren er belastet kapacitivt på udgangen med C_L og den indre modstand i operationsforstærkeren kaldes R_o . Derved indskydes en pol i tilbagekoblingen som kan påvirke operationsforstærkerens stabilitet.



Figur 7 Analyse af kredsløb #3

Følgende ligninger kan opstilles fra Figur 6:

$$V_o = A_{OL} \cdot (V_p - V_n) - I_o \cdot R_o$$

$$V_o = V_n$$

$$V_o = I_o \cdot \frac{1}{s \cdot C_L}$$

$$V_{in} = V_p$$

$$A_{OL} = \frac{\omega_G}{s}$$

Løses ligningerne fås (vis at det er korrekt):

$$V_o = \frac{\omega_G}{R_o \cdot C_L \cdot s^2 + s + \omega_G} \cdot V_{in}$$

Dette er en 2. ordens overføringsfunktion og betingelsen for kritisk dæmpning kan beregnes. Lav beregningen og vis at kredsløbet er kritisk dæmpet når C_L er:

$$C_L = \frac{1}{4 \cdot R_o \cdot \omega_G}$$

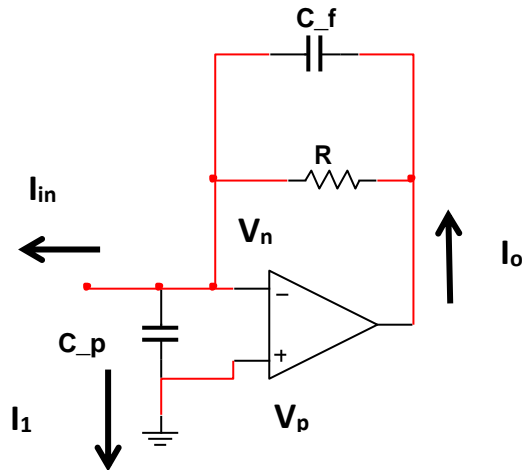
Beregn C_L når Kredsløbets parametre er:

$$\omega_G := 2 \cdot \pi \cdot 9 \cdot \text{MHz} \quad R_o := 10\Omega$$

Resultatet indføres i Tabel 1

Appendiks C

Analyse af kredsløb #4, hvor operationsforstærkeren er belastet kapacitivt med C_p på indgangen. Den vil indskyde en pol i tilbagekoblingen ved komponenterne R og C_p .



Figur 8 Analyse af kredsløb #4

Følgende ligninger kan opstilles fra Figur 6:

$$V_o = I_o \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\frac{1}{s \cdot C_f}} \right)^{-1} + V_n$$

$$V_o = A_{OL} \cdot (V_p - V_n) - I_o \cdot R_o$$

$$V_n = I_1 \cdot \frac{1}{s \cdot C_p} + V_p$$

$$V_p = 0$$

$$I_{in} + I_1 = I_o$$

$$A_{OL} = \frac{\omega G}{s}$$

R_o er udgangsmodstanden af operationsforstærkeren.

Løses ligningerne fås (vis at det er korrekt):

$$V_o = \frac{C_f R \cdot R_o \cdot s^2 - R_o \cdot s + R \cdot \omega_G}{C_f R \cdot R_o \cdot C_p \cdot s^3 + (R \cdot C_p + R_o \cdot C_p + C_f R) \cdot s^2 + (\omega_G C_f R + 1) \cdot s + \omega_G} \cdot I_{in}$$

Dette er en 3. ordens overføringsfunktion der er vanskelig at analysere. Vi kan igen uden tab af det væsentlige sætte $R_o = 0 \Omega$ (begrund dette) og nu fås løsningen:

$$V_o = R \cdot \frac{\omega_G}{(C_f + C_p) \cdot R \cdot s^2 + (\omega_G C_f R + 1) \cdot s + \omega_G} \cdot I_{in}$$

Dette er en 2. ordens overføringsfunktion og betingelsen for kritisk dæmpning kan beregnes. Lav beregningen og vis at kredsløbet er kritisk dæmpet når C_p er:

$$C_p = \frac{1}{4 \cdot \omega_G R} - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \omega_G R \cdot C_f \right) \cdot C_f$$

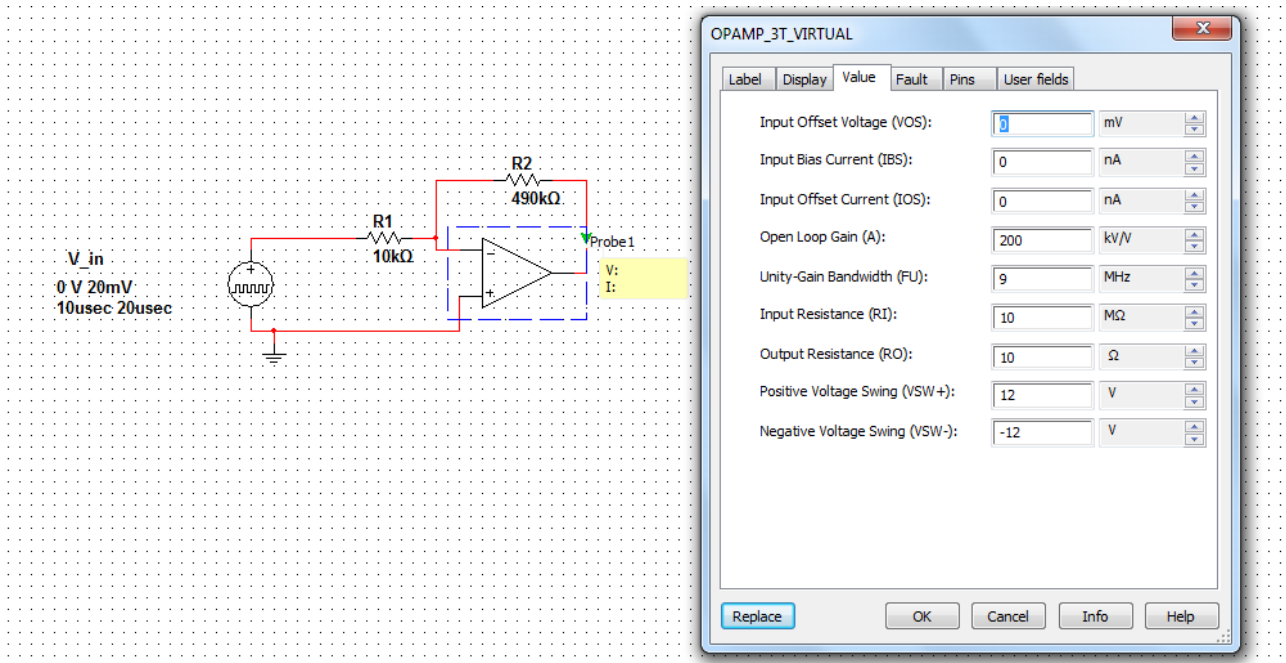
Beregn C_p når Kredsløbets parametre er:

$$\omega_G := 2 \cdot \pi \cdot 9 \text{ MHz} \quad R := 10^6 \Omega \quad C_f := 4.6 \text{ pF}$$

Resultatet indføres i Tabel 1

Appendiks D

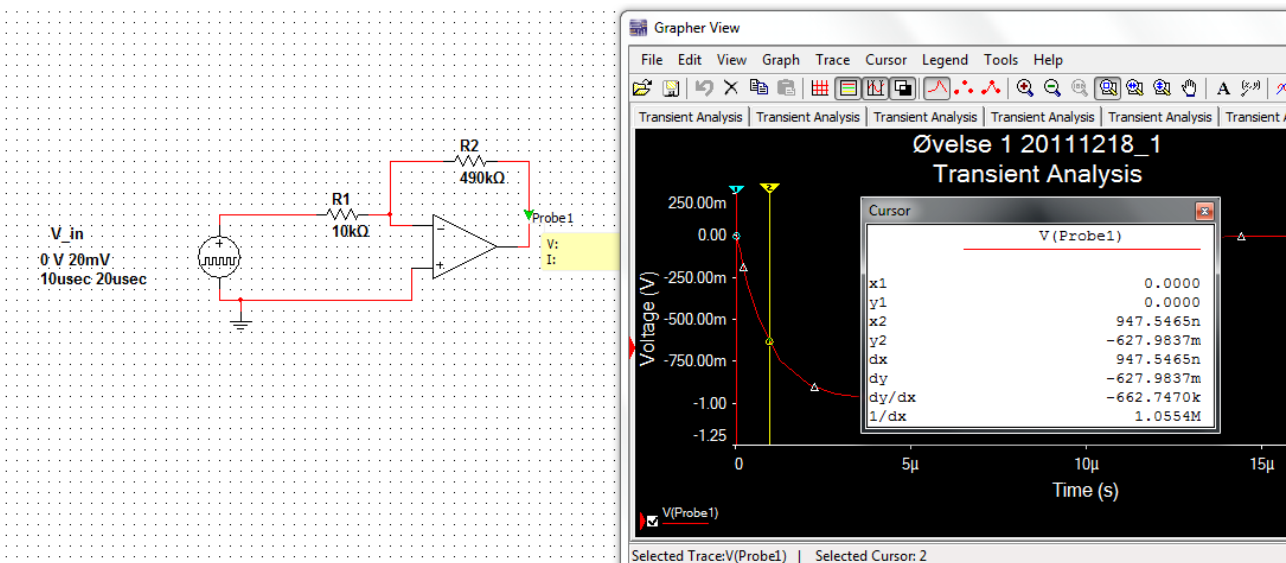
Figur 9 viser simuleringen af kredsløb #1. I simuleringen er anvendt OPAMP_3T_VIRTUAL fra Multisim. Denne virtuelle komponent kan indstilles mht. unity gain og open loop gain parametre som vist på figuren.



Herunder er vist en transient analyse af forstærkeren og tidskonstanten er fundet med cursoren til 948 ns.

Figur 9 Simulering af kredsløb #1

Tidskonstanten omregnes til GBP eller ω_c og indføres i Tabel 1.

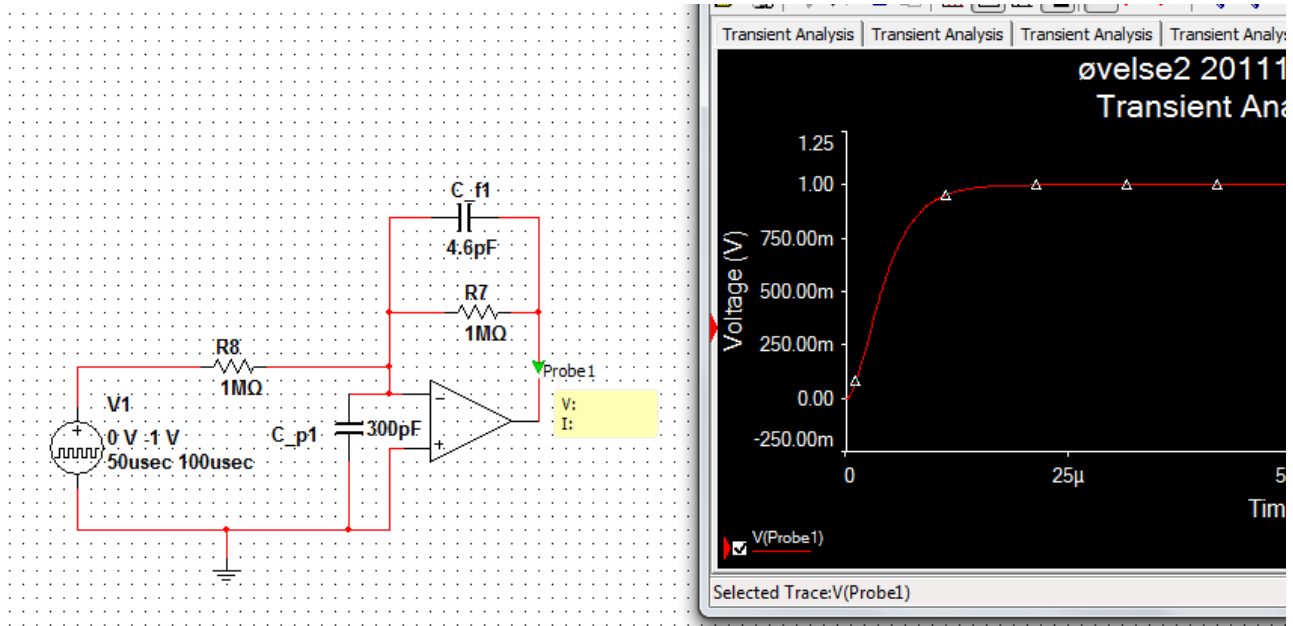


Figur 10 Transient analyse af kredsløb #1

Appendiks E

Figur 11 viser simuleringen af kredsløb #4. I simuleringen er anvendt OPAMP_3T_VIRTUAL fra Multisim. Strømkilden til forstærkeren er erstattet med en Thevenin generator. Den skal også anvendes ved målingerne.

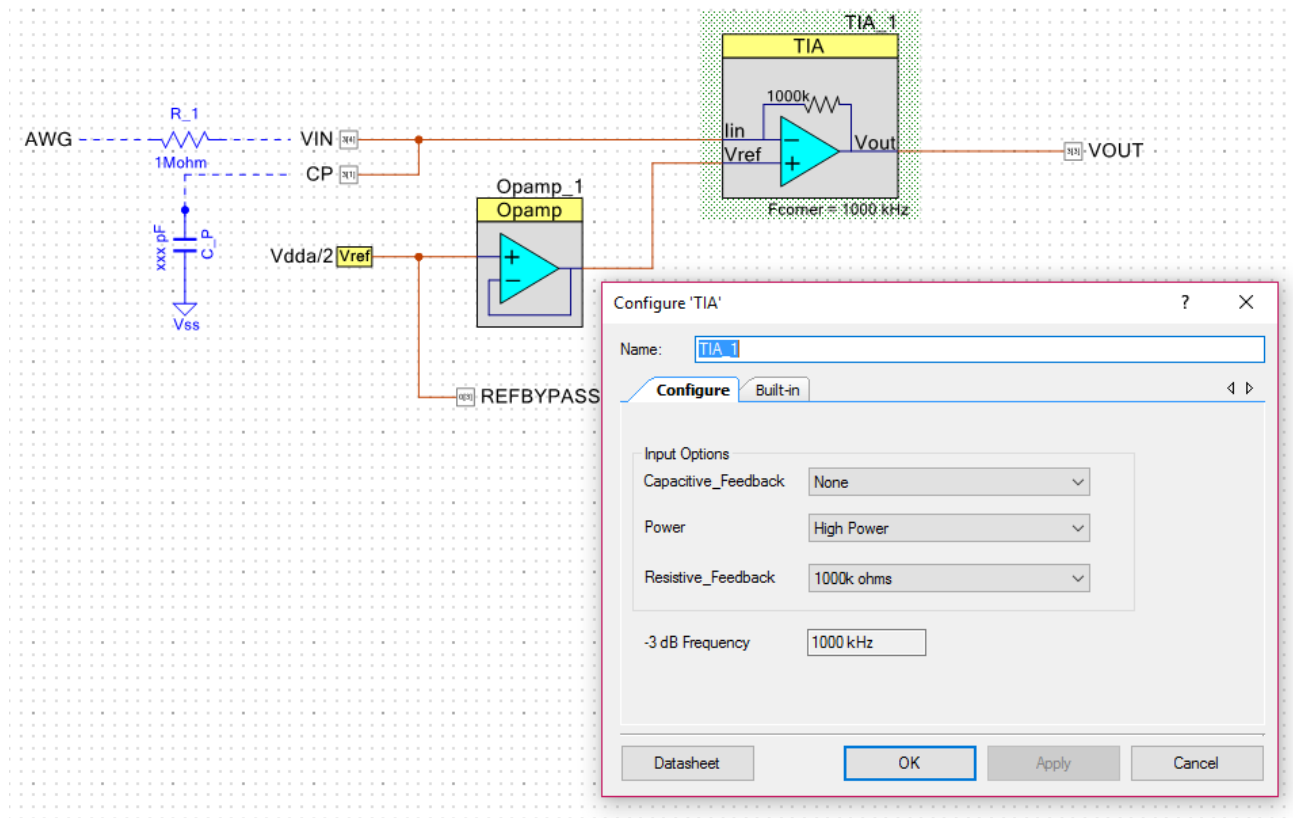
Ved simulering: $V_T = -1\text{ V}$ og $R_T = 1\text{ M}\Omega$.



Figur 11 Simulering af kredsløb #4

Appendiks F

Figuren herunder viser realisering af kredsløb #4 implementeret på PSoC. Transientrespons måles med signalgenerator på indgang I_{in} på P1[2] og oscilloskop på udgangen V_{out} på P0[0]. Strømgeneratoren erstattes med en Thevenin generator med V_T = 2,5 V og R_T = 1 MΩ som vist herunder. For at indkoble feedback-kondensatoren dobbelt-klikkes på TIA symbolet og menuen rettes til 4,6 pF. Der opfordres til at ændre på "Power" indstillingen eller "Resistive_Feedback" for at studere resultatet af ændringen.



Opamp_1 er inkluderet som buffer af den interne reference på halvdelen af effektforsyningen. Det er nødvendigt ved kredsløb #2 og er inkluderet for alle kredsløb som et eksempel på god designpraksis.