



Designnotat

Tittel: Operasjonsforsterker - Opamp

Forfattere: Håvard Lundheim

Versjon: 1.0

Dato: 07.11.22

Innhold

1	Problembeskrivelse	1
2	Prinsipiell løsning	2
3	Realisering og test	3
4	Konklusjon	8
	Referanser	8

1 Problembeskrivelse

Svært ofte i innen elektroteknikk ønsker man av ulike grunner å forsterke et signal. Det finnes mange typer forsterkere man vil kunne bruke til å oppnå det formålet, men av de som dukker opp oftest er opampen. Det skal her designes og konstrueres en opamp, og denne skal vurderes utifra følgende kriterier.

1. Inngangsmotstand
2. Utgangsmotstand
3. Forsterking A ved sinuspåtrykk med frekvens $f = 1 \text{ kHz}$
4. Total harmonisk distorsjon ved sinuspåtrykk med frekvens $f = 1 \text{ kHz}$

Disse kriteriene skal undersøkes med og uten ikke-inverterende tilbakekobling og med to forskjellige lastmotstander, en på 100Ω og en annen på $100\text{k}\Omega$

2 Prinsipiell løsning

En opamp er en krets med typisk fem tilkoblingspunkt, vist i figur , der v_+ og v_- er differensiell inngang, V_+ og V_- spenningsforsyning og v_o er utgangen.

Figur 1: Opamp

Måten opampen skal fungere på er at utgangen skal være gitt av

$$v_o = A(v_+ - v_-) \quad (1)$$

der A er forsterkningsfaktoren på opampen. Opampen vil imidlertid alltid være begrenset av spenningsforsyningen og v_o vil derfor aldri kunne overstige V_+ eller bli lavere enn V_- . For at en opamp skal gi gunstig oppførsel er det enkelte egenskaper man ønsker den skal oppfylle. En ideel opamp vil ha uendelig inngangsmotstand og null utgangsmotstand, dette for å ikke påvirke delsystemene opampen er koblet til, og uendelig forsterkningsfaktor A . Selv om en slik krets ikke er mulig å lage, ønsker vi fortsatt en krets som ligner så mye som mulig på denne, som vil kunne modelleres som vist i figur .

Figur 2: Kretsmodell av opamp

Et godt utgangspunkt for en slik krets vil være en differensialforsterker, som er vist i figur .

Figur 3: Differensialforsterker

En slik krets vil gi høy inngangsmotstand, siden det vil gå svært lite strøm gjennom transistorene Q_1 og Q_2 slik de er koblet opp. Kretsen har også differensiell inngang og vil kunne gi en del forsterkning.

Virkemåten til kretsen er som følger. Strømmen I_0 gitt ved strømkilden er konstant og kan skrives som

$$I_0 = i_1 + i_2 \quad (2)$$

der i_1 og i_2 er strømmene som går gjennom henholdsvis Q_1 og Q_2 . Dersom v_+ går opp vil i_1 øke og siden strømmen gjennom strømkilden er konstant vil da strømmen i_2 trenge å synke. Siden transistorene Q_3 og Q_4 er biasert identisk er det bare spenningen over dem som vil avgjøre strømmen gjennom dem. For at i_2 skal synke må derfor spenningen over Q_4 også synke. Spenningsdeling gir oss da at spenningen over Q_2 , altså v_o må øke og vi får dermed at øking av v_+ gir øking av v_o .

For å finne ut noe om forsterkningen vi får

3 Realisering og test

Først må strømkilden realiseres. Dette gjøres ved en krets som vist i figur .

Målinger av c_0 , v_1 og v_2 er vist i figur 13.

Figur 4: Kretsløsning for strømkilde

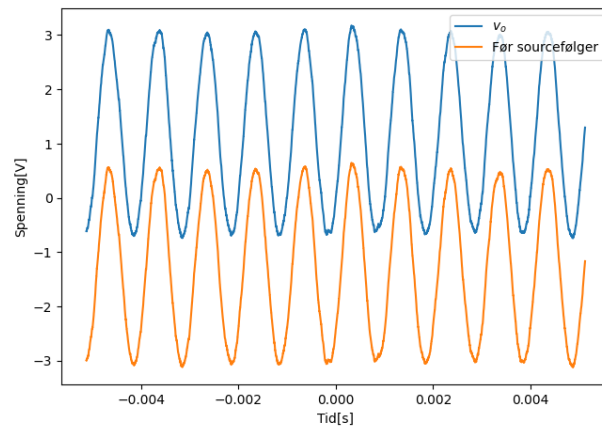
Her brukes et potensiometer i serie med to motstander til å bestemme og gi mulighet for å variere base-spenningen til Q_I , en bipolar npn transistor av typen BC547. Dette vil resultere i en temmelig konstant strøm gjennom transistoren som i stor grad bestemmes av biasspenningen som vi styrer. Spenningsfallet over transistoren også vil ha noe å si, noe som gjør at kretsen strømkilden kobles opp til også vil være med å bestemme strømmen som går gjennom. Grunnen til at en bipolar transistor velges over en NMOS er at den bipolare vil ha et noe flatere metningsområde, som i teorien bør gi mindre variasjon i strøm. Motstandsverdiene $R_{p1} = 500\Omega$ og $R_{p2} = 1000\Omega$ ble valgt for å gi størst bredde i strømverdier, og ble funnet fram til eksperimentelt. Disse motstandsverdiene vil avhenge av resten av kretsen.

Videre blir det brukt NMOS transistorer av typen 2N 7000 for Q_1 og Q_2 og PMOS transistorer av typen VP2106 for Q_3 og Q_4 . Her kunne også bipolare transistorer blitt brukt, men MOSFET transistorene ga erfaringsvis bedre resultater og ble derfor brukt her.

Realisering av sourcefølger ble gjort med enda en NMOS transistor av samme type til Q_s og motstanden $R_s = 1000\Omega$.

For ikke-inverende forsterkning med $A = 10$, ble $R_1 = 1000\Omega$ og R_2 realisert som en parallelkobling der $R_{21} = 10000\Omega$ og $R_{22} = 100k\Omega$ ble brukt, og ble da koblet som vist i figur . R_2 ble målt til å være 9020Ω .

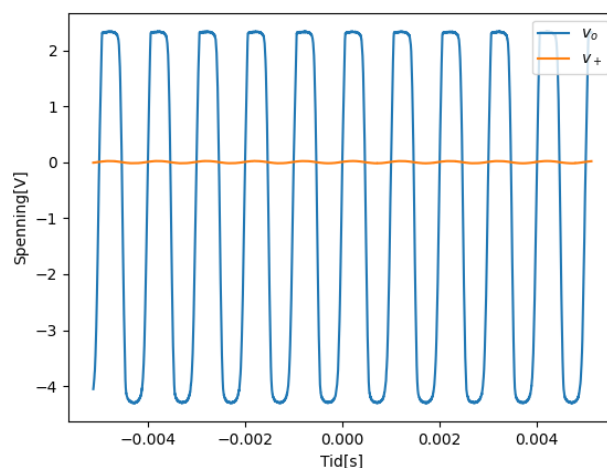
Måling av systemet viser at det fungerer godt, men at det er svært avhengig av strømkilden I_0 , der dårlig valg av I_0 fører til offsets, lavere forsterkning og forvrengning. Diffensialforsterker fungerer på egenhånd og med source-følger, men de fungerer best for ulike verdier av I_0 . Sammenligning av signaler før og etter sourcefølger ved samme strøm I_0 er vist i figur .



Figur 5: Sammeligning av måling før og etter sourcefølger

Her ser vi at signalene får begge et offset ved denne verdien for I_0 , noe som forteller oss at at sourcefølgeren har mye å si for middelveiden til v_o .

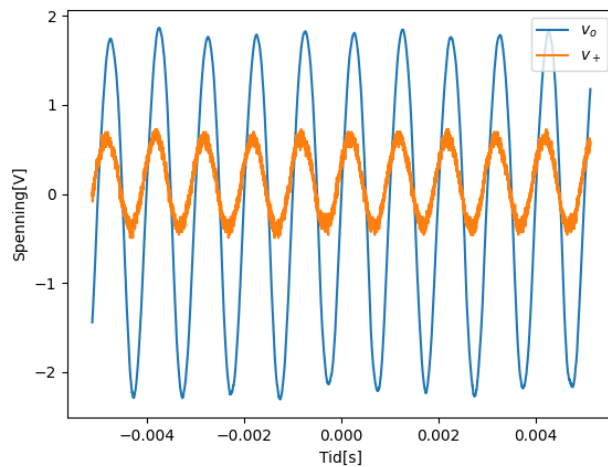
For måling av åpen-løkkeforsterkning A ble først et sinussignal med amplitude på 20 mV og frekvens 1 kHz brukt som inngangssignal, men som vist i figur , førte dette til klipping på utgangen, antageligvis på grunn av for lav spenningsforsyning.



Figur 6: Klipping ved for høyt inngangssignal

Derfor ble målinger her gjort med inngangssignal på 5 mV istedet. Uten lastmotstand ble åpen-løkkeforsterkning målt til å være $A \approx 440$. Her ble også forsterkningen undersøkt uten sourcefølger og man fikk overraskende nok høyere forsterkning med sourcefølger enn uten. Uten sourcefølger fikk man $A \approx 400$. Dette er vanskelig å forklare.

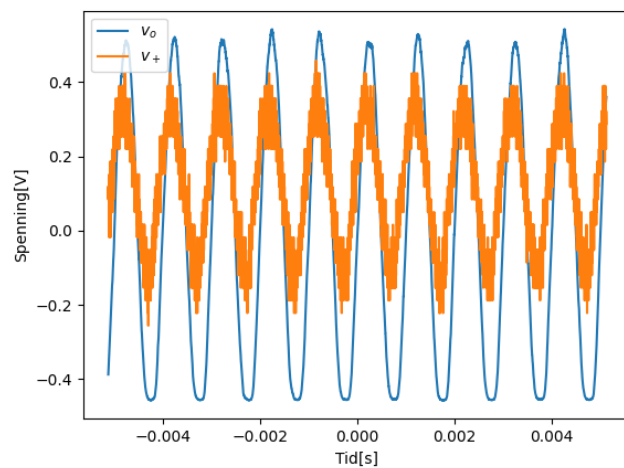
Måling over lastmotstand på $100k\Omega$ ga signalet vist i figur . v_+ er her forstørret med 100 ganger.



Figur 7: Åpen-løkkeforsterkning med lastmotstand på $100\text{k}\Omega$

Måling viser at åpen-løkkeforsterkning $A \approx 440$, altså omtrent det samme som uten noen lastmotstand.

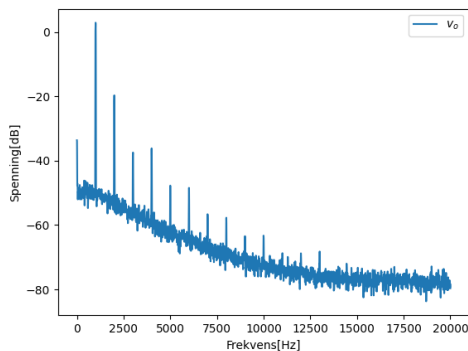
Måling over lastmotstand på 100Ω er vist i figur . Her ble forsterkningen $A \approx 160$, som forteller oss at det må være noe utgangsmotstand i systemet vårt, siden signalet her var svakere.



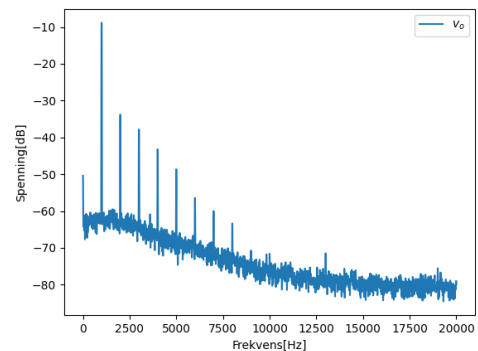
Figur 8: Åpen-løkkeforsterkning med lastmotstand på 100Ω

Om vi ser på spekterne til signalene i figur og ser vi at de er nokså like. Måling av THD gir også samme resultat, -23 dB . Dette gir mening siden vi forventer det samme signalet, bare noe dempet.

Videre kan vi se på de samme verdiene når systemet er koblet som en tilbak koblet, ikke-inverterende forsterker med forsterkning $A = 10$. Her siden vi har mye lavere forsterkning bruker vi inngangssignal v_+ på 100mV , fortsatt 1kHz . Først med lastmotstand på $100\text{k}\Omega$ får

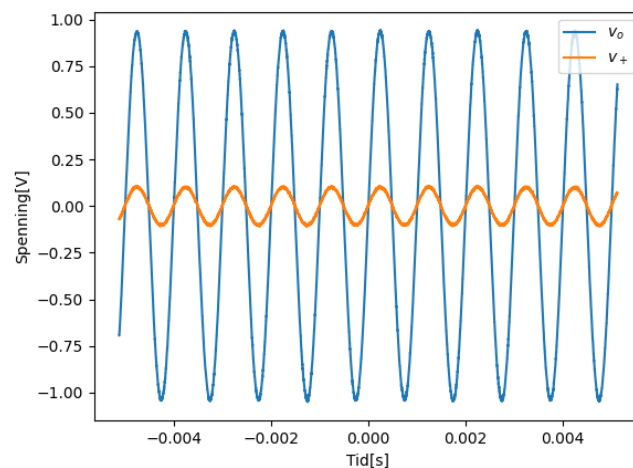


(a) Spekter ved høy lastmotstand



(b) Spekter ved lav lastmotstand

vi resultat som vist i figur .



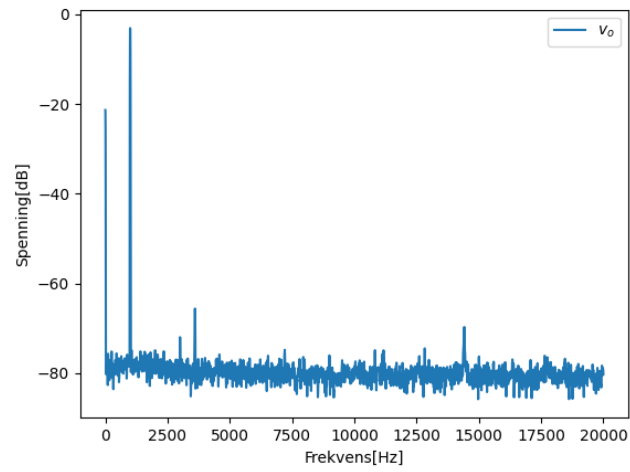
Figur 10: Ikke-inverterende forsterkning med lastmotstand på $100\text{k}\Omega$

Måling av forsterkning her gir $A = 9.97$, altså et svært godt resultat. Spekteret, vist i figur , viser også mindre overharmoniske utslag enn tidligere og vi får en $\text{THD} = -65 \text{ dB}$.

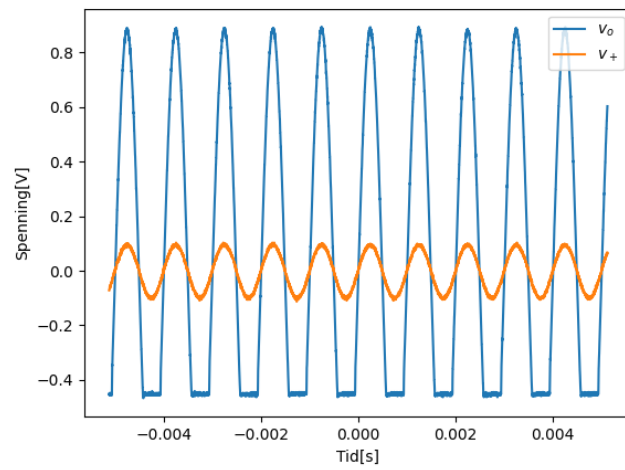
Med lastmotstand på 100Ω gikk det ikke fullt så bra. Signalet over lasten er vist i figur .

Her ser vi at forsterkningen virker til å være lik, men at signalet klippes på bunnen. Grunnet klippingen får vi og et spekter med mange flere overharmoniske, som vist i figur , og $\text{THD} = -13$.

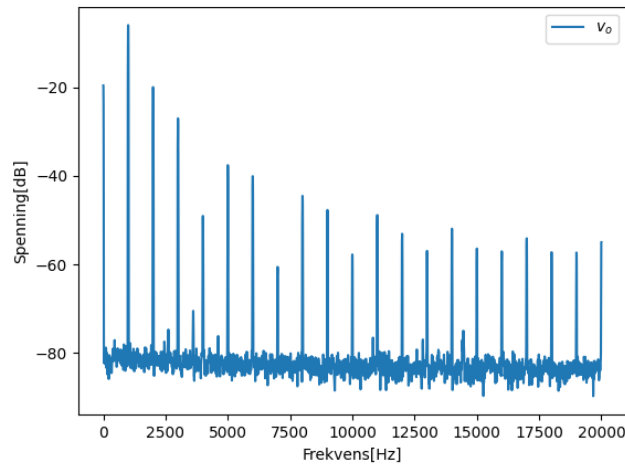
Måling av inngangsmotstand ble gjort ved å koble en motstand mellom inngangssignalet og opampen og måle spenning over den. Her ble en motstand på $1\text{M}\Omega$ brukt og et sinussignal med amplitude på 100mV . Både med og uten tilbakekobling med signalet over motstanden målt til å være 50 mV , som vil si at inngangsmotstanden er like stor som motstanden brukt, altså $1 \text{ M}\Omega$. Man forventer egentlig at inngangsmotstanden skal bli større ved tilbakekobling, så her er det mulig det har skjedd målefeil.



Figur 11: Spekter med ikke-inverterende forsterkning og høy last



Figur 12: Ikke-inverterende forsterkning med lastmotstand på 100Ω



Figur 13: Spekter med ikke-inverterende forsterkning og lav last

Utgangsmotstanden ble målt ved å sette en motstand fra utgangen til jord og måle spenningen over den. Motstanden her var på $1\text{k}\Omega$ og sinussignalet på inngangen v_+ var et sinussignal med amplitude 5mV . Problemet her var at kretsen oppførte seg helt annerledes når systemet var koblet opp på denne måten, og vi kunne derfor ikke anta utgangssignal på ca 2V som tidligere. Derfor ble amplituden til signalet før sourcefølgeren brukt som en tilnærming til det etter, selv om dette av erfaring var litt mindre, og dette brukt til utregning. Amplituden målt før sourcefølger var på 1.6 V . Amplituden på sinusen over lastmotstanden på $1\text{k}\Omega$ var på 1.4V . Dette gir oss en utgangsmotstand på 143Ω . Med tilbakekobling blir inngangssignal på 100mV brukt istedet, 0.985 V ble målt før sourcefølger, og 0.979 V etter, som gir utregnet utgangsmotstand på ca 6.5Ω , altså svært lite.

4 Konklusjon

Vi har designet og konstruert en opamp. Den er basert på en differensialforsterker, men har også en sourcefølger koblet på for å få lavere utgangsmotstand. Den har en åpen-løkke forsterkning på 440 , for lastmotstand på $100\text{k}\Omega$, og 160 for lastmotstand på 100Ω . THD for åpen-løkke ble -23 dB . Koblet som en ikke-inverterende forsterker fikk vi en forsterkning på 9.97 og THD på -65 dB med høy last, men opplevde klipping ved lavere last. Inngangsmotstand ble regnet ut til å være på $1\text{M}\Omega$, mens utgangsmotstand ble estimert å være 143Ω uten tilbakekobling og 6.5Ω med.

Referanser