NTNU

elsys
ELEKTRONISK SYSTEMDESIGN & INNOVASJON

Designnotat

Tittel: Op-AMP

Forfatter: Eirik Mathias Silnes

Versjon: 1.1 | Dato: 15. desember 2023

Innhold

1 Problembeskrivelse

I dette designnotatet skal det designes en operasjonsforsterker på transistor nivå. En ideell operasjonsforsterkar har følgene egenskaper og modell som vist i fig Figur 1.

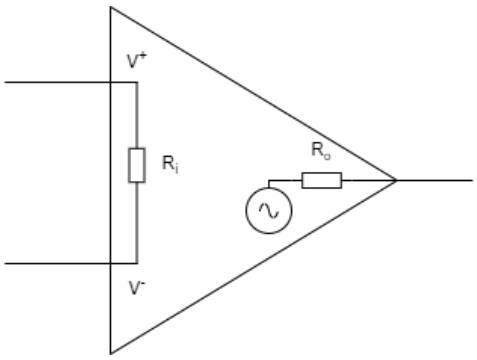
- Inngangsimpedansen til $R_i = \infty$
- Utgangsimpedansen til $R_o = 0$
- Utgangen er gitt som

$$V_{out} = f(V_+ - V_-) = \begin{cases} min\{V, A(v^+ - v^-)\} \ for \ v^+ - v^- > 0 \\ max\{V, A(v^+ - v^-)\} \ for \ v^+ - v^- < 0 \end{cases} \tag{1}$$

  Spesielt i dette designnotatet skal de følgene egenskapene undersøkest nærmere:

  - forsterkningen A ved sinuspåtrykk med frkvens $f = 1kHz$ og
  - Total harmonisk distorsjon (THD) ved sinuspåtrykk med frekvens $f = 1kHz$

  De to pungtene skal undersøkest med to forskjellige lastmotstander $R_L = 100k\Omega$ og $R_L = 100\Omega$. Det skal også undersøkest hvor godt kretsløsningen virker som en opamp i en inverterende forsterker med forsterkning $A = -10$ og $R_L = 1k\Omega$. Sammenlign dette med ved både åpen løkke forsterkning og negativ tilbakekobling.

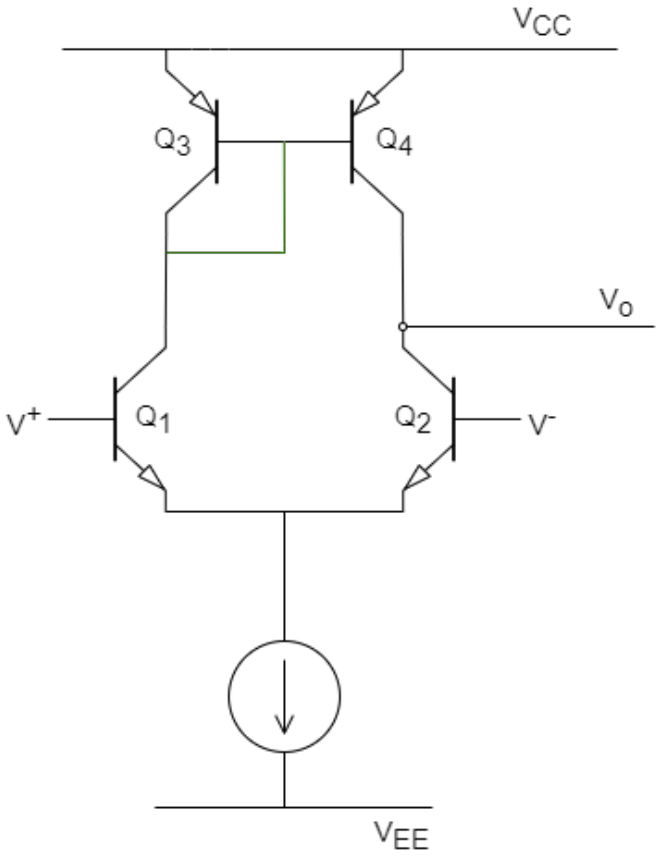


Figur 1: Ideell opamp modell

2 Prinsipiell løsning

2.1 Kretstopologi

En differensialforsterker er en nøkkelkomponent i designet av operasjonsforsterkere (op-amp)[2, s. 105]. I en differensialforsterker benyttes ofte to inngangstransistorer i en konfigurasjon som tillater differensiell signalbehandling. Bipolare transistorer, som for eksempel NPN- og PNP-transistorer, er valgt for deres egenskaper som forsterkningsenheter og deres evne til å drive signaler med høy presisjon. Et typisk eksempel på en differensialforsterker er vist i figur Figur 2.



Figur 2: Differensialforsterker som en operasjonsforsterker

2.2 Forsterkning

For å finne forsterkningen til en op-amp, kan man gå utifra Ligning 1 og omformulere den til Ligning 2. Her er V^+ og V^- spenningen inn på den positive og negative inngangen til opampen (Differnasnen mellom de vil bli omtalt som V_{in}). V_o er spenningen ut av opampen

over lasten og da blir A forsterkningen til opampen.

$$A = \frac{V_o}{(V^+ - V^-)} = \frac{V_o}{V_{in}} \tag{2}$$

2.3 Total harmonisk distorsjon

Total harmmonisk distorsjon er hvor mye av det orginale signalet dominerer over harmoniske multiplikkative versjoner av seg selv, og er en vanelig måleenhet for støymåling i et ikke linjeært system. Man benytter seg av V_{RMS} på både den orgainale frekvensen og på alle harmoniske frekvenser. For å finne total harmonisk distorsjon, kan vi bruke Ligning 3. Her er V_1 er er spenningen ut av opampen ved en sinusformet inngangsspenning og V_n RMS verdien til den n'te harmoniske frekvensen.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \ldots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100 \tag{3}$$

2.4 Åpen Løkke forsterkning

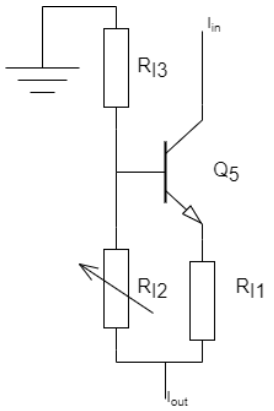
Åpen løkke forsterkning er forsterkningen oppampen har uten tilbakekoblig. For å beregne åpen løkke forsterkning, kan følgende ligning Ligning 4 benyttes. Her representerer V_{out} utgangsspenningen fra opampen. V_{in} er inngangsspenningen til opampen, og A er forsterkningen til opampen.[3].

$$V_{out} = AV_{in} \Leftrightarrow A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{4}$$

3 Realisering

3.1 Kretsopkobling

Oppkoblingen ble gjort som vist i den prinsippielle løsningen i Figur 2, hvor strømkliden ble realisert som i Figur 3. Hvor Q_5 og R_{I1} fungerer som en strømkilde som er styrt av spenningen som er mellom R_{I2} og R_{I3}, hvor R_{I2} ble realisert som et potensiometer for å lettere kunne justere strømstyrken underveis. Modellnummer og komponent verdiene som ble brukt i oppkoblingen vises i Tabell 1.

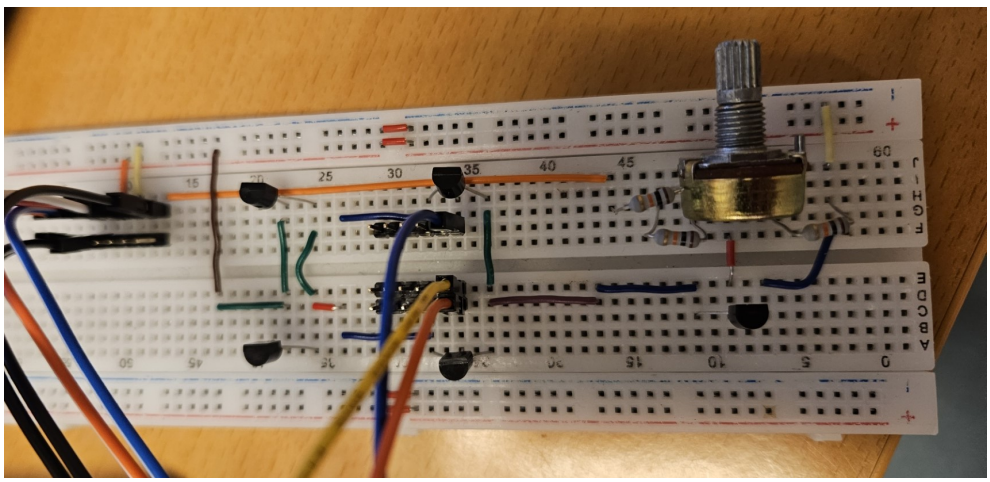


Figur 3: Realisert strømkilde.

Tabell 1: Komponenter og verdier brukt i designet.

Komponent	Verdi/Produknummer
Q_1&Q_2&Q_5	BC547A (NPN)
Q_3&Q_4	BC557B (PNP)
R_{I1}	3kΩ
R_{I2}	0Ω − 10kΩ
R_{I3}	10kΩ

Den oppkoblede kretsen vises i Figur 4.



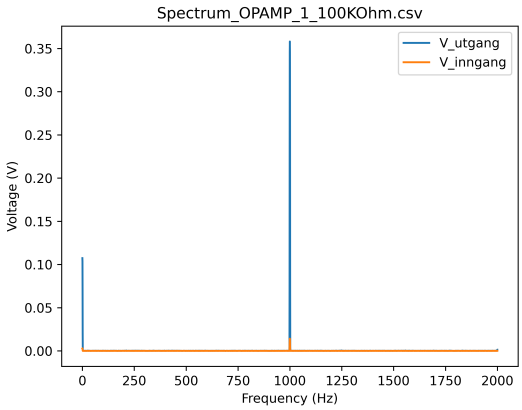
Figur 4: Realisert opperasjonsforsterker

3.2 Målinger

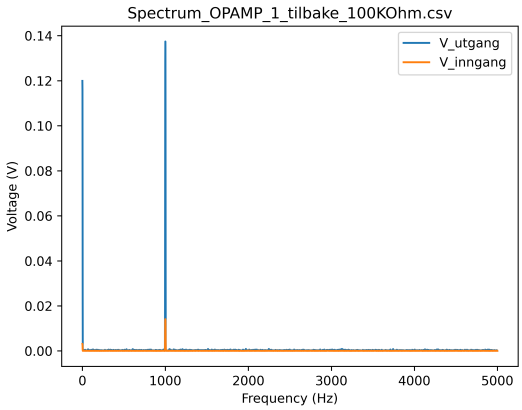
Det ble gjort målinger med ocilioskop og spektrumsanalysator, derretter ble målingene prosesert i python for å finne THD og forsterkning. Koden som ble brukt ligger i Vedlegg A. Målingene ble gjort med en inngangsamplitude på 0.04V og en frekvens på 1kHz. Resultatene av målingene vises i tabell Tabell 2. Ut av tabellen kan vi se at forsterkningen varierer mye når vi ikke har tilbakekobling på utgangen og når vi setter på en lav lastmotstand så synker forsterkningen kraftig. Spektrumsanalysen av utgagnssignalet med last på $R_L = 100k\Omega$ både med og uten tilbakekobling vises i figur Figur 6 og i figur Figur 5.

Konfigurasjon	Amplitude inn	Amplitude ut	Forsterkning	THD
$R_L = 0$	0.04V	0.90V	20	1.38%
$R_L = 100k\Omega$	0.04V	0.99V	22	0.78%
$R_L = 100\Omega$	0.04V	0.72V	16	10.67%
Tilbakekobling $R_L = 0$	0.04V	0.42V	9.7	1.33%
Tilbakekobling $R_L = 100k\Omega$	0.04V	0.42V	9.4	0.41%
Tilbakekobling $R_L = 100\Omega$	0.04V	0.21V	4.7	0.54%

Tabell 2: THD and Amplitude Data



Figur 5: Spectrum med $R_L = 100k\Omega$ åpen løkke

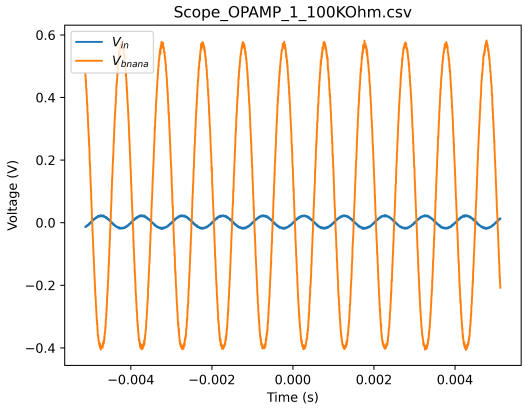


Figur 6: Spectrum med $R_L = 100k\Omega$ tilbakekobling

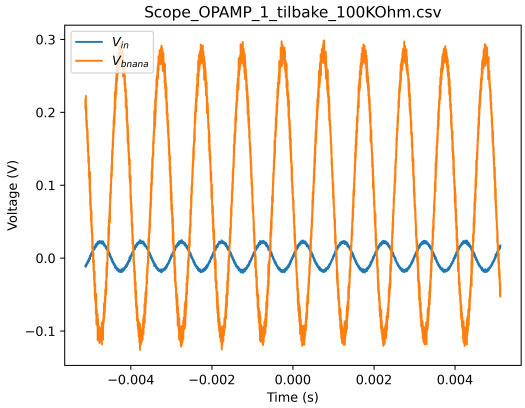
Som vi ser i figur Figur 6 så er det mye distorsjon ved 0Hz. Dette er fordi vi har en DC offset på utgangen. Dette kan vi fjerne ved å sette inn en kondensator i tilbakekoblingen.

3.3 Diskusjon av måleresultater

Det som står mest ut blant målingene er de store frekvenskoponentene rett ved 0Hz i spektrumsanalysen. Dette er fordi vi har en DC offset på utgangen som forskyver signalene i forhold til hverandre noe som man enkelt kan se ved å se på ocilloskopsdataen som vist i Figur 7 og Figur 8. Ettersom dette har en veldig stor påvirkning på THD uten å egentlig bidra med noe støy så kan vi beregne THD uten å ta hensyn til DC offseten som vist i Tabell 2. Dette gjør



Figur 7: Ocilloskopsdata



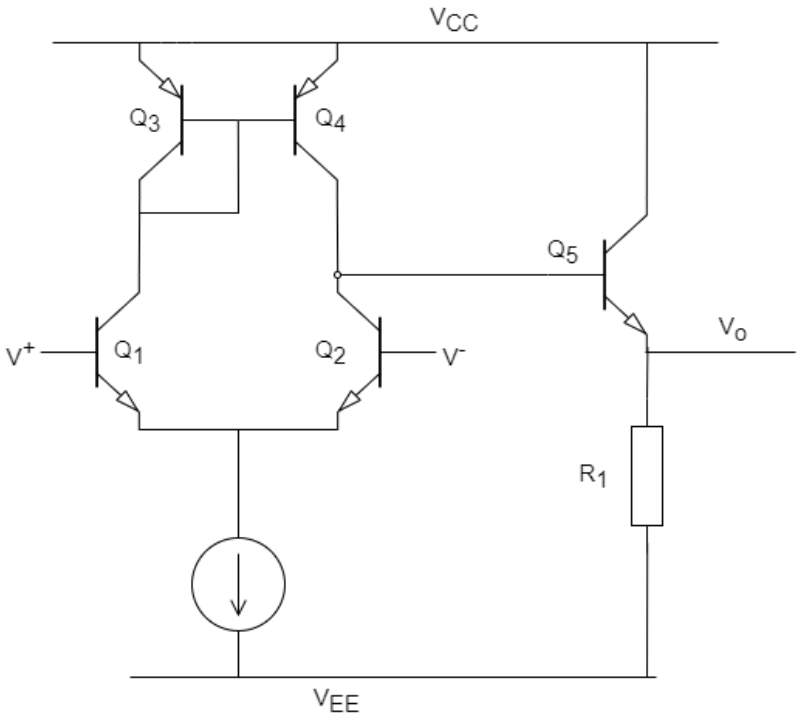
Figur 8: Ocilloskopsdata med tilbakekobling

vi ved å bruke Ligning 3 på dataen fra spektrumsanalysen ved hjelp av python koden under. Hadde man tatt med signalene på 0Hz så hadde THD blitt i snitt 200% i motsetning til det som er vist i Tabell 2.

Som vi også leser lett ut av tabellen over så blir THD vesentlig mye høyere når vi ikke har tilbakekobling på utgangen og lav lastmotstand. Dette er fordi kretsen ikke klarer å drive en så lav lastmotstand fordi den vil trekke mer strøm en systemet klarer å levere så den klarer ikke beholde de ideelee karakteristikkene.

3.4 Forbedringer

Denne kretsen kunne blitt bedre hadde man koblet opp en emitter følger ved utgangen, silk at kretsen hadde blitt seende ut som i Figur 9. Denne endringen ville også sansyneligvis redusert THD ved å fjerne DC offseten på utgangen i tilleg til å sentrere utgangssignalet rundt 0V.



Figur 9: Forbedret differensialforsterker

4 Konklusjon

Kretsen som var koblet opp var en differensialforsterker med bipolare transistorer som ble brukt som en operasjonsforsterker. Total Harmonisk Distrosjon var som forventet når man så bort i fra DC bias. Forsterkninkgen varierer mye med lastmotstand, og det er derfor lurt å ha en emitterfølger ved utgangen. Forsterkninkgen blir mer stabli med tilbakekobling frem til man trekker for mye strøm fra kretsen.

Referanser

[1] L. Lundheim, *Designprosjekt 6*, Institutt for elektronisk systemdesign NTNU 2023.

[2] P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge University Press, 3. utgave, 2016.

[3] ukjent, *Inverting Amplifiers*, Eletronics-Tutorials.ws, `https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_2.html`, 03/10-23.

A Python script for utregning

```
#find all files in current directory that start with 'spectrum' and is a .csv file

import os
import glob
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import argparse

parser = argparse.ArgumentParser(description='A script with command-line arguments.')
parser.add_argument('-d', '--dir', type=str, help='The directory to save the plot to. Defa
parser.add_argument('-f', '--file', type=str, help='The file to plot. Defaults to all file
parser.add_argument('-ph', '--Phase', action='store_true', help='Plot phase as well')
parser.add_argument('-ch_1', '--channel_1', type=str, help='Name of Channel 1, defaluts to
parser.add_argument('-ch_2', '--channel_2', type=str, help='Name of Channel 2, defaluts to
parser.add_argument('-thd', '--THD', action='store_true', help='Plot THD as well')


def find_spectrum_files():
    spectrum_files = []
    for file in glob.glob("spectrum*.csv"):
        spectrum_files.append(file)
    return spectrum_files

#get the data from the spectrum files and generate a plot for each file
def get_spectrum_data(spectrum_files):
    data_dict = {}
    for file in spectrum_files:
        data = np.loadtxt(file, delimiter=',', skiprows=1)
        #round firs collum to 0 decimals
        data[:,0] = np.round(data[:,0], 0)
        data_dict[file] = data
    return data_dict

#save the data from the spectrum as a bodeplot
def save_spectrum_plot(data_dict, args):
    saveDir = args.dir


    for key in data_dict:
        mag1 = np.abs(data_dict[key][:,1])
        mag2 = np.abs(data_dict[key][:,3])
        if np.max(mag1) > np.max(mag2):
            strongest = data_dict[key][:,1]
            weakest = data_dict[key][:,3]
```

```
        else:
            strongest = data_dict[key][:,3]
            weakest = data_dict[key][:,1]


        if args.Phase:
            #generate two subplots one for voltage and one for phase
            fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, sharex=True)
            #plot the voltage
            ax1.plot(data_dict[key][:,0], strongest)
            ax1.plot(data_dict[key][:,0], weakest)
            ax1.set_ylabel('Voltage (V)')
            ax1.set_title(key)
            #plot the phase
            ax2.plot(data_dict[key][:,0], data_dict[key][:,2])
            ax2.plot(data_dict[key][:,0], data_dict[key][:,5])
            ax2.set_ylabel('Phase (deg)')
            ax2.set_xlabel('Frequency (Hz)')
            #save the plot
        else:
            plt.plot(data_dict[key][:,0], strongest)
            plt.plot(data_dict[key][:,0], weakest)
            plt.xlabel('Frequency (Hz)')
            plt.ylabel('Voltage (V)')
            plt.title(key)
            plt.legend([args.channel_1, args.channel_2])
            #plt.show()




        print('Saving plot to:')
        print(os.path.join(saveDir, key[:-4] + '.png'))
        savePath = os.getcwd() + os.path.join(saveDir, key[:-4] + '.png')
        #print(savePath)
        plt.savefig(savePath, dpi = 600)
        plt.clf()

def calculate_THD(data_dict, freq):
    #calculate Total Harmonic Distortion
    for key in data_dict:
        #find a given frequency
        #find to div4 and mult4 because of limited bandwidth
        #frequency = 1000
        index_1000 = np.where(data_dict[key][:,0] == freq)
        freq_val1 = data_dict[key][index_1000[0],1]
        freq_val2 = data_dict[key][index_1000[0],3]
```

```
        index_div2 = np.where(data_dict[key][:,0] == freq/2)
        freq_val1_div2 = data_dict[key][index_div2[0],1]
        freq_val2_div2 = data_dict[key][index_div2[0],3]

        index_div4 = np.where(data_dict[key][:,0] == freq/4)
        freq_val1_div4 = data_dict[key][index_div4[0],1]
        freq_val2_div4 = data_dict[key][index_div4[0],3]

        index_mult2 = np.where(data_dict[key][:,0] == freq*2)
        freq_val1_mult2 = data_dict[key][index_mult2[0],1]
        freq_val2_mult2 = data_dict[key][index_mult2[0],3]

        index_mult3 = np.where(data_dict[key][:,0] == freq*3)
        freq_val1_mult3 = data_dict[key][index_mult3[0],1]
        freq_val2_mult3 = data_dict[key][index_mult3[0],3]

        index_mult4 = np.where(data_dict[key][:,0] == freq*4)
        freq_val1_mult4 = data_dict[key][index_mult4[0],1]
        freq_val2_mult4 = data_dict[key][index_mult4[0],3]


        zero = data_dict[key][0,3]
        #sum of Val 2
        sum_val2 = np.sum(freq_val2_div2)**2 + np.sum(freq_val2_div4)**2 + np.sum(freq_val

        thd = np.sqrt(sum_val2)/freq_val2
        thd2 = np.sqrt(sum_val2+zero)/freq_val2
        print(f'THD for {key} is {round(thd[0]*100, 2)}% or {round(thd2[0]*100, 2)}%')


        #print(f'Index of {freq} is {index_1000} and has value {freq_val1} and {freq_val2}


#main function
def main():
    args = parser.parse_args()

    #Command-line arguments
    if args.file:
        spectrum_files = [args.file]

    #Get the spectrum files
    if not args.file:
        spectrum_files = find_spectrum_files()

    ##Collect data from the spectrum files
```

```
    data_dict = get_spectrum_data(spectrum_files)

    if args.THD:
        calculate_THD(data_dict, 1000)
        return

    save_spectrum_plot(data_dict, args)


if __name__ == '__main__':
    main()
```