

Rapport analog motorlab

Gruppe T83
Sondre Tveiten, Jonathan Slotten

4. mars 2024

Sammendrag

Denne rapporten tar for seg prosessen fra planlegging og konstruksjon, til gjennomføring og resultat av en analog krets. Hensikten med kretsen er å best mulig styre en servomotor til en ønsket posisjon. Det blir gjort ved hjelp av to målere, en proporsjonal krets (P-regulator) og en annen proporsjonal-krets som kan gjøres om til en proporsjonal-integral krets (PI-regulator) via en jumper.

1 Introduksjon

Å styre en servomotor til ønsket posisjon kan være vanskeligere enn man skulle tro, særlig om posisjonen skal være nøyaktig. Denne rapporten vil gi en stegvis gjennomgang av konstruksjonen til en krets som styrer en servomotor med en P- og en PI-regulator. Rapporten vil ta for seg delene i en motor: hastighetsmåler, hastighetsregulator, posisjonsmåler og posisjonsregulator. Dette er grupper av komponenter som jobber sammen for å styre motoren. For å realisere dette, er det brukt en hel del operasjonsforsterkere. Disse er av typen LM741 [4]. Rapporten tar også for seg utregninger av teoretiske verdier, og diskusjon av de faktiske resultatene.

Nytten av dette prosjektet er stor, og man får se kybernetikk og elektronikk i form av noe man selv har designet og implementert. Man kan også oppleve at fysikken samsvarer med

forarbeidets utregninger.

2 Hastighetsmåler

For hastighetsmålingen er målet å få ut et spenningsignal mellom -10 V og +10 V avhengig av hvilken retning og hastighet servomotoren kjører. Inputen kommer fra et tachometer som er koblet til servomotoren. Hastighetsmålingen er gjort i to runder. Først med en enkel differensialforsterker og deretter med en instrumenteringsforsterker bestående av to spenningsfølgere og en differensialforsterker.

2.1 Enkel differensialforsterker

En differensialforsterker blir brukt for å sammenligne to spenningssignaler, og gir et utgangssignal som en funksjon av differansen.

Første hastighetsmåling med enkel differensialforsterker blir gjort med lav utgangsimpedans fra tachometeret, og kan modelleres lik det stiplede området i Figur 2. Utgangen kan beskrives med ligningen [1].

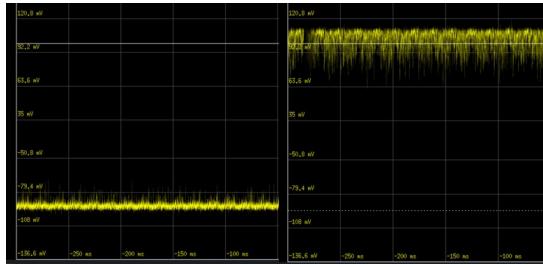
$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2}(V_2 - V_1), \quad (1)$$

hvor V_2 er inngangen til positiv terminal på operasjonsforsterkeren og V_1 er inngangen til negativ terminal. Ligningen [1], og andre ligninger i rapporten hentet fra fagboken [3].

Ved å sette $R_3 = 56 \text{ k}\Omega$ og $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, skal det teoretisk sett gi $\pm 10 \text{ V}$ i hver retning

ved maks hastighet. Det er ikke alltid at teorien stemmer med virkeligheten, se [3]. Det er mulig å finne utgangsspenningen fra tachometeret ved å sette $V_{out} = \pm 10 V$. Man får da $\pm 1,786 V$.

Ved å sette utgangsimpedansen fra tachometeret til høy, ble det innført en motstand på $1 M\Omega$ til begge inngangene på differensialforsterkeren. Dette gav en ny måling på omtrent $\pm 100 mV$ [1]. Årsaken er at en differensialforsterker alene trekker strøm. Mye av energien går da tapt over de innførte motstandene.



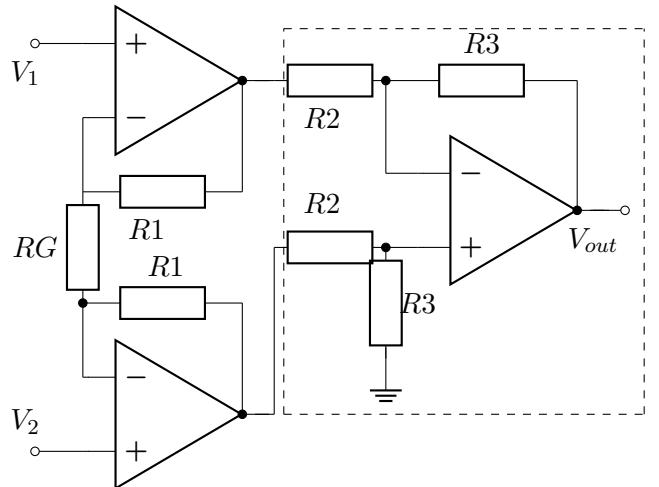
Figur 1: Utgangsspenning ved høy impedans. Viser $V_{max} = 100 mV$ til høyre, og $V_{min} = -100 mV$ til venstre.

Signalene i figur 1 inneholder mye støy. Støy i et signal kan ha flere forklaringer, men her var det uklart på hva som forstyrret signalet. To mulige årsaker er at to komponenter kortsluttet hverandre, eller at et komponent kan ha vært defekt.

2.2 Instrumenteringsforsterker

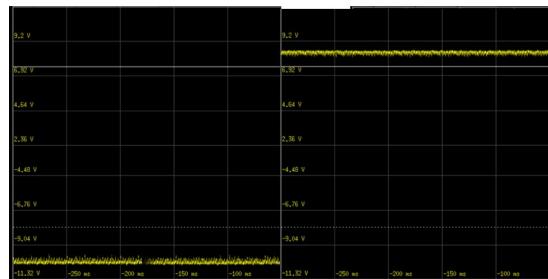
En spenningsfølger kan implementeres i en krets for å måle spenningsignal uten å trekke strøm fra målingen. Det sikrer at målesignalet ikke blir påvirket av selve målingen, noe som er viktig for å klare og regne på kretsen. Når to spenningsfølgere blir koblet på en differensialforsterker med en variabel motstand mellom seg, kalles det en instrumenteringsforsterker [2]. Derfor ble en instrumenteringsforsterker brukt ved måling av utgangsspenningen til tachome-

teret. Dette gjøres for å unngå og trekke strøm fra tachometeret, og påvirke målingen.



Figur 2: Instrumenteringsforsterkeren som er brukt i kretsen. Stiplet firkant markerer en differensialforsterker. $R1 = 10 k\Omega$, $R2 = 18 k\Omega$, $R3 = 10 k\Omega$ og R_G er et $10 k\Omega$ trimmepotmeter av typen T93YA103KT20 [1].

Ved å justere R_G er det mulig å endre styrken til en instrumenteringsforsterkers utgangssignal. Dette ble justert til å være så nære $\pm 10 V$ som mulig. Se figur 3.



Figur 3: Utgangsspenning ved lav utgangsimpedans. R_G er stilt for å nå $(\pm 10) V$. $-10 V$ til venstre og $+9 V$ til høyre.

Ligningen for instrumenteringsforsterkeren

er

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) \left(\frac{R_3}{R_2}\right) (V_2 - V_1), \quad (2)$$

der motstandene er kjente. $V_2 - V_1$ er spenningen fra tachometeret ($\pm 1,786V$), og R_G er et potensiometer med verdier mellom $10\ \Omega$ og $10\ k\Omega$. Ved å sette verdiene inn i formelen, og se bort fra begrenset forsyningsspenning, er det mulig å få V_{out} i intervallet $\pm [2,977, 1985] V$.

3 Hastighetsregulator

Hastighetsregulatoren sørger for at motoren følger en ønsket hastighet. Dette gjøres ved at reguleringeskretsen får inn en hastighetsreferanse, og et mål på nåværende hastighet fra hastighetsmåleren. Deretter styres hastigheten mot referansen. Hvordan et målt signal blir styrt mot referansen varierer fra regulator til regulator.

Her er det brukt både et proporsjonalledd og et integralledd.

Proporsjonalleddet gir et pådrag som er proporsjonalt med avviket fra referanseverdien. Energitap i form av friksjon gjør at proporsjonalregulatoren ikke klarer å oppnå ønsket hastighet. Integralleddet gir et pådrag tilsvarende integralet til avviket fra referanseverdien. Ved å implementere et slikt ledd, klarer motoren å nå ønsket hastighet.

Dersom man påfører ytterligere belastning på en proporsjonalregulator, vil det resultere i et enda større avvik. Ved økning av belastningen på en PI-regulator vil integralleddet øke pådraget, og skru opp pådraget helt til den går i metning. Konsekvensen av å øke belastningen på PI-regulatoren over tid kan være at man får oversving dersom belastningen kuttes. Integraleffekten i PI-regulatoren vil da fortsette å gi kunstig høyt pådrag frem til referansen blir nådd. Integralleddet sliter med å vite hvor nær den er referansen. Denne effekten kalles for

windup, og kan være et problem i mange systemer. Effekten kan fremkalles ved fysisk bremsing av motoren når integralleddet er koblet inn. Se figur 5.

Regulatorkretsen kan deles inn i fire trinn:

3.1 Regulatorkretsen

Den første delen av regulatorkretsen [4] gir ut en sum som representerer hastighetsavviket e_ω . Dette gjøres ved hjelp av en differensialforsterker som regner ut $e_\omega = \omega_d - \omega_m$, der ω_d er referansen og ω_m er hastighetsmålingen. Hastighetsregulatoren er en PI-regulator, som gir ut et pådrag ved:

$$u(t) = K_p * e_\omega(t) + K_i \int_{t_0}^t (e_\omega(t)) dt. \quad (3)$$

Deretter splittes signalet e_ω , og sendes inn i en inverterende forsterker med $gain = -1$. Dette gjøres fordi signalet skal videre inn i proporsjonalforsterkeren som forsterker signalet gjennom den inverterende inngangen.

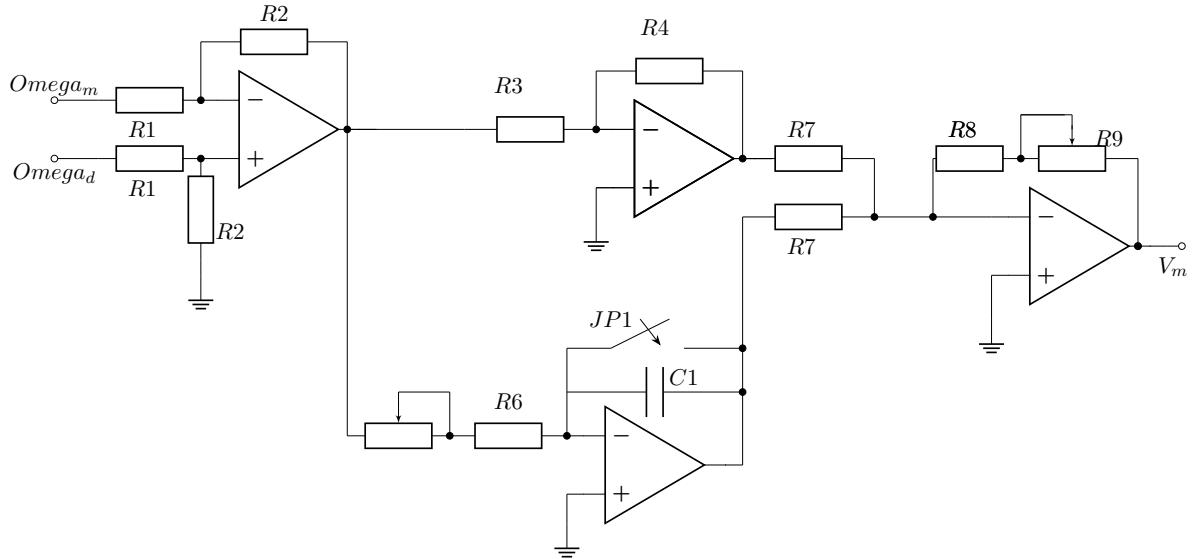
e_ω Sendes også inn i integralleddet av regulatoren. Her skal integralleddet sørge for at standardavviket til hastigheten integreres bort. Bidraget til integralleddet er gitt ved:

$$u(t) = K_i \int_{t_0}^t (e_\omega) dt. \quad (4)$$

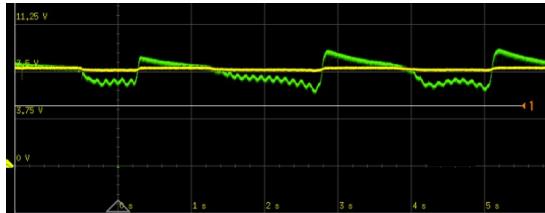
Her er K_i integralforsterkningen styrt av potensiometeret $R5$.

Det siste leddet av hastighetsregulatoren består av en proporsjonalforsterker. Denne får inn et summert signal av bestående av hastighetsavviket og det integrerte pådraget $e_\omega t$, som skaleres videre av proporsjonalforsterkeren for å gi ut et hensiktsmessig pådrag. Pådraget til proporsjonalleddet i regulatoren, er gitt som et produkt av hastighetsavviket og proporsjonalforsterkningsleddet K_p [5].

$$u = K_p * e_\omega. \quad (5)$$



Figur 4: PI-regulert krets for hastighetsregulator. $R1 = R2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R3 = R4 = R7 = R8 = 10 \text{ k}\Omega$, $R5 = R9 = 1 \text{ M}\Omega$ - trimmepotmeter av typen M63M105KB30T607 [2], $R6 = 1 \text{ k}\Omega$, $C1 = 1 \mu\text{F}$.

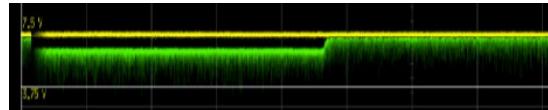


Figur 5: Fysisk bremsing av motor fører til *integral windup* og derav et oversving. Her er intraltiden treg, og det tar litt lenger tid før den når referansen igjen. Dette er mye bedre enn null demping som direkte styring medfører. Nivået til spenningen (grønn plot) tilsvarer hastigheten.

3.2 Hastighetsregulator - målinger

Hastighetsregulatoren var konstruert slik at man kunne velge å kortslutte integralleddet. De første målingene ble gjort med et kortsluttet integralledd, for å studere stasjonæravviket som oppstår. Deretter ble integralleddet skrudd på, og stasjonæravviket forsvant (se figur [6]). Tra-

sientresponsen ved integraleffekt ble også undersøkt ved å fysisk bremse motoren (se figur 5).



Figur 6: Integralleddet med rask integraltid koblet inn for å nulle ut stasjonæravviket.

Stasjonæravviket til systemet i figur (6), og responsen stemte i henhold til teorien. Dermed var kretsen satt opp riktig.

4 Posisjonsmåler

Hensikten med en posisjonsmåling er å vite hvor måleenheten befinner seg. I dette tilfellet er det en servomotor hvor det er ønskelig å vite motorens posisjon i et intervall på 0 grader (θ_{min}) til 360 (θ_{max}) grader. Vinkelen blir presentert i form av et strømsignal i intervallet

[4, 20] mA (θ_m 7).

Posisjonsmåleren baserer seg på et potensiometer som er direkte koblet til servomotoren. Dette kan dreie omtrent 360 grader, med unntak av et lite område i overgangen 360 til 0 grader hvor man får feil verdier som utgang. Posisjonsmåleren gir derfor et utgangssignal som funksjon av motorens vinkel. Gitt oppsettet i Figur 8, kan man regne seg frem til et teoretisk utgangssignal i området:

$$[-5, 238 (\theta_{max}), +0, 714 (\theta_{min})] V. \quad (6)$$

For å lage en posisjonsmåler, blir det brukt tre operasjonsforsterkere: en spenningsfølger, et justerbart gain-offsettrinn og en spennings-til strømmomformer. Se figur 7 for forklaring.

Spenningsfølgeren tar inn et spenningsignal fra potensiometeret og sender utgangen videre til gain-offsettrinnet.

Gain-offsettrinnet ligner på en ikke-inverterende operasjonsforsterker, men har to forskjeller. Den ene er et potensiometer, som blir brukt til å justere relativ jord på operasjonsforsterkerens positive inngang i intervallet ± 15 V. Det gir tilsvarende mulighet for offset-justering på utgangssignalet. Den andre forskjellen er at tilbakekoblingen også inneholder et potensiometer, som gjør det mulig å justere forsterkningen.

Spennings- til strømmomformeren gjør om spenningssignalet fra gain-offsettrinnet til et strømsignal mellom 4 og 20 mA. Fordelene med å representere motorvinkelen med strøm fremfor spennin, er at et strømsignal er mer robust mot støy og gjør det lettere å identifisere feil. Ved bruk av spenningsignal kan man også få signaltap over avstand, mens strømmen reiser hele veien gjennom linjen uavhengig av spenningsstapet. Man kan fremdeles støte på problemer dersom linjen er brutt. Om man for eksempel har et [0, +10] V spenningsignal og leser av 0 V, så kan det bety 0 V, men det kan

også bety at linjen er brutt. Ved å bruke en 4 til 20 mA-krets, kan man lese av nullnivå som 4 mA og enkelt vite at man har problemer der som signalet viser en lavere verdi.

Gitt Figur 7, kan spennings- til strømmomformeren beskrives med ligningen

$$I = -\frac{R5}{R4 * R6} V_{in}, \quad (7)$$

gitt at følgende er oppfylt:

$$R4_1(R5_2 + R6) = R5_1 * R4_2. \quad (8)$$

Gitt verdiene fra Figur 7 og ønsket utgang som er (4-20) mA kan man regne seg frem til hva inngangen må være. Ved å løse ligning 7 for V_{in} , ser man at inngangssignalet må være mellom -1,08 V (4 mA) og -5,40 V (20 mA).

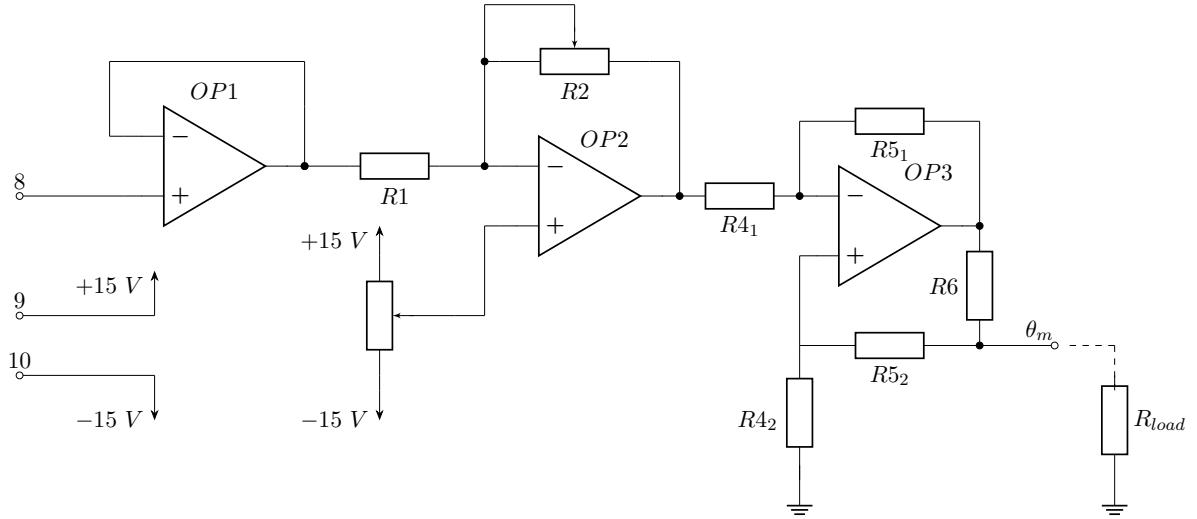
Ved måling ble spenningssignalet fra potensiometeret koblet til servomotoren målt til [-5,20, +0,95] V, noe som var innenfor akseptabelt område sammenlignet med teorien 6. Deretter ble gain-offsettrinnet justert slik at θ_m ga en utgangsstrøm på (4-20) mA for hele det gyldige måleområdet til motorvinkelen.

5 Posisjonsregulator

Posisjonsregulatoren blir brukt til å gi servomotoren et pådrag basert på avviket mellom motorens målte vinkel, og en ønsket referansevinkel. I konstruksjonen blir det brukt to operasjonsforsterkere: en for beregning av posisjonsavvik, og en med proporsjonalledd.

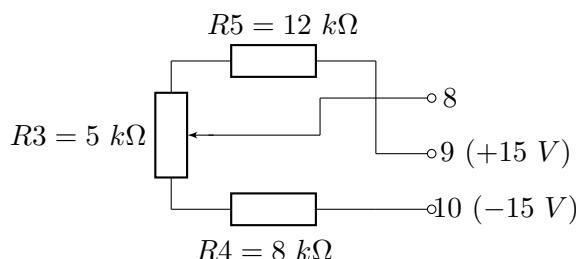
Til beregning av posisjonsavvik ble posisjonsmålingen på (4-20) mA omgjort til et spenningsignal på den ene inngangen. Ettersom strømmen går gjennom en motstand ($R1$) på 250Ω til jord, gir Ohms lov en spennin på [+1, +5] V.

På den andre inngangen inngangen kan zenerdioden ($D1$) sees på som en 5,1 V spenningskilde, mens kondensatoren ($C1$) kan sees



Figur 7: Kretsen for posisjonsmåler. OP1 er en spenningsfølger, OP2 er et gain-offsettrinn og OP3 er spenning- til strømomformer. Inngang 9 og 10 er koblet til hver sin inngang på potensiometeret koblet til servomotoren, mens 8 er utgangen fra potensiometeret.

$R_1 = 6,8 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ - trimmepotmeter av typen T93YA103KT20, $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ - trimmepotmeter av typen T93YA104KT20, $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 27 \Omega$.



Figur 8: R3 er et potensiometer som gir verdier basert på motorvinkel. Utgang 8, 9 og 10 viser til Figur 7.

bort fra. Da gjenstår spenningsdeling, og man får en utgang fra potensiometeret (R_4) mellom

$$[+1, 67, +4, 65] \ V. \quad (9)$$

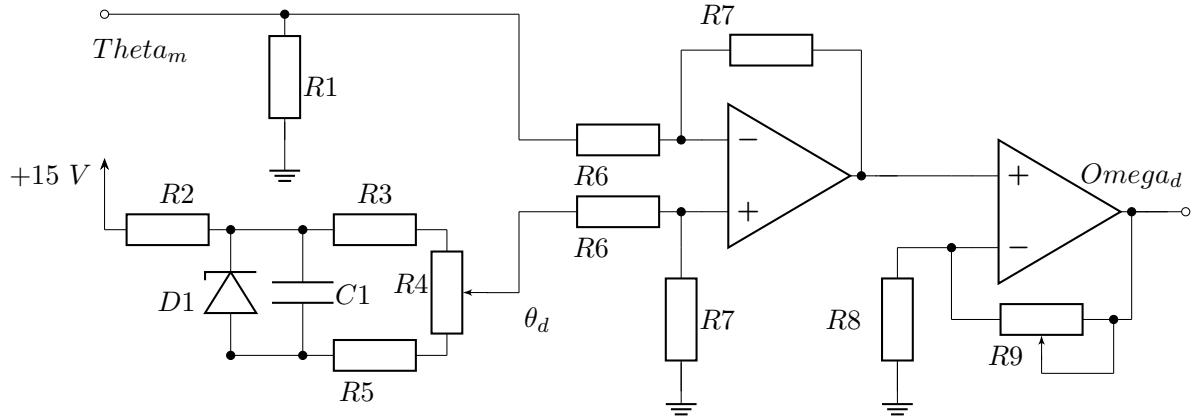
Ved å bruke verdiene fra posisjonsregulatoren (Figur 9) og formelen for en differensialforsterker [1] får man $V_{out} = \frac{R7}{R6}(\theta_d - \theta_m)$, som gir ut en spenning i området [-3,33, +3,65] V. Spen-

ningssignalet som representerer vinkelavviket til motoren sendes så videre til proporsjonalforsterkeren som skal skalere pådraget fra posisjonsavviket til en hensiktsmessig verdi 5.

5.1 Posisjonsregulator - målinger

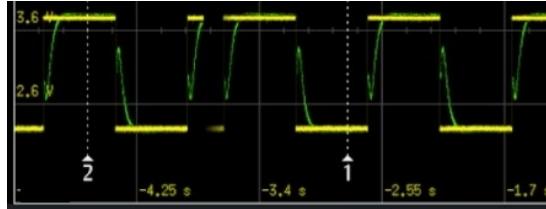
Ettersom posisjonsregulatoren er en proporsjonalregulator, krevde forsterkningen litt finjustering. Dette ble gjort ved å stille på potensiometeret $R9$. Så ble en funksjonsgenerator brukt for å sende inn flere type funksjoner som posisjonsreferanse til motoren. Både motorens respons og posisjonsreferansen ble så plottet opp mot hverandre på oscilloskopet, der grønn plott er motoren, og gult er referansen.

Både firkant-, sinus- og trekantpulser med en amplitude på 1,5 V ble testet på regulatoren. Her viste det seg at regulatoren klarte seg best ved litt lavere proporsjonalforsterking. Da fikk den et fint innsving mot referanse, uten at det tok for lang tid. Dette betyr at sys-



Figur 9: Kretsen for posisjonsregulator. $R1 = 250 \Omega$, $R2 = 560 \Omega$, $R3 = 1,5 k\Omega$, $R4 = 10 k\Omega$ - potensiometer for posisjonsreferanse, $R5 = 5,6 k\Omega$, $R6 = R7 = 100 k\Omega$, $R8 = 27 k\Omega$, $R9 = 1 M\Omega$ - trimmepotmeter av typen M63M105KB30T607 [2], $D1 = 5,1 V$ - zenerdiode, $C1 = 100 nF$.

temet var litt underdempet, men slik måtte det være for å kunne nå generere referanseverdier.

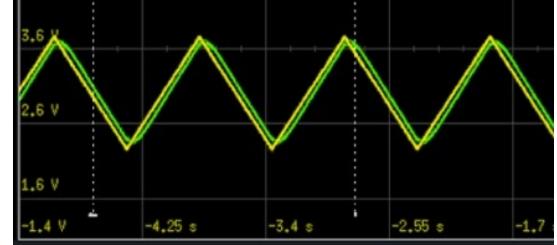


Figur 10: Responsen ved firkantpuls etter fintuning.

Man oppnådde en enda bedre respons enn den vist i figuren 10 ved økning av proporsjonalleddet i regulatoren. Da var det mulig å oppnå tilnærmet kritisk demping på responsen. Grunnen man ikke ønsket å gjøre dette er fordi systemet da resulterte i veldig treg respons ved andre typer pulser, og overdemping.

Ved lav proporsjonalforsterkning reagerte systemet bra på trekantpuls og sinuspulser. Sinuspuls og trekantpulsen 11 ble sendt inn med en amplitude på 1,5 V, en frekvens på 1 Hz og en offset på 3 V for å ligge innenfor spenningsintervallet regnet ut i 9.

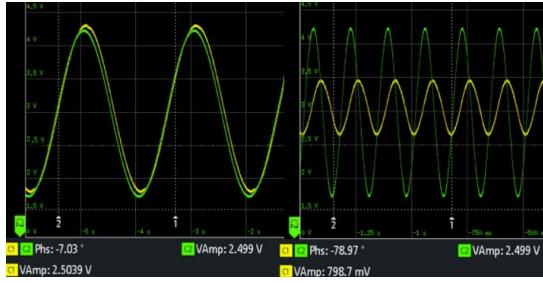
Funksjonsgeneratoren kan generere et stort



Figur 11: Trekantpuls som referanse.

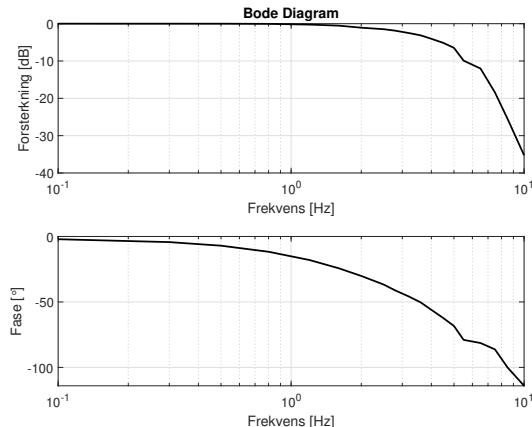
sprang av forskjellige frekvenser. En motor vil ha en treghet som medfører en tidskonstant, som vil slå ut ved høyere frekvenser. I figur 12 følger motoren referansen bra når frekvensen er på 0,5 Hz, men den sliter ved en frekvens på 5,5 Hz. Dette kommer av at tidskonstanten som blir for stor i forhold til frekvensen. Motorens amplitude går også ned, ettersom motorens 5,5 Hz signal treffer referansen som da er på vei ned fra en topp, samtidig som motorens posisjon er på vei opp. Da skifter retningen til motoren og amplituden kuttes ned. Dette kan observeres i høyre del av figur 12, der den gule referansen har en amplitude på 2,50 V og motorens grønne plot har en amplitude på 0,79 V.

Økning i tidskonstant, medfører også en fase-



Figur 12: Sinuspuls på 0,5 Hz til venstre, og 5,5 Hz til høyre.

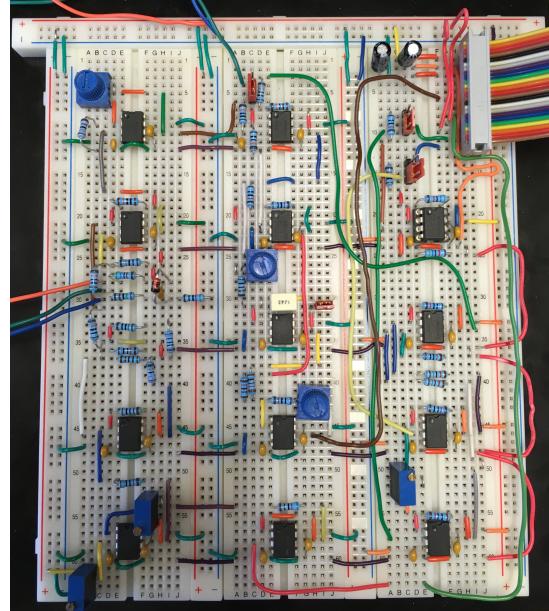
forskyvning av plottet til motoren. I figuren 12 står faseforskyvningen nederst på under plottet. Her vises det til en faseforskyvning på $-7,03^\circ$ ved 0,5 Hz referanse, og $-78,97^\circ$ ved 5,5 Hz. Betydningen av økt frekvens på referansepulsen er fremstilt visuelt i figur 13. Her er frekvensen plottet mot forsterkningen [dB] og faseforskyvningen [\circ]. Forsterkningen [K] er gitt ved $Amplitude_{ut}/Amplitude_{inn}$. Det er så mulig å regne seg om til decibel [dB] ved å benytte formelen $K_{dB} = 20 * \log_{10}(K)$. Faseforskyvningen er gitt av ϕ fra formelen for signalet ut: $V_{ut}(t) = A_{ut} * \sin(\omega * t + \phi)$.



Figur 13: Bodeplot av motorens ytelse versus generert sinussignal ved økende frekvens. Frekvensområde $[+0,10, +10]$ Hz.

6 Konklusjon

Ved å koble opp to målere sammen med to regulatorer som en kaskaderegulator, viser det seg at det er fullt mulig å styre en servomotor elektrisk analogt. Integraleffekten til hastighetsregulatoren viste seg å være veldig nyttig i å kvitte seg med avvik, samt potensiometerene kunne tunes mer enn nok for å oppnå ønsket regulering. En fysisk motor har også sine begrensinger, og dette kommer frem i posisjonsregulatorenens målinger [12]. Motorkretsen ble bygget på et breadboard med analoge komponenter. Under er et bilde av resultatet [14].



Figur 14: Bildet viser den fullstendige kretsen. De fire operasjonsforsterkerne til høyre er hastighetmåleren. De fire øverste i midterste kolonne er hastighetsregulatoren. Trioen nederst i venstre hjørne er posisjonsmåleren, og de to øverste i venstre hjørne er posisjonsregulatoren.

Referanser

- [1] *3/8" Square (10 mm) Multi-Turn Cermet Trimmer.* T93. Dato: 4. mars 2024. VISHAY. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2571820.pdf>.
- [2] *3/8" Square (10 mm) Single-Turn Cermet Trimmer.* M63M105KB30T607. Dato: 4. mars 2024. VISHAY. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2371506.pdf>.
- [3] Curtis D. Johnson. *Process Control Instrumentation Technology, Eighth Edition.* Pearson New International Edition, 2014.
- [4] *LM741 Operational Amplifier.* LM741. Dato: 4. mars 2024. Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>.