

# Rapport analog motorlab

Gruppe T-31

Alexander Aschehoug, Jakob Austrheim

10. mai 2023

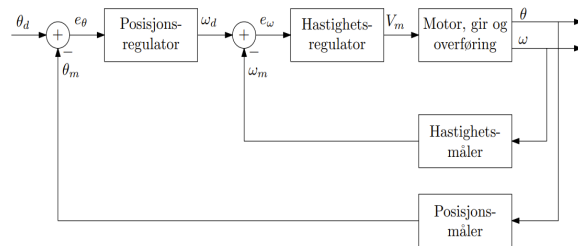
## Sammendrag

Servomotor er en selvstendig elektrisk enhet med bruksområde innenfor automatiseringsteknologi. Servomotorer har en innebygd tilbakekobling som tillater dem å justere seg selv ved regulering og opprettholde ønsket vinkelposisjon, hastighet og/eller akselerasjon. For å oppnå ønsket oppførsel kreves det filtrering av måling for hastighet og posisjon, signaltilpasning av målesignaler til hastighet- og posisjonsregulator. Samt tuning av regulatorer til en ønsket respons er observert.

## 1 Introduksjon

Servomotorer brukes til nøyaktig kontroll av bevegelse og posisjon. Med sin høye presisjon og repeterbarhet, er de svært anvendelige innenfor en rekke sektorer i dagens samfunn. Servomotorer brukes i roboter for presisjonsbevegelser, bildebehandling i optiske systemer og droner som stiller strenge krav til fly- og kjøremønster[3]. Høyt dreiemoment-til-vekt-forhold forårsaker høy etterspørsel etter videreutvikling av servomotorer.

Servomotoren er kaskaderegulert som vist ved figur 1. Motoren gjør selv hastighets- og posisjonsmålinger ved hjelp av operasjonsforsterkere. Posisjonen er gitt ved et vinkelutslag, representert ved et spenningsignal på [1,5] V. Hastighetsmålingen blir representert av en spenningsdifferanse fra tachometeret, forsterket til å ligge i intervallet  $\pm 10$  V. Avviket mellom målesignalene og ønskede referanseverdier blir regulert med en proporsjonalregulator for posisjon, og proporsjonal-integralregulator



Figur 1: Signalene  $V_m, \omega, \theta$  er motorens drivspenning, vinkelhastighet og vinkelposisjon. Sensorblokkene inneholder den fysiske sensoren (tachometer og potmeter) samt signalbehandlingen[4].

for hastighet. Rapporten vil kronologisk følge IMRAD-modellen.

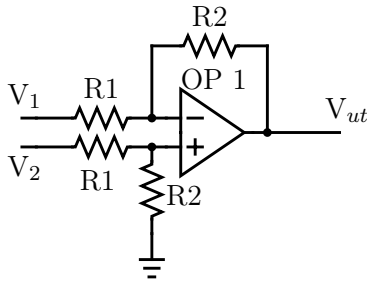
## 2 Teori

Teorien bak servomotorens funksjonalitet og virkemåte baserer seg hovedsakelig på operasjonsforsterkere og reguleringsteknikk. En operasjonsforsterker (op-amp) er en elektrisk komponent som tar inn to inngangssignaler og generer et forsterket utgangssignal. Ved hjelp av andre kretskomponenter som motstander og kondensatorer kan op-ampen brukes til å utføre matematiske operasjoner med inngangssignalene. I denne labben benyttes op-amper av typen LM741 [2].

I en servomotor forekommer det to sentrale operasjonsforsterkere - differensialforsterker og instrumenteringsforsterker. Man antar ideell op-amp med uendelig høy forsterkning og inngangsimpedans, og null utgangsimpedans. En differensialforsterker (figur 2) fungerer som en subtraherer, hvor utgangsspenningen er gitt ved

$$V_{ut} = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1). \quad (1)$$

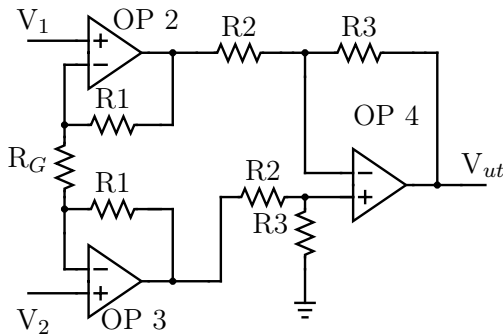
En instrumenteringsforsterker forsterker svake differensielle signaler, har høy inngangsimpedans og lav utgangsimpedans. Op-ampen minimerer støy og forstyrrelser, og kan justere ut-



Figur 2: Kretsskjema for en differensialforsterker. Op-ampene er nummerert etter deres posisjon på studentkortet.

gangsspenningen med et trimmepotmeter [5, s. 96]. Instrumenteringsforsterkeren anvendes i måle- og sensorteknikk som krever høy presisjon. Et trimmepotmeter er en dynamisk motstandskomponent bestående av en indre slepemostand, denne endres manuelt for å oppnå ønsket verdi [5, s. 31]. Utgangsspenningen til en instrumenteringsforsterker er gitt ved

$$V_{ut} = (1 + \frac{2R_1}{R_G}) \frac{R_3}{R_2} (V_2 - V_1). \quad (2)$$



Figur 3: Kretsskjema for en instrumenteringsforsterker.

Servomotoren benytter seg også av op-ampere koblet som spenningsfølgere og inverterende forsterkere. Spenningsfølgere, også kalt buffer, "isolerer" en del av kretsen [6, s. 15]. Inngangs- og utgangsspenningen vil være lik, og signalet kan drives videre uavhengig av framtidige spenningsfall. En inverterende forsterker end-

rer fortegnet på signalet på inngangen. Denne er hensiktsmessig å bruke for å oppnå ønsket fortegn ved bruk av flere op-ampere i serie.

For å oppnå høy presisjon og repeterbarhet er servomotoren avhengig av regulerings-teknikk. Dette omhandler regulering og stabilisering av dynamiske systemer. Servomotoren er kaskaderegulert med en proporsjonalregulator for posisjon og en proporsjonalintegralregulator for hastighet [4].

En proporsjonalregulator gir ut et pådrag basert på reguleringsavviket multiplisert med en konstant [1, s. 65]. En økende proporsjonalforsterkning medfører en kortere transientfase/raskere responstid og et minskende stasjonæravvik. En høy forsterkning medfører praktiske begrensninger, pådraget vil gå i metning på bakgrunn av pådragets begrensning. Pådraget definert som  $v$  er gitt ved  $K_p$  multiplisert med avviket mellom referansen og målt verdi

$$v = K_p(r - y). \quad (3)$$

Stasjonærverdien til et proporsjonalforsterket respons vil sjeldent være lik referanseverdien. Avviket mellom de to målesignalene kalles et stasjonæravvik [1, s. 66]. Ved å legge til en integralvirkning vil dette avviket fjernes. Integralvirkningen integrerer avviket, og forsterker responsen slik at den når referanseverdien. En proporsjonalintegralregulator øker også systemets orden fra første til andre. Pådraget definert i denne type regulator er gitt ved

$$v = K_p \varepsilon + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) dt. \quad (4)$$

Det kan være problematisk å benytte seg av et integratorledd. Integratorleddet vil kontinuerlig integrere opp avviket mellom målesignalet og referanseverdien. Som et resultat av dette kan responsen til systemet overskride referanseverdien. Dette fenomenet kalles "integrator windup" [1, s. 107]. En vanlig anti-windup teknikk er å først slå på integratorleddet mot slutten av transientfasen.

For å oppnå ønsket oppførsel for regulatoren kreves en tilstrekkelig tuning. Ved å påføre en forstyrrelse på motoren vil man få en indikator på et rasjonelt forhold mellom proporsjonal- og integralvirkning. Med en betydelig friksjon vil avviket bli stort og proporsjonalforsterkning gå i metning. I det friksjonen avtar vil målesignalet gå mot det stasjonære avviket uten over-sving.

Det kan være nyttig å teste frekvensrespon-sen til systemet. Referansen ( $V_{inn}(t)$ ) og målt verdi ( $V_{ut}(t)$ ) sinusgenereres og er gitt ved  $A_{inn}\sin(\omega t)$  og  $A_{ut}\sin(\omega t + \phi)$ . Forsterkning ( $K_{dB}$ ) og faseforskyvningen ( $\phi$ ) er gitt ved

$$K_{dB} = 20 \log(K) \text{ der } K = \frac{A_{ut}}{A_{inn}} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{\Delta t \cdot 2\pi}{T} = \Delta t \cdot 2\pi \cdot f. \quad (6)$$

### 3 Hastighetsmåler

For å kunne bruke hastighet som målesignal i hastighetsregulatoren trengs det en hastighetsmåler. Målingen kommer fra et tachometer - en komponent som produserer en analog spenning, proporsjonal med motorens rotasjon per minutt (RPM)[6, s. 31]. Hastighetsmålingen må tilfredsstille ønsket intervall for å senere bli regulert. Ved å benytte en differensialforsterker, blir signalet fra tachometeret forsterket. Ved

Tabell 1: Verdier for resistans i Figur 2.

Variabel	Verdi[kΩ]
$R_1$	10.0
$R_2$	56.0

bruk av likning 1 og tabell 1 blir forsterknin-gen til differensialforsterkeren

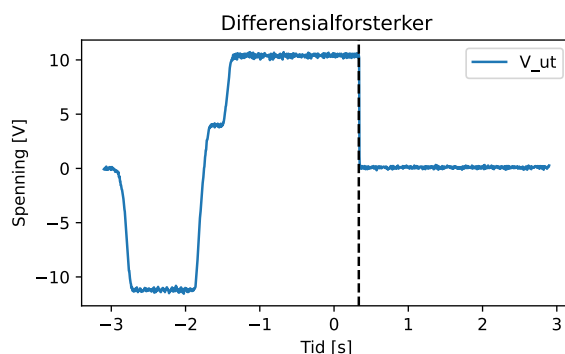
$$A = \frac{R_2}{R_1} = 5.6. \quad (7)$$

Med lav utgangsimpedans vil oscilloskopet gi ut spenningsintervallet  $\pm 10$  V. Fra forarbeidet

beregnes spenningen som tachometeret gir ut ved maks og min rotasjon. Spenningen ( $V_T$ ) er gitt ved  $V_{ut}$  delt på forsterkningen

$$V_T = \frac{\pm 10 \text{ V}}{5.6} = \pm 1.79 \text{ V}. \quad (8)$$

Figur 4 viser hvordan utgangsimpedansen fra tachometeret påvirker spenningen ut av differensialforsterkeren. Ved lav utgangsimpedans er utgangsspenningen  $\pm 10$  V og med høy utgangsimpedans er spenningen  $\pm 100$  mV, utgangsimpedansen byttes ved tid  $\frac{1}{3}$  s.



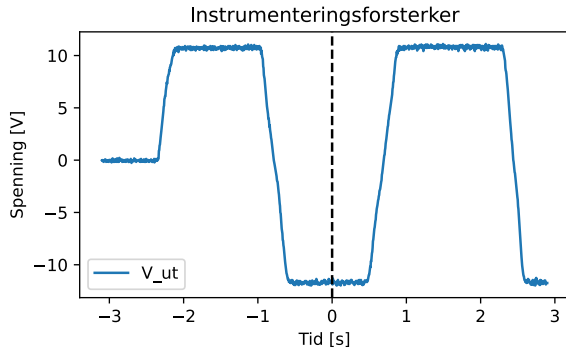
Figur 4: Utgangsspenningen går fra  $\pm 10$  V til  $\pm 0.1$  V når utgangsimpedansen går fra lav til høy ved tid  $\frac{1}{3}$  s.

Den høye inngangsimpedansen i instrumenteringsforsterkeren vil neglisjere virkningen av kildeimpedansen til tachometeret, og resulterer i et konstant utgangsspenningsintervall  $\pm 10$  V.  $R_G$  er et trimmepotmeter av typen T93YA103KT20 som i labben kan justeres mellom  $0 \Omega$  og  $10 \text{ k}\Omega$  [7]. Ved å utelate forsynings-spenningen til op-ampen og ta i bruk likning 2 vil teoretisk  $V_{ut}$  ligge mellom  $\pm [3, 1990]$  V. Ut ifra formel 2 og tabell 2 kan motstanden for trimmepotmeteret  $R_G$  beregnes. Dette vil være mer en tilnærming enn fasit.

$$R_G = \frac{2 \cdot 10 \text{ k}\Omega}{|\pm 10 \text{ V}| \frac{18 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \frac{1}{1.79 \text{ V}} - 1} = 2.2 \text{ k}\Omega. \quad (9)$$

Tabell 2: Verdier for resistans i Figur 3.

Variabel	Verdi[k $\Omega$ ]
$R_1$	10.0
$R_2$	18.0
$R_3$	10.0
$R_G$	10.0



Figur 5: Utgangsspenningen til instrumenteringsforsterkeren er gitt ved  $\pm 10$  V når utgangsimpedansen går fra lav til høy ved tid 0 s.

Figur 4 og figur 5 viser at det er fordelaktig å bruke instrumenteringsforsterkeren til å transportere målesignalet. Forsterkeren har høy inngangsimpedans som neglisjerer kildeimpedansen til tachometeret. Bruk av differensialforsterker og høy utgangsimpedans fra tachometeret, vil medføre at tilnærmet hele spenningsfallet ligger over motstanden før de differensielle spenningene  $V_1$  og  $V_2$ . Inngangsspenningene får lavere verdi som påvirker utgangsspenningen.

## 4 Hastighetsregulator

For å oppnå ønsket oppførsel for servomotoren, er det helt essensielt å regulere hastigheten. Dette gjøres med en proporsjonal-integralregulator (PI-regulator). Figur 7 viser oppbygningen av hastighetsregulatoren. Regulatoren er bygd opp av fire operasjonsforster-

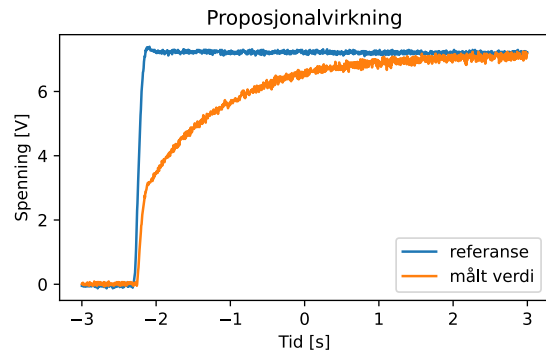
kere.  $OP\ 5$  er en differensialforsterker som beregner reguleringsavviket mellom referansehastighet og målt hastighet. Referansehastigheten hentes fra motoren til servomotoren, den endres med et trimmepotmeter i intervallet  $\pm 15$  V. Målt hastighet er gitt ved utgangen av instrumenteringsforsterkeren.  $OP\ 6$  er en inverterende forsterker,  $OP\ 7$  er en integrerende forsterker, før summen av  $OP\ 6$  og  $OP\ 7$  blir skalert i  $OP\ 8$ . Regulatorens proporsjonalitetsforsterkning ( $K_p$ ) er gitt ved forsterkningen til  $OP\ 8$

$$K_p = \frac{R_8 + R_9}{R_7}. \quad (10)$$

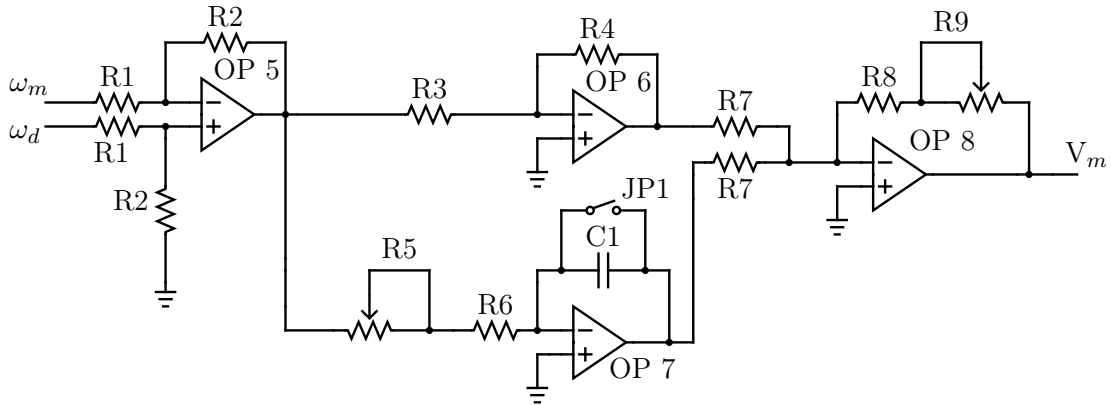
Ut ifra likning 10 vil man kunne styre hastighetsregulatorens responstid ved å justere verdien til  $R_9$ . Likevel vil en proporsjonalitetsregulator resultere i et stasjonært avvik. Referanseverdien blir nådd med integralvirkning, som er gitt ved  $OP\ 7$  i kretsen. Dette er en integrerende op-amp som integrerer opp reguleringsavviket som legges til i pådraget. Integralforsterkningen tunes av både  $R_5$  og  $R_9$ , og er gitt ved

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{R_8 + R_9}{R_7(R_5 + R_6)C_1}. \quad (11)$$

For å unngå oversving på hastighetsregulatoren settes proporsjonalitetsforsterkningen høy og integratorforsterkningen lav. Det er rime-



Figur 6: Figuren viser proporsjonalvirkningen til hastighetsregulatoren, avviket skaleres med  $K_p$ .



Figur 7: Servomotorens hastighetsregulator. Finner avviket, og beregner pådraget ( $V_m$ ) med proporsjonal- og integralvirkning.

Tabell 3: Verdier for impedans i Figur 6.

Variabel	Verdi[kΩ]
$R1 = R2$	100.0
$R3 = R4 = R7 = R8$	10.0
$R5 = R9$	1000.0
Kondensator	Verdi[μF]
$C1$	1.0

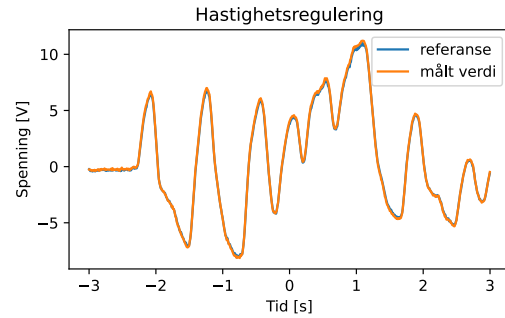
lig å anta at dersom man hadde påført en betydelig forstyrrelse på motoren, for eksempel ved å fysisk bremse den, ville man observert integrator-windup.

For å forhindre metning og integrator windup vil ønsket oppførsel for hastighetsregulatoren oppnås med en høy  $K_p$  og relativt lav  $K_i$  verdi. Figur 6 viser hvordan proporsjonalvirkning går mot stasjonærverdi og unngår oversving. Fra likning 4 er hastighetsregulatoren gitt ved

$$V_m = K_p \epsilon_\omega + K_i \int_0^t \epsilon_\omega dt. \quad (12)$$

## 5 Posisjonsmåler

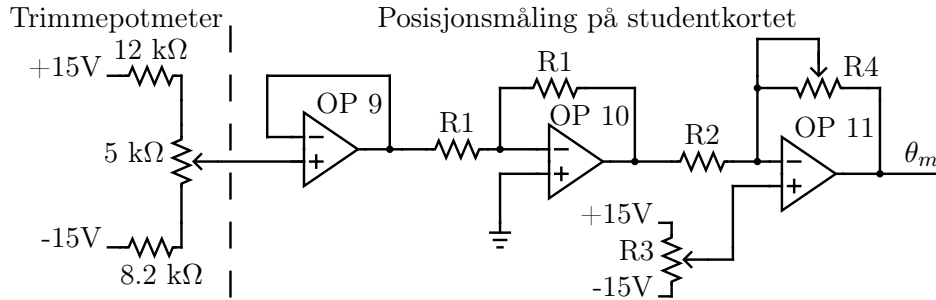
For å bestemme motorens posisjon tar man i bruk motorens trimmepotmeter. Posisjonsmå-



Figur 8: Figuren viser en god hastighetsregulering ved bruk av PI-regulator.

leren er en krets bestående av tre op-amper vist ved figur 9. Utsignalet fra trimmepotmeteret (til venstre i 9) går først gjennom en spenningsfølger som sørger for at signalet inn i kretsen holder seg konstant. Signalet blir deretter invertert av en inverterende operasjonsforsterker (OP 10). Hensikten med å invertere signalet er oppnå ønsket fortegn ut av den siste operasjonsforsterkeren i kretsen. I tillegg til å invertere signalet påfører den siste operasjonsforsterkeren (OP 11) signalets forsterkning, og forskyvning. Forsterkningen blir bestemt ved å regulere størrelsen på  $R_4$ , og signalets forskyvning avhenger av størrelsen på  $R_3$ .

Ved å koble henholdsvis  $\pm 15$  V på hver av inngangene til potmeteret beregnes utgangs-



Figur 9: Servomotorens posisjonsmåler. Finner motorposisjon, forsterker og forskyver signalet. Motorens målte posisjon er gitt ved  $\theta_m$ .

Tabell 4: Verdier for resistans i Figur 7.

Variabel	Verdi[kΩ]
$R1$	1.0
$R2$	6.8
$R3$	100.0
$R4$	10.0

spenningen. Ved bruk av motstandsverdiene til motorkortets trimmepotmeter og verdiene i tabell 4, vil utgangsspenningen variere i intervallet  $[-5.24, 0.717]$  V. Dette spenningsintervallet representerer vinkelutslaget til motoren, altså motorens posisjon. Signalet vil forsterkes og forskyves til man får et signal ( $\theta_m$ ) ut av den siste op-ampen som ligger i intervallet  $[1, 5]$  V. Siden regulatorene er koblet i kaskade, er det ønskelig å gjøre posisjonsmåleren mer robust for oversving, derfor økes intervallet til  $[0.9, 5.1]$  V. Fra forarbeidet beregnes  $R3$  og  $R4$  ved bruk av likning 1, og verdiene i tabell 4, løst som et likningsett med to ukjente.

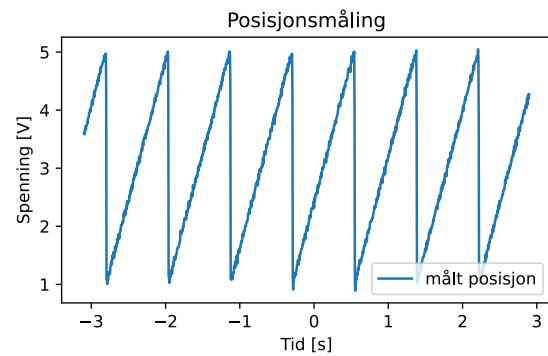
$$5 \text{ V} = ((-15 \text{ V} + \frac{30 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} \cdot R3) + 5.24 \text{ V}) \cdot \frac{R4}{6.8 \text{ k}\Omega} \quad (13)$$

og

$$1 \text{ V} = ((-15 \text{ V} + \frac{30 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} \cdot R3) - 0.717 \text{ V}) \cdot \frac{R4}{6.8 \text{ k}\Omega} \quad (14)$$

Ved å løse likningsettene er  $R3$  gitt ved  $57.35 \text{ k}\Omega$  og  $R4$  ved  $4.56 \text{ k}\Omega$ .

Ideelt sett skal 1 V representere et vinkelutslag på 0 grader, og henholdsvis 5 V lik 360 grader.



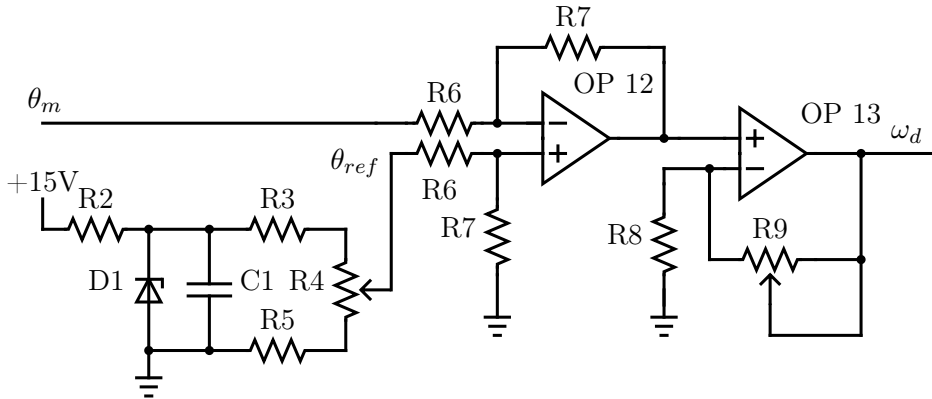
Figur 10: Motorens målesignal. Sagtannbølgen varierer i intervallet  $[0.9, 5.1]$  V.

## 6 Posisjonsregulator

Posisjonsregulatoren vist ved figur 11 genererer en hastighetsreferanse gitt ved proposjonalreguleringen av avviket mellom posisjon og referanseposisjon. Utgangen går inn i hastighetsregulatoren, og resulterer i kaskaderegulering.

Delen av kretsen som setter referanseposisjonen består av en zenerdiode  $D1$ , en kondensator  $C1$ , et sett av mostander  $R2$ ,  $R3$  og  $R5$ , samt et trimmepotmeter  $R4$ . Kretsen har et spenningspotensiale på +15 V over seg.

Referansen er dynamisk, og blir bestemt av



Figur 11: Servomotorens posisjonsregulator. Motorens posisjon er gitt ved  $\theta_m$  mens den genererte hastighetsreferansen er gitt ved  $\omega_d$ .

Tabell 5: Verdier for impedans i Figur 9.

Variabel	Verdi[kΩ]
$R2$	0.560
$R3$	1.5
$R4$	10.0
$R5$	5.6
$R6 = R7$	100.0
$R8$	27.0
$R9$	1000.0
Kondensator	Verdi[μF]
$C1$	1.0
Zenerdiode	Verdi[V]
$D1$	5.1

trimmepotmeteret  $R4$ . Fra forarbeidet benyttes Ohms lov til å finne spenningsintervallet for posisjonsreferansen ut av  $R4$ . Ved bruk av verdiene fra tabell 5 og figur 11 er strømmen i kretsen gitt ved

$$I = \frac{5.1 \text{ V}}{(10 + 5.6 + 1.5) \text{ k}\Omega} = 0.298 \text{ mA}. \quad (15)$$

Største og minste referansespenning er gitt ved spenningsfallet over  $R5$  ved maksimalt og minimalt utslag på slepemotstanden i  $R4$ .

$$V_{\min} = 5.6 \text{ k}\Omega \cdot 0.298 \text{ mA} = 1.67 \text{ V} \quad (16)$$

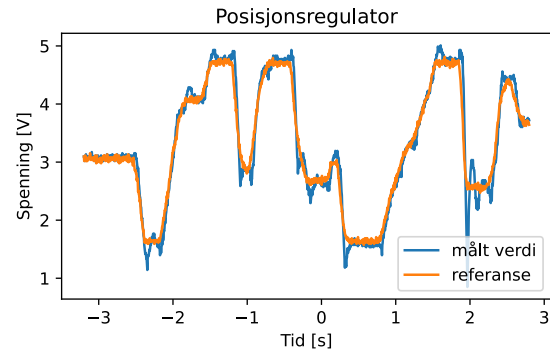
og

$$V_{\max} = (10 + 5.6) \text{ k}\Omega \cdot 0.298 \text{ mA} = 4.65 \text{ V}. \quad (17)$$

Referanseposisjonen vil altså ligge i intervallet  $[1.67, 4.65] \text{ V}$ . Dette intervallet er mindre enn intervallet for motorens måleposisjon ( $[1, 5] \text{ V}$ ).

Referanseverdien vil videre gå inn i en differensialforsterker, gitt ved  $OP 12$  i figur 11. Utsignalet fra  $OP 12$  vil være avviket mellom referanse og motorposisjon. Avviket inverteres og forsterkes i  $OP 13$ , med utgangssignal  $\omega_d$ .

Figur 12 viser plot av referanse- og målingsposisjon ved ferdigregulert servomotor.

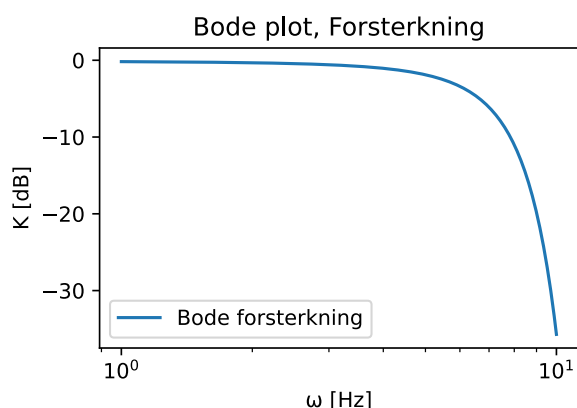


Figur 12: Referanseposisjon plottet mot regulert posisjonsmåling.

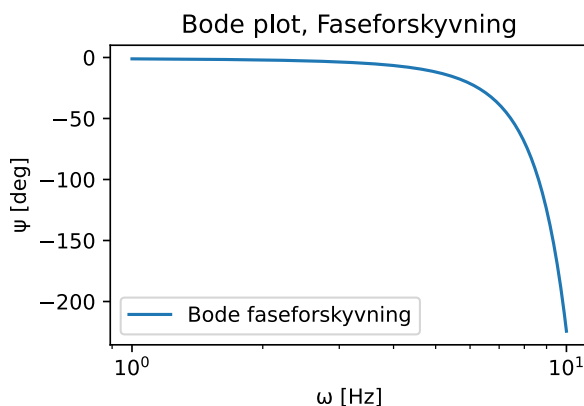
## 7 Resultat og diskusjon

Instrumenteringsforsterker er fordelaktig å benytte i servomotoren. Dette er på bakgrunn av dens uavhengighet i forhold til tachometerets kildeimpedans. Fra forarbeidet skulle hastighetsmålingen ligge i intervallet  $\pm 10$  V, men i realitet ble intervallet målt til  $[-11.2, 10.5]$  V.

Kaskaderegulatoren byr på utfordringer knyttet til tuning av regulatorparameterne. Servomotoren er et hurtig system, avhengig av en rask transientfase uten stasjonæravvik. Figur 13 og 14 viser frekvensresponsen til systemet. Bode-plottene presenterer begrensningene ved forsterkning og fasevinkel, en høyere frekvens medfører en minkende forsterkning og en økende fasevinkel. Knekkfrekvensen er gitt ved en forsterkning på -3 dB. Som vist i figur 13 og 14 har systemet en knekkfrekvens på 5-6 Hz. Blir systemet utsatt for en høyere frekvens enn knekkfrekvensen blir ytelsen drastisk redusert. Bode-plottene tar hensyn til målte verdier fra labben, verdiene blir innmaten i en regresjon som gir ut en tilnærmet eksponentiell funksjon. Regulatorene er regulert eksperimentelt og ved intuisjon. Ved ettertanke er det mulig at anerkjente metoder som Ziegler-Nichols kunne ført til en høyere knekkfrekvens.

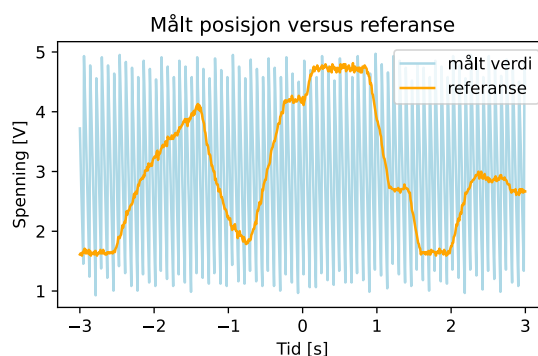


Figur 13: Figuren viser bode-plot av forsterkningen, ytelsen reduseres drastisk etter 5-6 Hz.



Figur 14: Figuren viser bode-plot av faseforskyvning, med tilsvarende knekkfrekvens som forsterkningen.

Det er flere grunner til hvorfor man setter spenningsintervallet til referanseposisjonen ( $[1.67, 4.65]$  V) mindre enn måleposisjonen sitt ( $[0.9, 5.1]$  V). For det første forhindrer det at det blir satt en referanse som motoren ikke klarer å regulere seg inn til. Dersom referanseverdien hadde hatt mulighet til å settes større enn måleverdien ville det oppstått en dødsone, et ulineært fenomen som kunne ført til ustabilitet. Figur 15 viser at referansen ikke når målt posisjon sine ekstremalverdier.



Figur 15: Figur viser et plot av målt posisjon med kjent sagtannbølge i forhold til posisjonsreferansen.



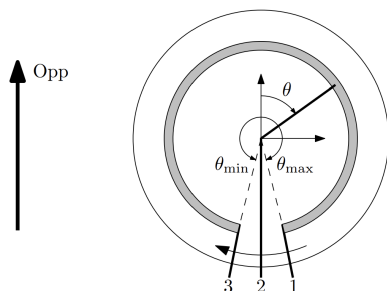
Den andre grunnen er å gjøre regulatoren mer robust for oversving. Dersom en referanseverdi hadde blitt satt til en av endepunktene til måleintervallet, og systemet hadde blitt utsatt for støy eller oversving, ville motoren kontinuerlig gått rundt.

Grunnet referanseposisjonen begrensede intervall vil ikke motoren kunne reguleres til hele trimmepotmeterets omdreiningsområde. Dette kan ses ved å finne forholdet mellom spenningsavvikene i henholdsvis referanseposisjonen [1.67, 4.65] V og motorposisjonen [0.9, 5.1] V

$$\frac{\Delta_{ref}}{\Delta_{måling}} = \frac{(4.65 - 1.67) \text{ V}}{(5.1 - 0.9) \text{ V}} \approx 0.71. \quad (18)$$

Forholdet forteller at motoren bare kan reguleres til 71% av utslagsområdet. Dette resulterer i et reelt utslagsområde på ca. 256 grader.

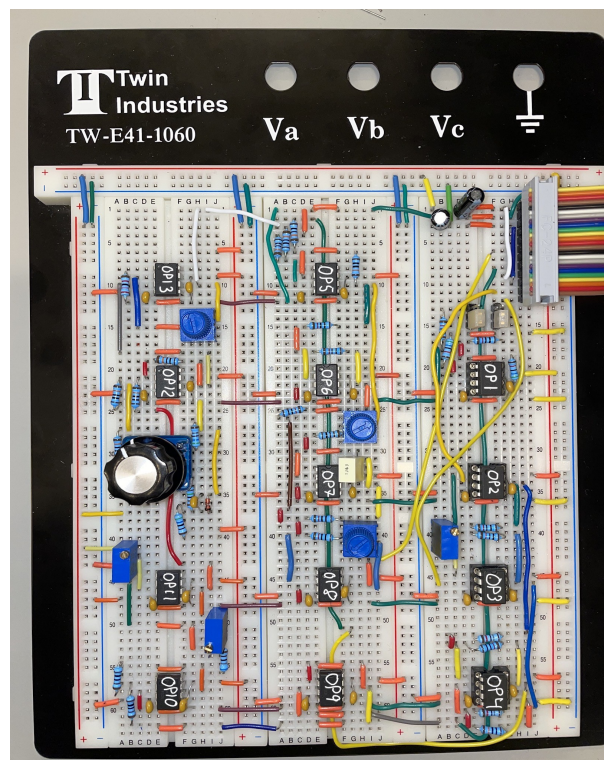
Det er også en fysisk dødsone i potmeteret. Dette er vist ved figur 16, der det er en sektor mellom  $\theta_{min}$  og  $\theta_{maks}$ . Denne dødsonen riktignok ganske liten, og kan derfor ansees som neglisjerbar.



Figur 16: Figuren viser en illustrasjon av innsiden av potmeteret. Slepemotstanden har ikke 360 grader omdreining[4].

## 8 Konklusjon

Det kreves en rekke elementer og teori for oppkobling av servomotorens reguleringsystem. Måling av hastighet og posisjon må tilpasses på bakgrunn av støy og regulering. Regulatorne finner et kompromiss mellom følsomhet, oversving og et krav om å befinne seg innenfor det lineære området. Servomotoren er regulert med en knekkfrekvens på 5-6 Hz og et utslagsområde på 256 grader. Alt dette blir gjort med op-amper og potmeter.



Figur 17: Oppkobling av krets. OP 1 er en differensialforsterker og OP 2 - OP 4 er hastighetsmåleren. Hastighetsregulatoren er gitt ved OP 5 - OP 8. Avslutningsvis måles posisjon i OP 9 - OP 11, og posisjonsregulering i OP 12 - OP 13.

## Referanser

- [1] Jan Thommy Gravdahl. *Kybernetikk Introduksjon: Innføring i dynamikk og reguleringsteknikk*. Institutt for teknisk kybernetikk, 2020, s. 65–107.
- [2] Texas Instruments. «LM741 Operational Amplifier datasheet». I: (2015). URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>.
- [3] Emil Johnsen. «Analog Motorlab- Informasjon og introduksjon». I: (2023). URL: [https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/\\_37409\\_1/cl/outline](https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/_37409_1/cl/outline).
- [4] Emil Johnsen. «Del 2 - Analog Motorlab - Oppgaver». I: (2023). URL: [https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/\\_37409\\_1/cl/outline](https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/_37409_1/cl/outline).
- [5] Curtis D Johnson. *Process Control Instrumentation Technology*. Pearson education limited, Essex, 2014, s. 31–96.
- [6] A; Trovik S; Næstby A Nysæther T; Tufte. *Kompendium TTK4101, Instrumentering og måleteknikk*. Kompendiumkomiteen for kybernetikk, 2021, s. 15–31.
- [7] Vishay Sferince. «3/8Square Multi-Turn Cermet Trimmer». I: (2017). URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2571820.pdf>.