

Trottelreglering med parameterstyrning

Examensarbete utfört i Fordonssystem
vid Tekniska Högskolan i Linköping
av

Peter Johansson

Reg nr: LiTH-ISY-EX-1683

Trottelreglering med parameterstyrning

Examensarbete utfört i Fordonssystem
vid Tekniska Högskolan i Linköping
av

Peter Johansson

Reg nr: LiTH-ISY-EX-1683

Handledare: **Simon Edlund, Lars Nielsen**

Examinator: **Lars Nielsen**

Linköping, 3 september 1996.

Sammanfattning

En regulator till trotteln (luftspjället) i en bensinmotor utvecklas och implementeras. DC-motorn som vrider trottelskivan drivs av en pulsbreddsmodulerad (PWM) spänning. Reglerad storhet är vinkelläget hos DC-motorns axel och styrsignal är spänningen som bestämmer pulsbredden hos PWM-signalen. På grund av att belastningen varierar mycket över arbetsområdet konstrueras en olinjär regulator. Den är av PID-typ med parameterstyrning (gain scheduling) där proportionalitetsparametern (förstärkningen) varierar med arbetspunkten. Ziegler-Nichols reläåterkopplingsmetod används för att bestämma utgångsvärden vid intrimningen. Regulatorn implementeras i ett PC-baserat realtidssystem. Vidare behandlas problemet med så kallad hunting, dvs svårigheten att få en jämn rörelse i mekanisk utrustning med stor statisk friktion. Genom att låta momentet pulsera (dithering) minskar huntingeffekten.

Nyckelord: trottell, parameterstyrning, gain scheduling, hunting, pulsbreddsmodulering

Abstract

A controller for a throttle in a petrol engine is designed and implemented. The DC-motor which turns the throttle plate is driven by a pulsewidth-modulated (PWM) voltage. The controlled variable is the angle at the DC-motor shaft and controller output is the voltage which determines the pulsewidth in the PWM-signal. Because of the fact that the load varies a lot in the operating range a nonlinear controller is designed. It is a PID-type with gain scheduling where the proportional parameter varies with the operating point. In order to choose appropriate starting values for parameter tuning, the Ziegler-Nichols closed-loop (relay feedback) method is used. The regulator is implemented in a real-time system based on PC:s. The so called hunting problem is discussed, i.e. the difficulty to get a smooth motion in mechanical equipment which has large static friction. By letting the torque oscillate (dithering) the action is improved.

Key Word: throttle, gain scheduling, hunting, pulsewidth modulation

Tackord

Först och främst vill jag tacka mina handledare Simon Edlund och Lars Nielsen. Tack riktas också till övriga anställda vid Fordonssystem för deras hjälpsamhet.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Problembeskrivning	1
1.2	Mål	1
1.3	Avgränsningar	1
1.4	Metoder	1
2	Bakgrund	2
2.1	Varför elektronisk trottelsstyrning?	2
3	Beskrivning av systemet	3
3.1	Mekanisk konstruktion	3
3.2	Blockschema	4
3.3	Yttre momentet M_y	5
3.4	Bandbredd	6
4	Regulatorutveckling	7
4.1	Val av PWM-frekvens	7
4.2	Val av samplingsfrekvens	7
4.3	Regulatorstruktur	7
4.3.1	Konventionella (linjära) regulatorer	7
4.3.2	Kunskapsbaserad regulator	7
4.4	Ziegler-Nichols relämetod	8
4.4.1	Resultat	9
4.5	Regulator med parameterstyrning	10
4.5.1	Struktur	10
4.5.2	Fuzzysystem enligt Sugeno och Takagi	10
4.5.3	Val av invariabler	11
4.5.4	Medlemskapsfunktioner	11
4.5.5	Anpassning till mätdata	12
4.6	Implementering	15
4.7	Resultat från experiment	15
4.8	Reglering med lägre PWM-frekvens	19
4.8.1	Resultat från experiment	21
5	Slutsatser	24
6	Utvidgningar	25
	Referenser	26
	Bilaga A: Beräkning av momentutväxling	27

1 Inledning

1.1 Problembeskrivning

I Fordonssystemens laboratorium finns en bensinmotor av samma typ som sitter i vanliga personbilar. Luftflödet till motorn styrs med ett spjäll i insugningsröret (fig 3.1). I motorsammanhang kallas ett sådant spjäll för trottelt (eng: throttle). Trotteltvinkeln, α , avgör hur mycket luft som passerar till cylindrarna vilket i sin tur styr effektutvecklingen i motorn. I äldre bilar regleras trotteltvinkeln direkt av förarens fot med hjälp av någon mekanisk överföring t ex en wire. I moderna motorer blir det allt vanligare med elektronisk trotteltstyrning (ETS) dvs ett elektriskt system där trottelt öppnas och stängs med t ex en likströmsmotor. Ett sådant system används också i Fordonssystemens motorlaboratorium men regleringen av trotteltvinkeln har inte fungerat tillfredsställande. Den befintliga regulatorn klarar inte att reglera bort stationära fel och utsignalen är "fladdrig". Detta examensarbete är ett försök att förbättra trotteltstyrningen så att den i högre grad motsvarar de krav som ställs på utrustning som används i en forskningsmiljö.

1.2 Mål

Det huvudsakliga målet är att utveckla och implementera en regulator till trottelt. Ett annat mål är att studera hur fuzzy logic kan användas för att öka intelligensen i styrlagarna och i detta arbete använda något datorbaserat utvecklingsverktyg för fuzzy logic.

1.3 Avgränsningar

Arbetet har varit inriktat på regulatorutveckling och implementering på den befintliga utrustningen. Inga ansträngningar har gjorts för att finna alternativ teknik, t ex annan typ av trottelt, ställdon och givare.

1.4 Metoder

En PID-regulator kompletterad med parameterstyrning (gain scheduling) utvecklas. Parameterstyrningen realiseras med hjälp av fuzzy logic.

2 Bakgrund

2.1 Varför elektronisk trottelsestyrning?

Det finns ett antal anledningar till att ersätta den mekaniska kopplingen mellan gaspedal och trottelse med elektronisk styrning. Gemensamt för dem är att det inte alltid är lämpligt eller nödvändigt att föraren med sin fot bestämmer luftflödet till motorn. Hittills har ETS använts i t ex antispinnssystem och farthållare [3]. I ett antispinnssystem minskas trottelseöppningen och därmed motorns utgivna moment när hjulen slirar mot underlaget. Detta förbättrar framkomligheten och ökar säkerheten vid körning på snö och is. På senare tid har ytterligare användningsområden för elektronisk trottelsestyrning tillkommit, bl a följande:

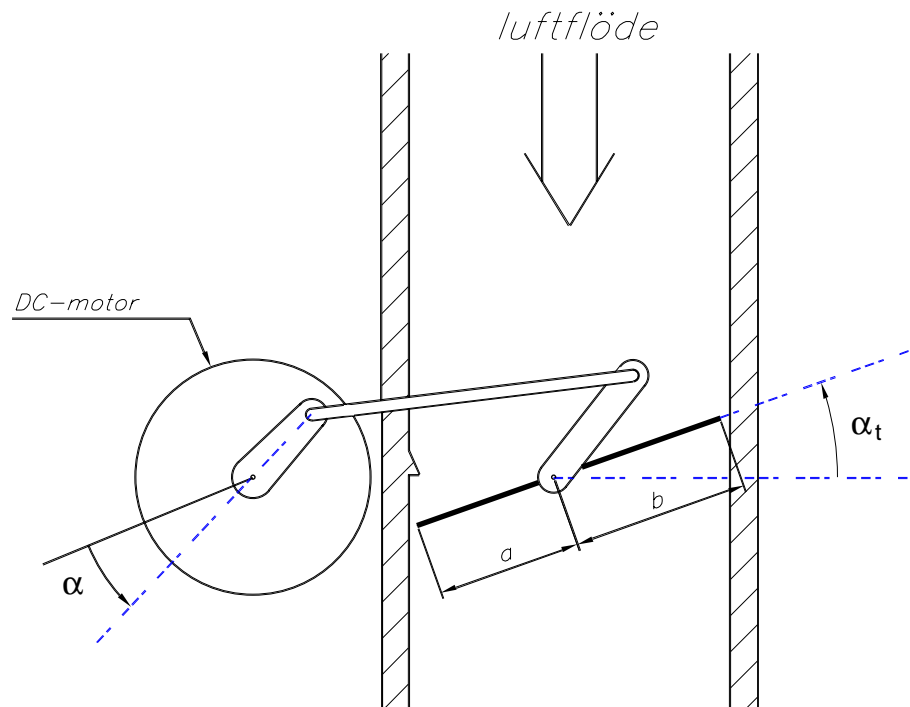
Vid katalysatoruppvärmning: För att minimera utsläppen av miljö farliga ämnen vill man så snabbt som möjligt få upp katalysatorns temperatur när motorn startas. Detta kan man göra genom att styra luft/bränsleblandningen och tändvinkeln, men detta påverkar också motorns effektutveckling. Här kan ETS användas för att kompensera så att skillnaden för föraren mellan körning i uppvärmningsläge och normal körning inte märks.

Vid automatväxling: Växelslag i en automatlåda vid konstant trottelsevinkel ger vanligtvis en förändring i drivkraft d v s bilen rycker till. Med ETS kan man få ett mjukare beteende vid växling

Momentreglering vid lean-burnkörning: Ett sätt att minska utsläppen från motorn är att låta den gå på en mager luft/bränsleblandning (lean burn), d v s lite bränsle och mycket luft vid förbränningen. För att få maximal effekt ur motorn krävs dock fetare blandning, s k stökiometriskt förhållande mellan luft- och bränslemängd. Övergången mellan dessa två fall bör vara momentan d v s motorn ska ej köras "halvmagert" eftersom detta ger höga kväveoxidhalter i avgaserna. För att undvika ryck i motormomentet vid övergångarna måste samtidigt trottelsevinkeln ändras och detta görs med ETS.

3 Beskrivning av systemet

3.1 Mekanisk konstruktion

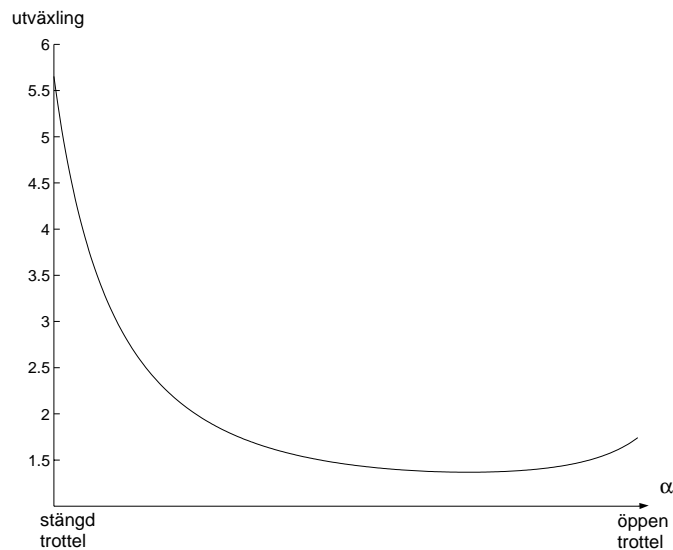


Figur 3.1. Principskiss av trottels mekaniska konstruktion

Som framgår av 3.1 vrids trottelskivan av en likströmsmotor som härnäst benämns DC-motor. Motoraxelns rörelse överförs till trotteln med hjälp av hävarmar och stag. Hävarmarna är inte lika långa. Denna konstruktion gör att utväxlingen, d v s förhållandet mellan det drivande och det överförda momentet, blir beroende av axlarnas vinkelläge. Fig 3.2 skissar kvoten mellan överfört och drivande moment som funktion av motoraxelns vinkel. Beräkningarna presenteras i bilaga A.

Det är okänt om den olinjära karaktäristiken har valts medvetet. Som synes är utväxlingen störst intill stängt läge och där blir alltså det vridande momentet som störst. Eventuellt kan tanken bakom detta vara att motorn skall orka slita loss trotteln om den skulle ha fastnat på grund av isbildning eller smuts.

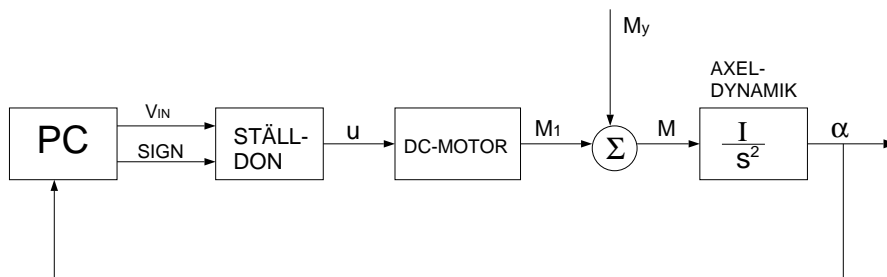
Trottelsaxeln är placerad en bit ifrån skivans centrumlinje ($b > a$). Därför uppkommer ett vridande moment när luften trycker på skivan eller snarare på undertrycket på baksidan av trotteln (mot cylindrarna). Detta moment utgör största delen av den belastning som DC-motorn känner. Anledningen till den asymmetriska utformningen är att man vill att trotteln skall stängas om DC-motorn blir strömlös (det finns ingen återföringsfjäder på denna trotteln). Då finns ingen risk att trotteln står öppen och bilmotorn rusar om strömförsörjningen bryts.



Figur 3.2. Utväxling som funktion av motoraxelns vinkel

3.2 Blockschema

Systemet med trottel, likströmsmotor och styrutrustning presenteras som ett blockschema i fig 3.3



Figur 3.3. Blockschema

Förklaringar till blocken och signalerna i schemat:

PC: Laboratoriets dator med programvara för styra och reglera i realtid.

Ställdon: Elektronisk krets som ställer ut den önskade effekten till likströmsmotorn. Styrsignalen u är pulsbreddsmodulerad (eng: **PulseWidth Modulation** – PWM), d v s ett pulståg där bredden på pulserna är proportionell mot spänningen V_{IN} . Fig 3.4 Signalen *sign* (ett eller noll) bestämmer vilket tecken u ska ha, d v s åt vilket håll DC-motorn roterar.

DC-motor: Motorn som vider trotteln.

M_1 : Momentet som DC-motorn anbringar på motoraxeln

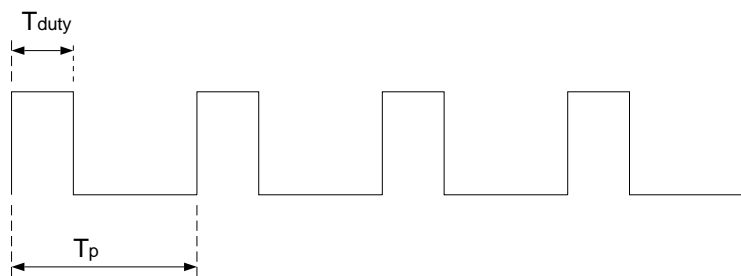
M_y : Det moment som anbringas på motoraxeln på grund av yttre storheter som friktion och belastning.

M : Det resulterande momentet på motoraxeln.

Axeldynamik: Motoraxelns dynamik. I är tröghetsmomentet (har ej beräknats)

α : Motoraxelns vinkelläge. Mäts med en inbyggd potentiometer i intervallet 5V (stängd trottell) till 0.5V (helt öppen). I fortsättningen anges α i intervallet 0V (stängd trottell) till 4.5V (öppen).

Observera att det är motoraxelns vinkel som mäts och återkopplas till regulatorn.



Figur 3.4. PWM-signalen från ställdonet. T_{duty} styrs av V_{IN}

3.3 Yttre momentet M_y

M_y har tre källor: dels friktion i lager m.m; dels tröghetskrafterna som uppstår när trottelskivan accelereras; och dels det lastmoment som uppkommer när luft strömmar förbi skivan. Dessa tre delar gör systemet olinjärt av följande orsaker:

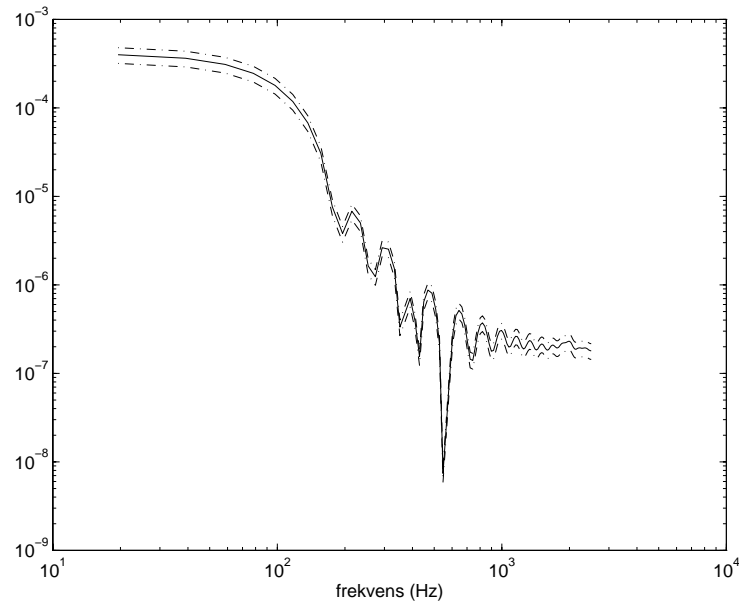
Friktionen är i sig själv ett olinjärt fenomen

P g a den utväxling som finns mellan motoraxel och trottellaxel är inverkan av tröghetskrafterna olika för olika trottellägen.

Lastmomentet beror av trottellvinkeln bl a därför att den skivans effektiva area i luftströmmen varierar med vinkeln. Dessutom beror lastmomentet av motorns varvtal som också varierar med trottellvinkeln. Det finns således inget statiskt samband mellan trottellvinkel och lastmomentet.

3.4 Bandbredd

För att få en uppfattning om systemets bandbredd har en spektralskattning av utsignalen gjorts. Som insignal användes en telegrafsignal d v s en signal som slumpmässigt varierar mellan två nivåer. Telegrafsignalen har energi i ett brett frekvensområde. Fig 3.5 visar resultatet med ett osäkerhetsintervall (streckprickad linje) på tre ggr skattad standardavvikelse. Bandbredden är ca 90 Hz.



Figur 3.5. Skattning av utsignalens spektrum

4 Regulatorutveckling

4.1 Val av PWM-frekvens

Frekvensen hos PWM-signalen kan varieras steglöst i intervallet 10 Hz till 100 000 Hz genom att ändra resistans och kapacitans i en svängningskrets i ställdonet. Jag ställde in den till 2000 Hz eftersom det var denna frekvens som den befintliga regulatorn arbetade med.

4.2 Val av samplingsfrekvens

En tumregel som används när samplingsfrekvensen (f_s) ska väljas är att den bör vara 10-20 gånger större än processens bandbredd [4]. Då erhålls en regulator på vilken man kan använda teori och metoder som gäller för tidskontinuerliga system eftersom effekten av tidsdiskretiseringen blir så liten att den kan försummas. Enligt avsnitt 3.4 är bandbredden ca 90 Hz. Samplingsfrekvensen bör alltså helst vara minst 900 Hz. Vid implementeringen av regulatorerna har dock f_s satts till 500 Hz för att inte överbelasta processorn.

4.3 Regulatorstruktur

4.3.1 Konventionella (linjära) regulatorer

De absolut vanligaste regulatorerna i denna kategori är av typen P-, PD-, PI- och PID. Dessa kan också sägas vara *modellbaserade* eftersom deras struktur bygger på en linjär (differentialekvations-) modell av processen. På grund av att utsignalen störs av luftflödet är det nödvändigt med en integrerande del i regulatorn om stationära fel ska undvikas. P- och PD-regulatorer kan därför direkt uteslutas.

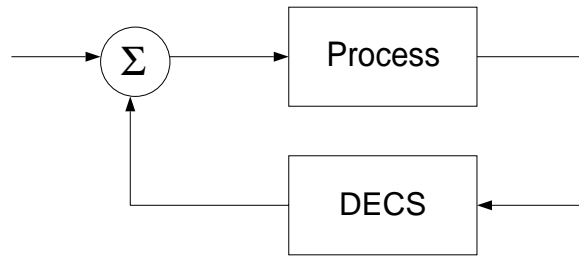
4.3.2 Kunskapsbaserad regulator

Kunskapsbaserade regulatorer grundar sig inte enbart på en analytisk modell av processen utan använder även kunskap som inte så enkelt låter sig uttryckas i matematiska ekvationer. Det kan t ex röra sig om en operatörs handhavande av och kännedom om en viss industriell process. Innan datorerna gjorde sitt intåg var det mycket svårt att bygga in sådan kunskap i ett automatiserat system eftersom regulatorerna implementerades i analoga elektroniska kretsar. Men i dagens programmerbara styrdatorer och mikroprocessorer finns möjligheten att relativt enkelt öka komplexiteten hos regulatorerna. Fuzzy logic är en metod som kan användas för att representera kunskap i ett system.

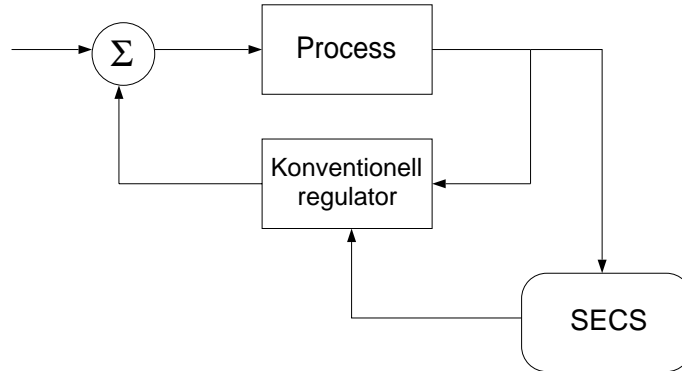
Alternativa strukturer hos kunskapsbaserade regulatorer

Blockstrukturen hos kunskapsbaserade regulatorer kan indelas i två kategorier [1] under följande engelska termer: *direct expert control system* (DECS) och *supervisory expert control system* (SECS). Med DECS utgörs regulatorn helt och hållet av ett kunskapsbaserat system som eventuellt försöker efterlikna en människas manuella styrning av processen. Fig 4.6.

SECS skiljer sig från DECS på så sätt att man här har en konventionell regulator som är kompletterad med ett kunskapsbaserat system. Detta övervakar processen och ändrar eventuellt styrlagen i den konventionella regulatorn. Fig 4.7.



Figur 4.6. Strukturen hos DECS



Figur 4.7. Strukturen hos SECS

I examensarbetet har jag koncentrerat mig på den senare strukturen, SECS, med en PID-regulator i det konventionella blocket. En orsak till att DECS inte är lämplig i detta fall är att trottelnens dynamik är så snabb att en människa inte kan styra trotteln manuellt. Det är därför omöjligt att genom experiment med manuell styrning skaffa sig detaljerad kunskap om hur styrlagarna bör vara utformade. En fördel med SECS är att man kan utgå ifrån kända resultat och metoder som gäller för den typ av konventionella regulator som används.

4.4 Ziegler-Nichols relämetod

En PID-regulator beskrivs av ekvationen

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{d}{dt} e(t)) \quad (4.1)$$

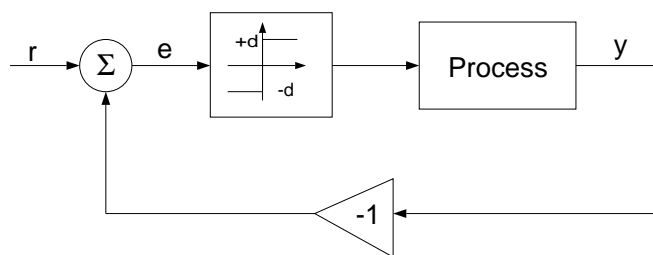
där u är styrsignalen till det reglerade systemet och e är felet definierat av

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.2)$$

Här är y storheten som skall regleras och r är börvärdet. För att finna lämpliga värden på K , T_I och T_D kan någon av Ziegler-Nichols metoder användas. De går ut på att man i något experiment med processen (t ex stegsvar) mäter vissa karaktäristiska värden och med hjälp av dessa beräknar regulatorns parametrar [4, 6]. Den metod jag använder är att återkoppla processen med ett relä [6]. Fig 4.8.

Reläet beskrivs av sambandet

$$u(t) = \begin{cases} -d & \text{om } e < 0 \\ d & \text{om } e > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$



Figur 4.8. Återkoppling med relä

Beroende på reglerfelets tecken antar alltså u antingen värdet $-d$ eller $+d$. Om d är tillräckligt stort börjar systemets utsignal y att svänga med en amplitud A och period T_U . Parametervärdena beräknas sedan enligt tabell 4.1, där K_U fås genom

$$K_U = \frac{4d}{\pi A} \quad (4.4)$$

Regulator	K	T_I	T_D
P	$0.5K_U$		
PI	$0.4K_U$	$0.8T_U$	
PID	$0.6K_U$	$0.5T_U$	$0.12T_U$

Tabell 4.1. Parametervärden enligt relämetoden

4.4.1 Resultat

Tabell 4.2 visar resultaten från ett experiment där trotteln har återkopplats med ett relä. Reläet är implementerat i programvara med samplingsfrekvensen 500 Hz. Olika arbetspunkter ställdes in genom att variera belastningen på bensinmotorn och börvärdet till trotteln. $\bar{\alpha}$ i tabellens första kolumn är medelvärdet av α under oscillationen. Anledningen till att inte större vinklar än 1.6V har studerats är risken för överbelastning i motorn och motorbromsen

$\bar{\alpha}$ [V]	varvtal [rpm]	K_U	T_U [ms]
0.6	1500	3.3	42
0.7	1800	3.1	46
0.8	1000	2.7	43
0.9	1500	4.0	46
0.9	2800	5.9	50
1.0	1700	3.5	48
1.1	1300	3.0	43
1.1	3000	4.9	50
1.3	2000	3.0	46
1.3	2800	4.8	46
1.6	3100	6.0	46

Tabell 4.2. Resultat från reläexperiment

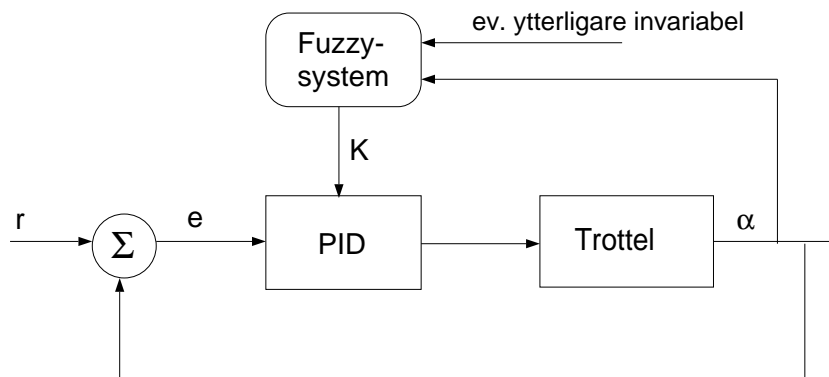
Som synes varierar K_U i intervallet 2.7 till 6.0. T_U har inte lika stor spridning; värdena ligger alla inom 10% från medelvärdet. Resultaten visar att systemets karaktär

är olika beroende på vald arbetspunkt d v s systemet är olinjärt. Detta tyder på att en regulator som på något sätt tar hänsyn till arbetspunkten när styrsignalen beräknas kan ge en bra reglering i ett större arbetsområde. Ett sätt att åstadkomma detta är att införa parameterstyrning i regulatorn.

4.5 Regulator med parameterstyrning

4.5.1 Struktur

Eftersom det enligt Ziegler-Nichols metod är den proportionella delen som varierar mest vill jag göra en regulator där K bestäms av den aktuella arbetspunkten. Med en engelsk term kallas detta *gain scheduling*, på svenska *parameterstyrning*. Funktionen som bestämmer K kan genereras på olika sätt. Jag har valt att använda fuzzy logic. Blockschemat för systemet ser då ut som i fig 4.9. Jämför med fig 4.7. Alternativt hade K -värdena kunnat läsas in ur en tabell.



Figur 4.9. Blockschemat för regulator med fuzzysystem.

4.5.2 Fuzzysystem enligt Sugeno och Takagi

Den typ av fuzzysystem som jag använder är uppkallad efter Sugeno och Takagi som utvecklade den [1]. Ett exempel på hur reglerna i denna variant ser ut visas nedan.

regel #1: if (x_1 is LOW) and (x_2 is LOW) then $u = f_1(x_1, x_2)$

regel #2: if (x_1 is LOW) and (x_2 is HIGH) then $u = f_2(x_1, x_2)$

.

.

regel #N: if ...

Skillnaden mellan denna typ och den "vanliga" är regelkonsekvensernas (then ...) utseende. Sugeno-Takagi använder som regelkonsekvens en funktion (f_1, f_2 osv) av de "skarpa" (d v s ej fuzzifierade) värdena på insignalerna. Normalt ser konsekvenserna ut som t ex

.. then u is LOW

där LOW är en lingvisisk variabel för utsignalen med tillhörande medlemskapsfunktion.

Utsignalen u^* för en viss uppsättning insignalvärden x_1^* och x_2^* beräknas enligt följande: Betrakta den första regeln. Till att börja med beräknas medlemskapsgraderna $\mu_{x_1 LOW}(x_1^*)$ respektive $\mu_{x_2 LOW}(x_2^*)$. Sedan tas minimum av dessa värden;

$$\mu_{u_1} = \min(\mu_{x_1 LOW}(x_1^*), \mu_{x_2 LOW}(x_2^*))$$

Detta värde är ett mått på graden av sanning i villkoret (x_1 is LOW) and (x_2 is LOW). Därefter beräknas f_1^* enligt $f_1^* = f_1(x_1^*, x_2^*)$. När ovanstående upprepats för samtliga regler har man ett talpar (μ_{u_i}, f_i^*) för varje regel. f_i^* kan ses som ett förslag till utsignal från regel nr i och μ_{u_i} är vikten som detta förslag ska tillmätas. Till slut fås utsignalen u^* som det viktade medelvärdet av f_i^* :

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{u_i} \cdot f_i^*}{\sum_{i=1}^N \mu_{u_i}} \quad (4.5)$$

Skillnaden mellan Sugeno-Takagi och "vanlig" fuzzy-logic (vilken i Matlabs Fuzzy Toolbox [5] benämnes Mamdani) är alltså att det inte finns några medlemskapsfunktioner för utsignalen. Om funktionerna f_i sätts till konstanter blir det färre parametrar att bestämma jämfört med om medlemskapsfunktioner skulle valts. En annan fördel med Sugeno-Takagis variant är att det krävs mindre beräkningsarbete när utsignalen bestäms. Korta beräkningstider är bra när fuzzysystemet ska integreras i en regulator så att tiden mellan inläsning av mätvärden och utställandet av styrsignalen blir så kort som möjligt.

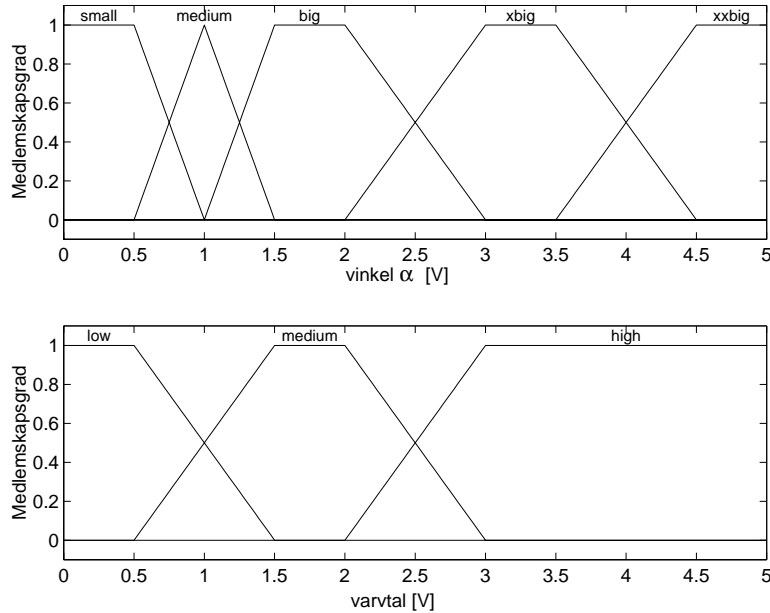
4.5.3 Val av invariabler

Vilka storheter ska vara invariabler till funktionen som beräknar K ? Utsignalen α är ett naturligt val eftersom trottelskivans effektiva area i luftströmmen (och därmed lastmomentet) beror på vinkelläget. Eventuellt skulle det kunna räcka med α som invariabel men enligt Ziegler-Nichols-experimentet har också varvtalet betydelse för parametervärdet. Förklaringen till detta är att luftflödet förbi trotteln (vid konstant trottelvinkel) beror av varvtalet. Fysikaliskt sett är det luftflödet (eller mer exakt tryckfördelningen kring trottelskivan) som är direkt orsak till lastmomentet på trotteln. Det finns mätgivare för luftflödet och trycket i insugningsröret så någon av dessa skulle kunna tas som insignal efter att eventuellt ha filtrerats (medelvärdesbildning). Jag väljer dock att ha varvtalet som invariabel av följande skäl

- varvtalssignalen är direkt tillgänglig på en av styrdatorns inportar
- enkel att läsa av på visarinstrument vid experiment
- kräver ingen signalbehandling

4.5.4 Medlemskapsfunktioner

Eftersom fuzzysystemet är av typen Sugeno-Takagi (se avsnitt 4.5.2) behöver medlemskapsfunktioner definieras endast för insignalerna, ej för utsignalen. För enkelhets skull



Figur 4.10. Medlemskapsfunktioner

väljs triangulära och trapetsformade medlemskapsfunktioner. Uppläggnen av medlemskapsfunktionerna (antal och utseende) avgör hur väl man kan anpassa utsignalen till den önskade. Fig 4.10 visar hur medlemskapsfunktionerna slutgiltigt kom att se ut efter vissa justeringar. För α gäller att 0V motsvarar stängd trottel och 4.5V öppen. Varvtalsignalens spänning är varvtalet (i varv/min) dividerat med 1000. Motorvarvtalet är begränsat till 5000 varv/min.

4.5.5 Anpassning till mätdata

Utsignalen K från fuzzysystemet är en funktion av två variabler d v s det är en yta i ett tredimensionellt rum. Exakt hur denna yta ska formas för att ge bästa möjliga reglering i hela arbetsområdet är naturligtvis omöjligt att veta. Det vi har att utgå ifrån är värdena enligt Ziegler-Nichols relämetod i tabell 4.2. Denna ger dock ingen information för vinklar i området över 1.6V. Ytans utseende måste här väljas utifrån följande teoretiska resonemang: När trotteln är helt öppen är skivan parallell med luftflödet. Då bildas inte något stängande moment. I ändläget bör därför ett lämpligt K -värde vara ungefär samma som om inget luftflöde fanns. Ett experiment (Ziegler-Nichols metod) och manuell trimning när motorn ej är igång (inget luftflöde) visar att förstärkningen för en obelastad trottel bör vara ca 0.7. Detta är anledningen till att ytan har randvärdet 0.7 för maximal vinkel.

De medel man har till förfogande för att forma ytan är följande

- antalet regler
- villkor och konsekvenser i reglerna
- medlemskapsfunktionernas antal och utformning

Det finns inga instruktioner att gå efter om man vill åstadkomma en viss förändring i ytan utan man får använda sitt förnuft och prova sig fram. Några enkla samband finns dock t ex att antalet regler och medlemskapsfunktioner påverkar noggrannheten (upplösningen) i funktionsytan. Den regelbas som jag efter testning och trimning kommit fram till presenteras nedan.

```

- - - - - villkor - - - - - - - konsekvens -
1. If (vinkel is small) and (varvtal is low) then (k is xs)
2. If (vinkel is small and (varvtal is medium) then (k is s)
3. If (vinkel is small) and (varvtal is high) then (k is m)
4. If (vinkel is medium) and (varvtal is low) then (k is xs)
5. If (vinkel is medium) and (varvtal is medium) then (k is m)
6. If (vinkel is medium) and (varvtal is high) then (k is m)
7. If (vinkel is big) and (varvtal is low) then (k is xs)
8. If (vinkel is big) and (varvtal is medium) then (k is m)
9. If (vinkel is big) and (varvtal is high) then (k is b)
10. If (vinkel is xbig) and (varvtal is low) then (k is xs)
11. If (vinkel is xbig) and (varvtal is medium) then (k is s)
12. If (vinkel is xbig) and (varvtal is high) then (k is m)
13. If (vinkel is xxbig) then (k is xs)

```

Regelkonsekvensernas beteckningar xs, s, m och b står för de konstanter (konstanta funktioner) som jag använder. Konstanternas värden sattes efter några tester och justeringar till

```

xs = 0.7 ( extra small )
s  = 1.4 ( small )
m  = 2.2 ( medium )
b  = 3.0 ( big )

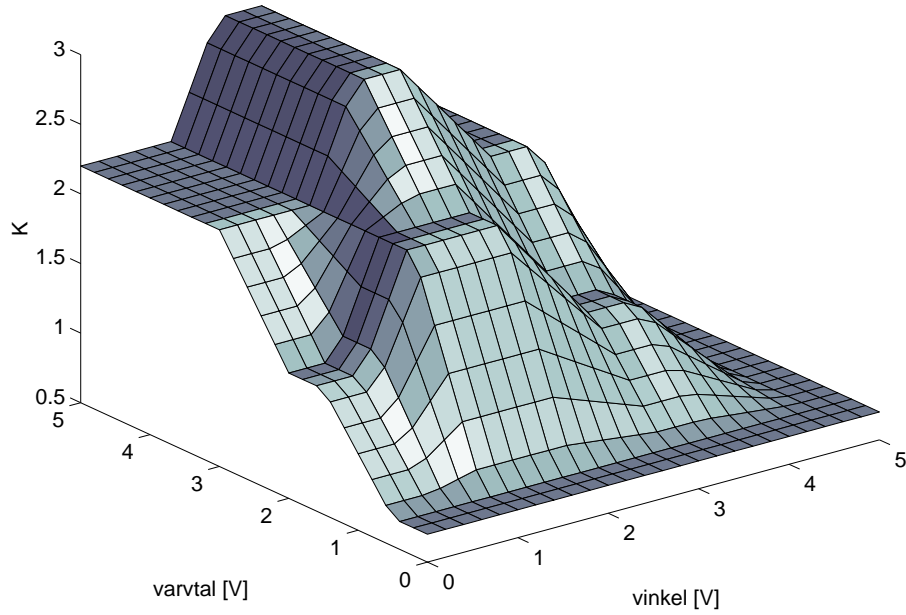
```

I tabell 4.3 visas regelbasen på ett kanske mer överskådligt sätt.

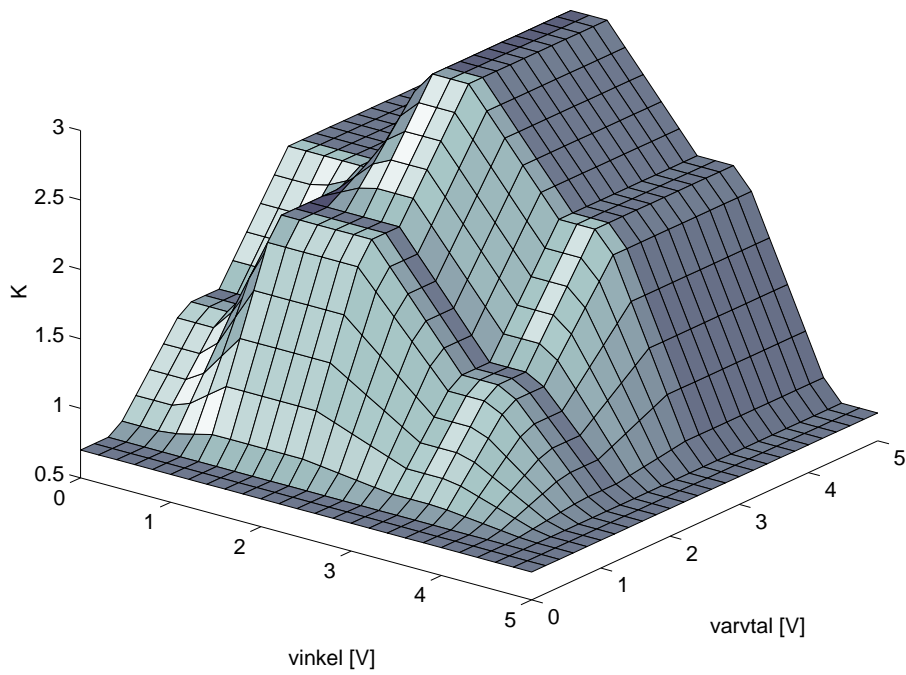
varvtal	vinkel				
	SMALL	MEDIUM	BIG	XBIG	XXBIG
LOW	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
MEDIUM	1.4	2.2	2.2	1.4	
HIGH	2.2	2.2	3.0	2.2	

Tabell 4.3. Regelbas. (K-värden för kombinationer av vinkel och varvtal)

Den funktionsyta som blir resultatet av ovanstående medlemskapsindelning och regelbas visas i fig 4.11. Fig 4.12 visar ytan ur en annan vinkel.



Figur 4.11. K som funktion av trottelvinkel och motorvarvtal



Figur 4.12. K som funktion av trottelvinkel och motorvarvtal

4.6 Implementering

I en av labbets datorer finns ett realtidssystem som utför parallell exekvering av t ex styrprogram till motorn. Programspråket är C. Matlabs toolbox för fuzzy logic har ett fristående C-program som fritt får användas i egna tillämpningar. Programmet tar insignalernas värden och beräknar utsignalen från ett fuzzysystem. Den fristående koden anropas som funktioner och procedurer i regulatorkoden. Det kan t ex se ut så här:

```
.
.
/* initiering */

    /* obtain FIS matrix (Fuzzy Inference System) */
    fis_file='kfuz4.fis';
    fisMatrix = returnFismatrix(fis_file, &fis_row_n, &fis_col_n);

    /* build FIS data structure */
    fis = (FIS *)calloc(1, sizeof(FIS)); /
    fisBuildFisNode(fis, fisMatrix, fis_col_n);
.
.

/* regulatorloop */
.
.
inputArray[0]=y;          /* trottelvinkel */
inputarray[1]=speed;     /* motorvarvtal */
getFisOutput(inputArray,fis,outputValue);    /* beräkning av K */
K=outputValue[0];       /*
.
.
/* slut regulatorloop */
```

Inparametern `fis_file` till funktionen `returnFismatrix` innehåller namnet på en textfil som lagrar all information om fuzzysystemet såsom antal in- och utsignaler, medlemskapsfunktioner, regler o.s.v. Det är samma fil som Matlab använder för att representera fuzzysystem (`fis = fuzzy inference system`) och den genereras således direkt vid utvecklingen av systemet.

Tack vare tillgången till färdig C-kod blev det mycket enkelt att bygga in fuzzylogicblocket i regulatorn.

4.7 Resultat från experiment

För att utvärdera regulatorns egenskaper studeras stegsvaren i olika arbetspunkter. Experimenten gjordes med en varvtalsregulator inkopplad till motorn eftersom det då är möjligt att göra större steg på trottelvinkeln. Varvtalet regleras med en motorbroms (generator). Tyvärr finns det en korskoppling, ett ömsesidigt beroende mellan trottelvinkel och varvtal. Självlkär ändras varvtalet om trottelvinkeln ändras men det

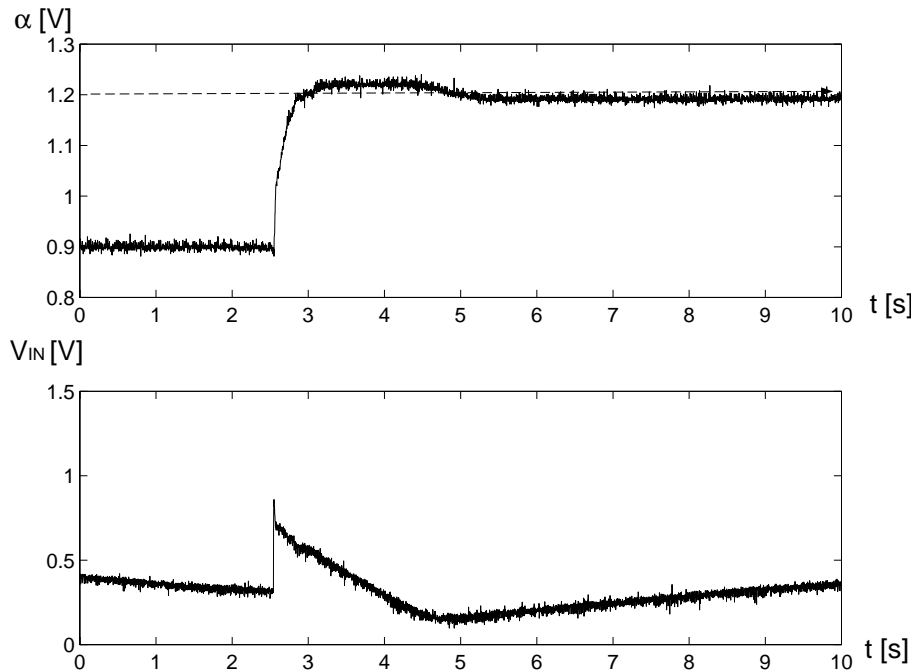
omvända gäller också. Detta gör att det finns en risk att de två regulatorerna hamnar i motfas till varandra så att svängningar uppstår.

Följande parametervärden användes vid försöken:

$$T_I = 0.2s$$

$$T_D = 0.004s$$

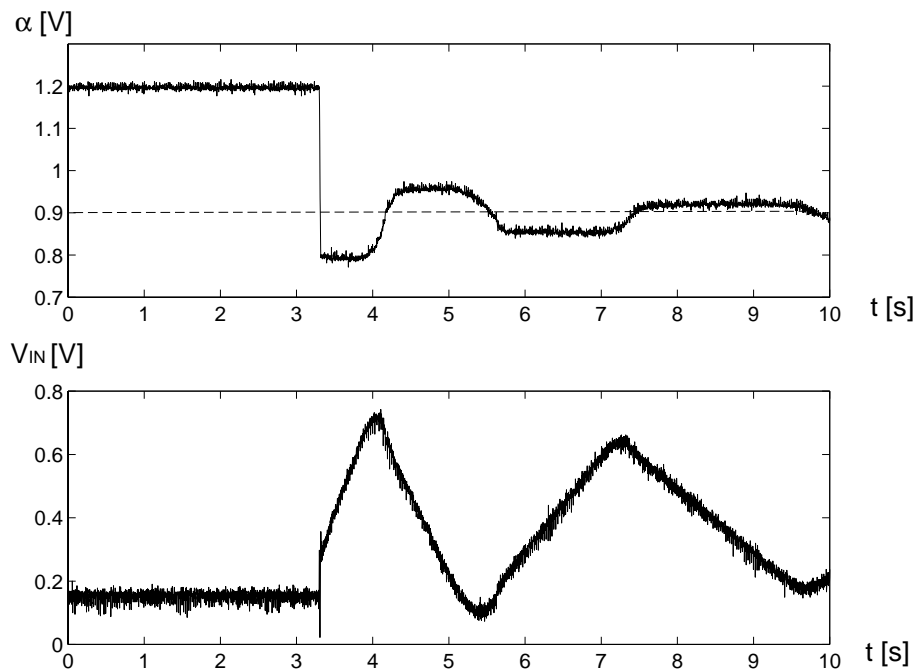
Dessa valdes utifrån Ziegler-Nichols metod (avsnitt 4.4) men har justerats under inledande trimning. Den fuzzyfunktion som användes är den som beskrivs i avsnitt 4.5 och PWM-frekvensen är 2000 Hz. 14 stegsvar mättes och nedan presenteras fyra av dem.



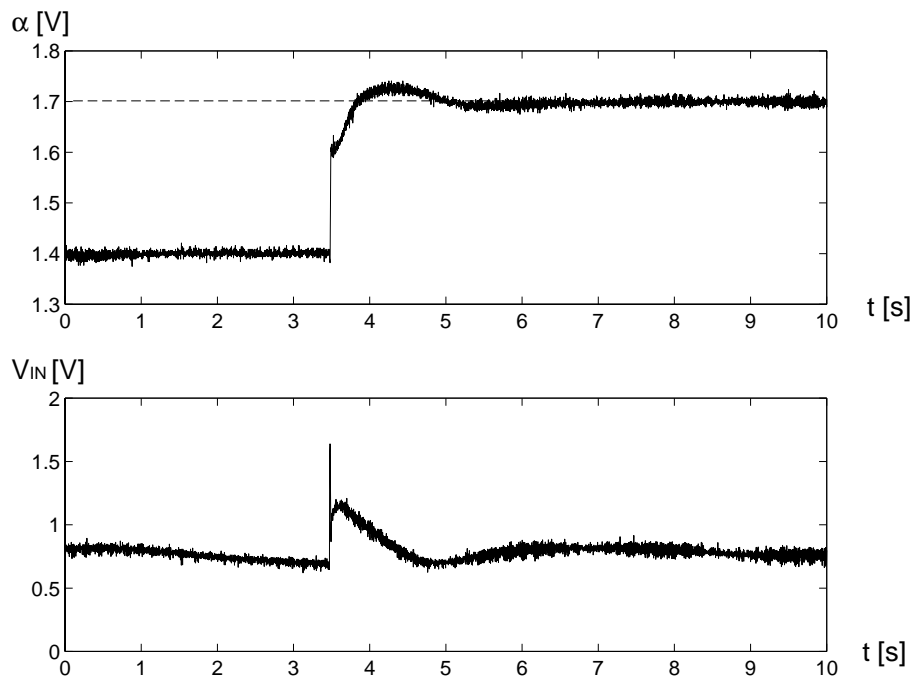
Figur 4.13. Stegsvär vid 1000 varv/min.

I fig 4.13 och 4.14 visas stegsvaren vid 1000 varv/min, den första visar ett öppnande steg och den andra ett stängande. Speciellt i fig 4.14 framgår tydligt att trotteln fastnar på en nivå under en tid och sedan lossnar och slår över till “andra sidan” om börvärdet. Detta uppträdande kallas med en engelsk term för “hunting” och beror på friktionen i bl a axellager. När skivan är still krävs ett relativt stort moment för att övervinna den statiska friktionen. Integrationsdelen i regulatorn ökar styrsignalen (se fig 4.14) och därmed momentet tills skivan lossnar. Eftersom det tar tid att minska momentet hinner trotteln slå över till andra sidan börvärdet där den eventuellt fastnar på nytt. Ett sådant beteende är naturligtvis inte önskvärt och problemet kan minskas vilket visas i avsnitt 4.8.

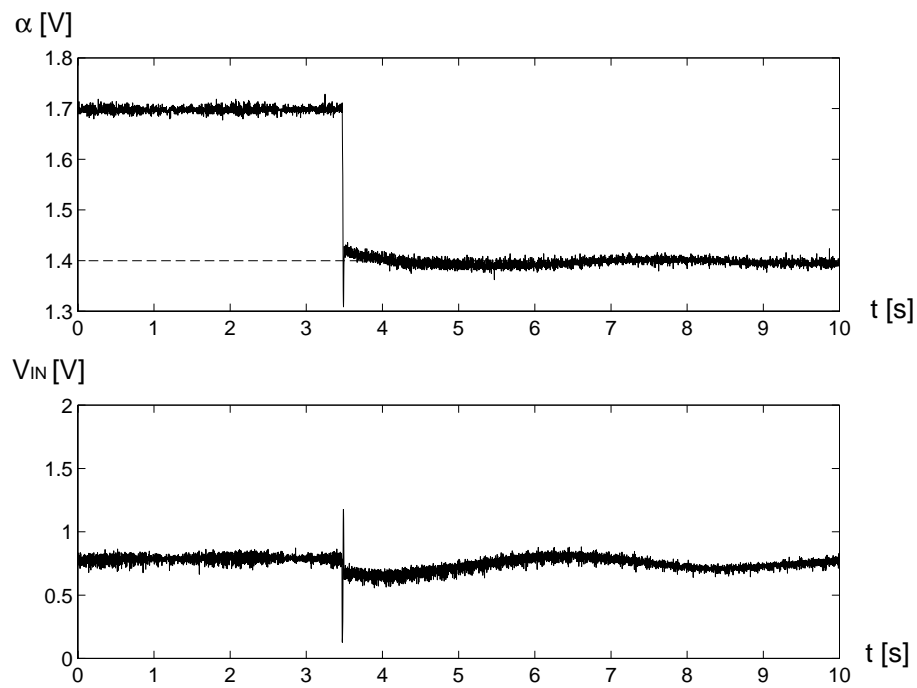
I fig 4.15 och 4.16 visas stegsvaren vid 4000 varv/min. Här är huntingeffekten inte lika markant vilket kan bero på att tryckvariationerna i insugningsröret är större vid höga varvtal. Trycket svänger i takt med att ventilerna till cylindrarna öppnas och luft sugas in. Dessa svängningar hjälper troligen till att rycka loss trotteln.



Figur 4.14. Stegsvär vid 1000 varv/min.



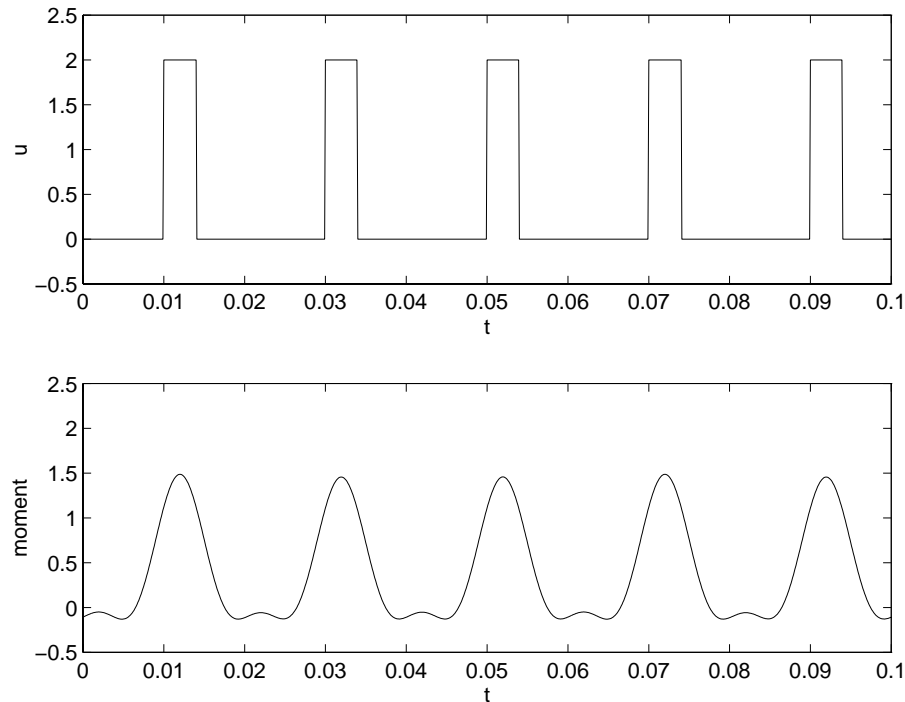
Figur 4.15. Stegsvär vid 4000 varv/min.



Figur 4.16. Stegsvär vid 4000 varv/min.

4.8 Reglering med lägre PWM-frekvens

Frekvensen hos PWM-signalen som driver DC-motorn påverkar regleringen på olika sätt. Man kan betrakta DC-motorn som ett lågpasfilter med pulståget som insignal och momentet M_1 som utsignal. Låg PWM-frekvens gör att M_1 varierar med samma frekvens, se fig 4.17. Figurens signaler är konstruerade (ej uppmätta) och visar det principiella beteendet.



Figur 4.17. Moment (M_1) vid låg PWM-frekvens

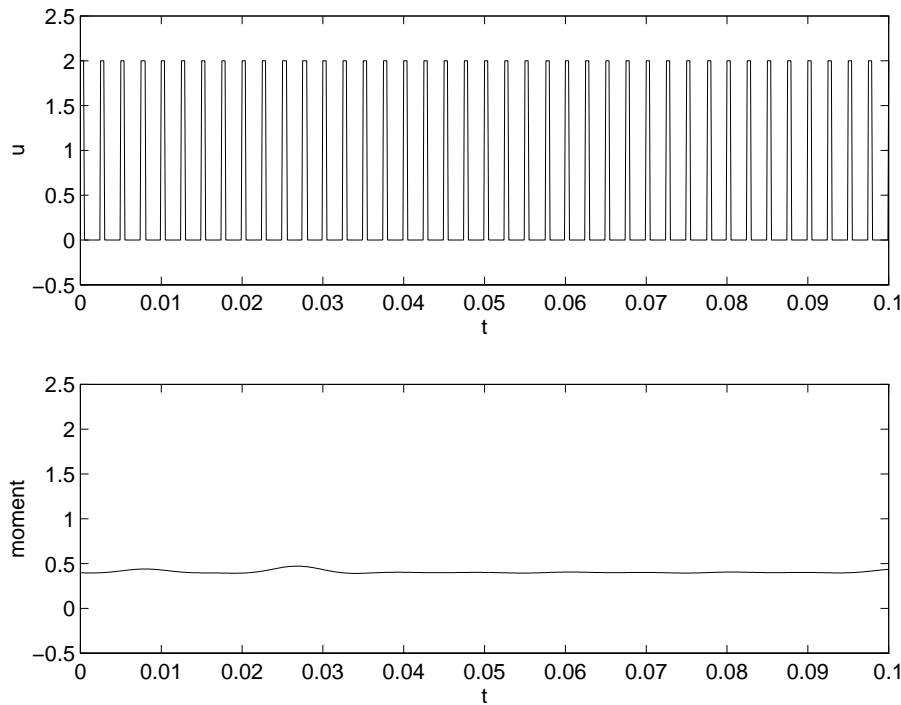
En hög PWM-frekvens släpps däremot inte igenom utan momentet M_1 'smetas ut' på en nivå proportionell mot medelenergin i PWM-signalen. Fig 4.18.

Det pulserande momentet som erhålls vid låg PWM-frekvens kan utnyttjas för få trotteln att övervinna den statiska friktionen vid en lägre nivå på signalen V_{IN} . Varje momentpuls är en liten knuff på trotteln. Om frekvensen ställs in så att en puls nästan knuffar loss trotteln från den statiska friktionen, så behövs endast en liten ändring av V_{IN} för att skivan verkligen ska börja röra sig. Ett exempel: Antag att det krävs ett moment motsvarande 1.5 i figur 4.17 och 4.18 för att övervinna friktionen vid stillastående. I båda figurerna är T_d 20% av periodtiden d v s V_{IN} ligger på samma nivå, men frekvensen är högre i fig 4.18. För den lägre frekvensen ligger momenttopparna just vid 1.5 medan momentet för den höga frekvensen ligger på medelnivån 0.4. Här måste alltså T_d ökas upp till minst 75% av periodtiden för att momentet ska komma upp till 1.5.

Detta sätt att låta styrsignalen pulsera kallas med en engelsk term för *dithering*. Man kan visa [2] att man med denna teknik kan linjärisera ett system som har vissa typer av olinjäriteter inbyggda.

I ett försök undersöktes för några frekvenser, vid vilken nivå på V_{IN} som friktionen övervinns och trotteln "lossnar". Tabell 4.4 visar resultatet från detta försök.

Vid frekvensen 50 Hz rör sig trotteln även om insignalen är noll. Förklaringen till



Figur 4.18. Moment (M_1) vid hög PWM-frekvens

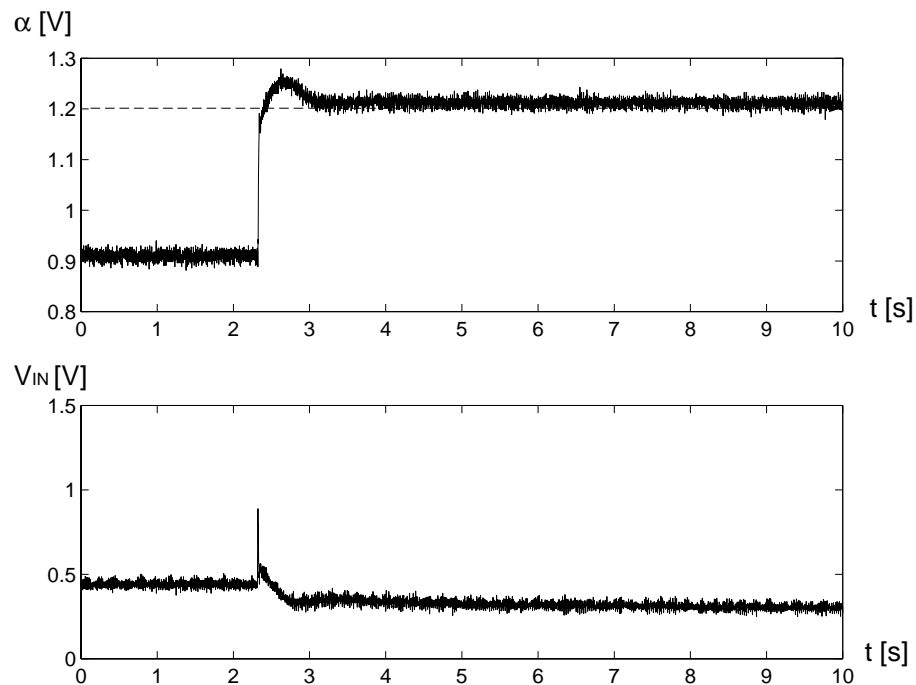
frekvens [Hz]	V_{IN} [V]	procent av max V_{IN}
2000	0,35	14%
500	0,2	8%
200	0,02	1%
50	0	0%

Tabell 4.4. PWM-frekvensens betydelse för den nivå på V_{IN} som krävs för trotteln ska börja röra sig från stillastående

detta är att ställdonet genererar pulser även om ingången jordas och för låga frekvenser har pulserna tillräckligt stor energi för att övervinna friktionen. Sett från V_{IN} finns det alltså ingen statisk friktion. Med en tillräckligt låg PWM-frekvens bör således huntingproblemet (se 4.7) kunna undvikas eftersom inte V_{IN} behöver integreras upp till så hög nivå för att trotteln skall lossna. Tyvärr finns i valet av PWM-frekvens en konflikt med regleringens prestanda. På grund av PWM-signalens periodiska karaktär blir det en tidsfördröjning mellan det att V_{IN} ändras tills detta märks i u . Tidsfördröjningens längd beror på när under PWM-perioden som V_{IN} ändras. Eftersom PWM-frekvensen och samplingsstidpunkterna inte är synkroniserade varierar tidsfördröjningen i intervallet 0 till T_p sekunder. T_p är PWM-signalens periodtid. Med en låg PWM-frekvens blir det alltså vanligt med långa fördröjningar vilket påverkar regleringen negativt. I det fortsatta arbetet valde jag PWM-frekvensen 200 Hz som jag antog vara tillräckligt låg för att problemet med "hunting" skulle minska.

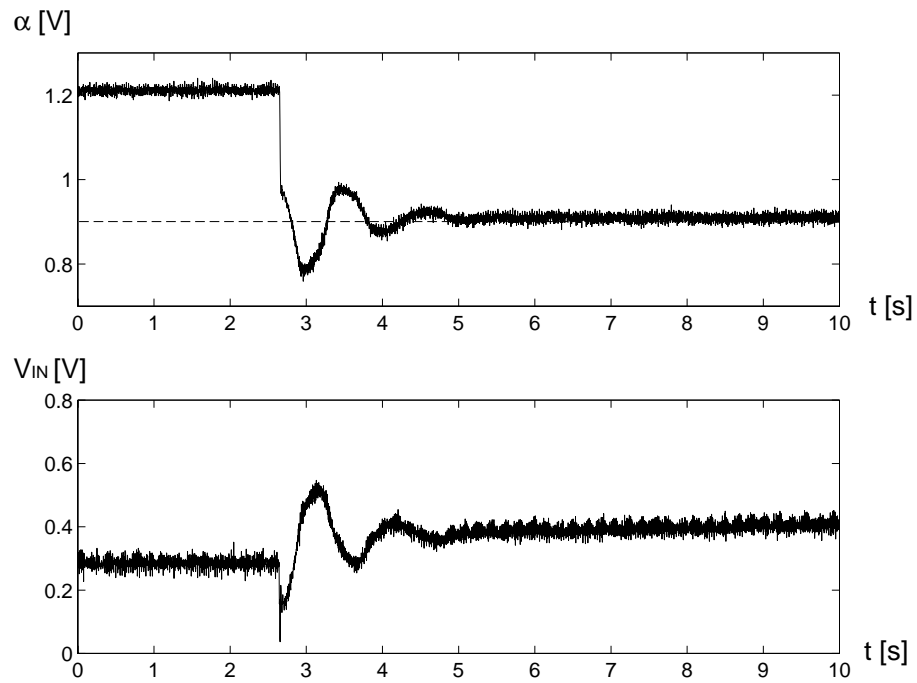
4.8.1 Resultat från experiment

Förutsättningarna för försöken med PWM-frekvensen satt till 200Hz är desamma som de med 2000Hz (avsnitt 4.7). I fig 4.19 och 4.20 visas stegsvaren vid 1000 varv/min. Arbetspunkten är samma som i fig 4.13 och 4.14. Insvängningen sker nu utan att trotteln fastnar i långa perioder. Skillnaden i styrsignalen här jämfört med den vid PWM-frekvensen 2000Hz är också tydlig. Det krävs inte lika hög styrsignal för att få trotteln att röra sig. Överslängningen är ganska stor men troligen orsakas svängigheten av varvtalsregleringen som kan hamna i motfas mot trotteln. I fig 4.21 och 4.22 visas stegsvaren vid 4000 varv/min. Även här (4.22) blir det en översläng men den är betydligt snabbare, ungefär en hundradels sekund (den smala spiken ner mot 1.3V). Denna översläng skulle kanske kunna minskas genom att ändra parameterstyrningen i trotteln. Ett problem i detta sammanhang är dock luftflödet som vill stänga trotteln. Detta medför att ett stängande steg får "hjälp" av luften så att en översläng lätt uppstår medan ett öppnande steg bromsas av luften. En vidareutveckling av regulatorn skulle därför kunna bestå i att ta hänsyn till reglerfelets tecken d v s om trotteln ska öppnas eller stängas.

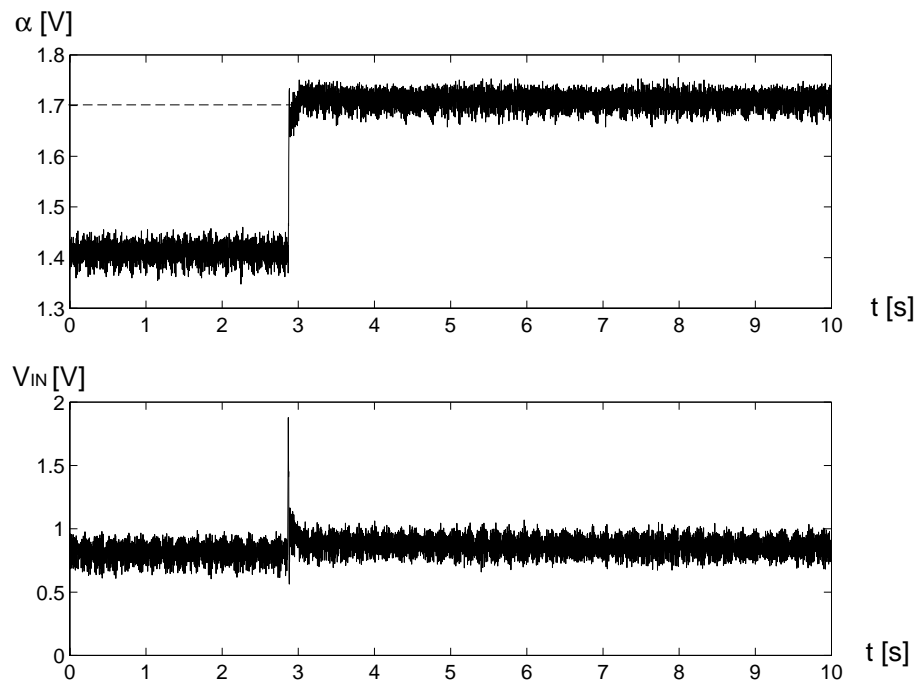


Figur 4.19. Stegsvär vid 1000 varv/min.

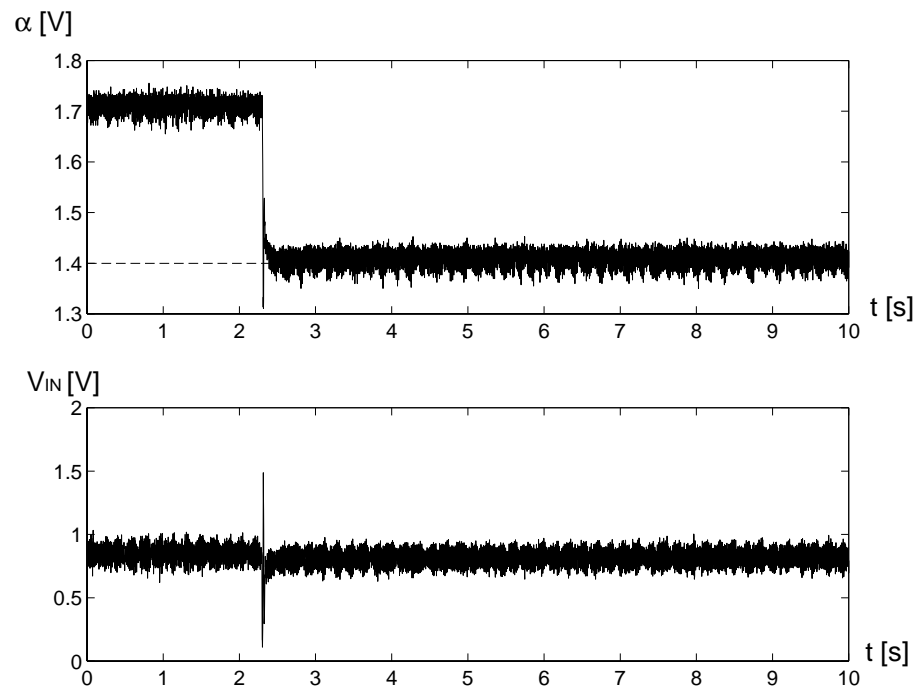
En jämförelse med stegsvaren vid hög PWM-frekvens visar också att signalerna nu är brusigare. En möjlig orsak till detta är det pulserande drivande momentet (se avsnitt 4.8).



Figur 4.20. Stegsvär vid 1000 varv/min.



Figur 4.21. Stegsvär vid 4000 varv/min.



Figur 4.22. Stegsvär vid 4000 varv/min.

5 Slutsatser

Vid regulatordesignen används Ziegler-Nichols relämetod för att finna lämpliga parametervärden. Metoden visade sig vara ett något trubbigt instrument när det gäller att bestämma integrationstiden T_I . För att få god stabilitet krävs ett T_I som är ca tio ggr större än det som experimentet gav. De erhållna värdena på K behövde inte justeras lika mycket vid intrimningen.

Regulatorns struktur är av typen PID med parameterstyrning som implementeras mha fuzzy logic. Ett antagligen enklare och smidigare alternativ hade varit att läsa K -parametern i en tabell som konstruerats för hand direkt ur insamlade data. Svårigheten här bestod i att anpassa en fuzzy-funktion till numeriska data och det är just tillgången till data som gör att man så att säga går över ån efter vatten när fuzzy-logic används. Det är mycket möjligt att det i en annan typ av regulator till trotteln hade varit mer motiverat med fuzzy control t ex en regulator med ytterligare intelligens inbyggd.

Ett problem som kan uppstå när ett mekaniskt system regleras är så kallad hunting. I examensarbetet visas att huntingeffekten minskar om momentet som läggs på trotteln pulserar (dithering). Detta åstadkommes genom att driva DC-motorn med en pulsbreddsmodulerad signal. Denna får dock inte ha för hög frekvens eftersom DC-motorn fungerar som ett lågpasfilter och inte kan överföra snabba variationer i spänning till snabba variationer i moment. Tyvärr finns här en konflikt mellan olika önskemål på regleringen. PWM-frekvensen sätter i praktiken gränsen för den takt med vilken styrsignalen (momentet) kan uppdateras. Om PWM-frekvensen är mycket lägre än önskad samplingsfrekvens så blir regleringen långsammare.

6 Utvidgningar

Ett naturligt mål för fortsatt arbete är att öka regulatorns prestanda genom att inrikta sig på tidsoptimal reglering. På grund av systemets olinjära karaktär måste en regulator, för att verkligen bli tidsoptimal i hela arbetsområdet, ta hänsyn inte bara till felet och dess derivata utan även till aktuellt vinkelläge och hela motorns arbetspunkt.

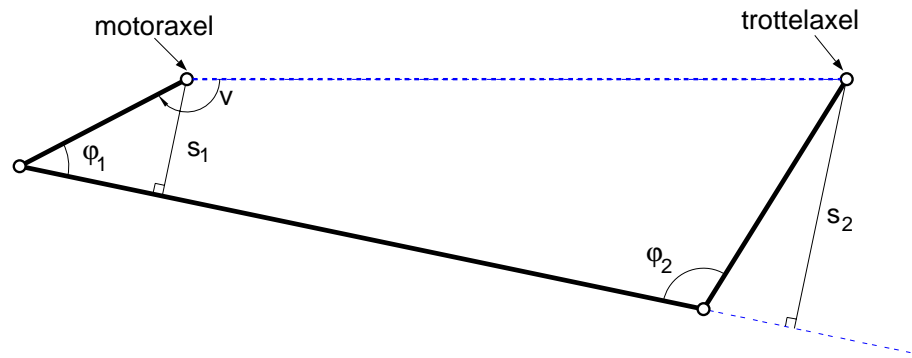
För att kunna genomföra detta krävs eventuellt en bra modell av trotteln och störningarna som verkar på den. För trotteln bör en skräddarsydd fysikalisk modell kunna tas fram medan störningarna nog enklast modelleras med hjälp av black-boxidentifiering.

Intressant kunde också vara att angripa huntingproblemet på ett annat sätt. I styrlagarna bör man kunna detektera att trotteln sitter fast och då snabbt ge kraftiga pulser så att den knackas loss. När skivan fått upp farten kan man återgå till normal styrsignal, d v s ej oscillerande. På detta sätt löses konflikten mellan PWM-frekvens och regulatorns snabbhet samtidigt som slitage på grund av vibrationer minskas. DC-motorn skulle fortfarande kunna drivas med en pulsbreddsmodulerad spänning (billig och enkel teknik) men med en tillräckligt hög frekvens.

Referenser

- [1] D. Driankov et al. *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer-Verlag, 1993.
- [2] S. T. Glad. *Nonlinear Control Theory*. LiTH-ISY-R-1686. Institutionen för Systemteknik, Linköpings Universitet, 1994.
- [3] H. Streib och H. Bischof. *Electronic Throttle Control : A Cost Effective System for Improved Emissions, Fuel Economy, and Driveability*. SAE paper (960338), 1996.
- [4] T. Glad och L. Ljung. *Reglerteknik. Grundläggande teori*. Studentlitteratur, Lund, Sverige, 1989.
- [5] J.-S. Roger Jang och N. Gulley. *Fuzzy Logic Toolbox*. The MathWorks, Inc, 1995.
- [6] K.J Åström och B. Wittenmark. *Adaptive Control*. Addison-Wesley, 1989.

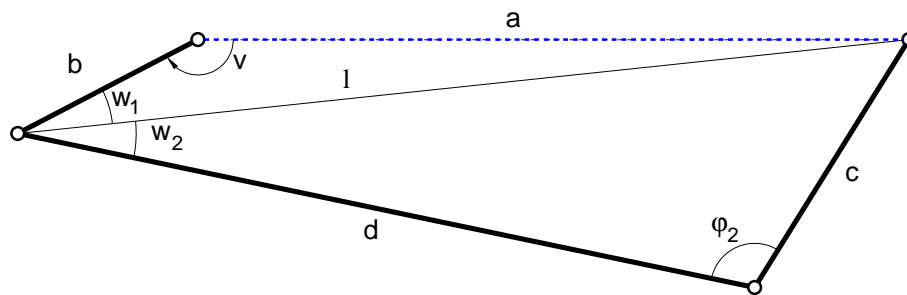
Bilaga A: Beräkning av momentutväxling



Utväxlingsförhållandet mellan momentet på DC-motoraxeln (M) och momentet på trottelaxeln (M_t) betecknar jag med q som definieras

$$q = \frac{M_t}{M} = \frac{s_2}{s_1} \quad (\text{A.1})$$

där s_1 och s_2 är det vinkelräta avståndet mellan staget och respektive axel. Utväxlingen beror av vinkelläget v och ett sätt att bestämma denna funktion visas nedan.



Trigonometriska samband ger

$$q = \frac{s_2}{s_1} = \frac{c \sin \varphi_2}{b \sin \varphi_1} = \frac{c \sin \varphi_2}{b \sin(w_1 + w_2)} \quad (\text{A.2})$$

Med hjälp av cosinussatsen för trianglar fås följande samband:

$$l^2 = c^2 + d^2 - 2cd \cos \varphi_2 \quad (\text{A.3})$$

$$a^2 = b^2 + l^2 - 2bl \cos w_1 \quad (\text{A.4})$$

$$c^2 = d^2 + l^2 - 2dl \cos w_2 \quad (\text{A.5})$$

Lös ut φ_2 , w_1 och w_2 ur sambanden och sätt in i A.2:

$$q = \frac{c \sin(\arccos(\frac{1}{2cd}(c^2 + d^2 - l^2)))}{b \sin(\arccos(\frac{1}{2bl}(b^2 + l^2 - a^2)) + \arccos(\frac{1}{2dl}(d^2 + l^2 - c^2)))} \quad (\text{A.6})$$

l beräknas med cosinussatsen:

$$l^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos v \quad (\text{A.7})$$

Substitution av l i ekv. A.6 ger q som funktion av v .

Intervall som v kan röra sig inom går från ca 35° (öppen trottel) till ca 185° (stängd trottel). Avstånden a , b , c , och d har mätts ungefärligt (noggrannhet ± 1 mm) till följande värden:

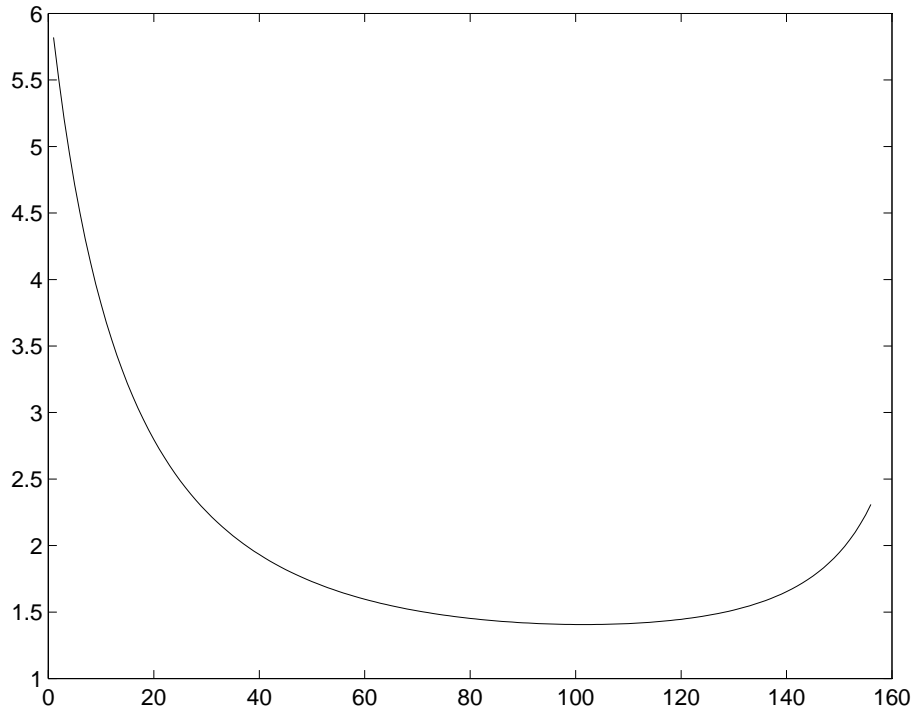
$$a = 56 \text{ mm}$$

$$b = 16 \text{ mm}$$

$$c = 23 \text{ mm}$$

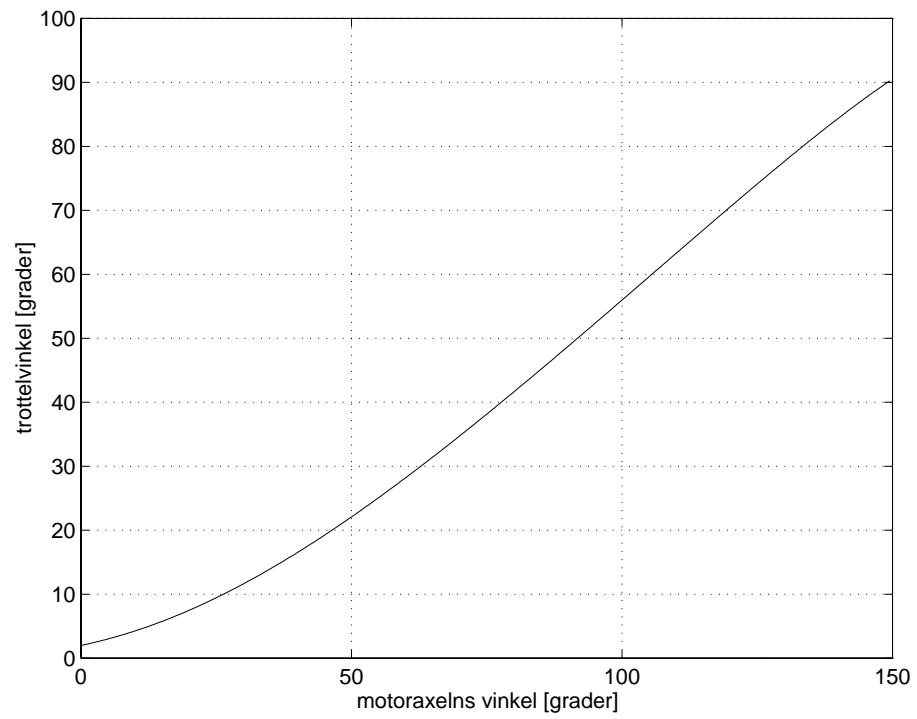
$$d = 60 \text{ mm}$$

Funktionen visas i fig A.1 med v skiftad till intervallet 0 till 150 grader.



Figur A.1. Utväxling som funktion av v .

Med hjälp av samma ekvationer samt det faktum att summan av vinklarna i en fyrhörning är 360° kan sambandet mellan motoraxelns och trottelaxelns vinkel bestämmas. I fig A.2 visas detta samband. Trottelvinkeln anges här i förhållande till ett plan vinkelrätt mot insugningsrörets längdriktning. Även här är motoraxelns vinkel skiftad till att börja vid 0° .



Figur A.2. Samband mellan motoraxelns vinkel och trottelvinkel.