

CHALMERS



Modellering av mekatroniksystem för spjällstyrning Modelling of a mechatronic system for valve control

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Mekatronik

Anton Bondesson
Fredrik Johansson

Institutionen för signaler och system
Avdelningen för Reglerteknik, Automation och Mekatronik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2013

Modellering av mekatroniksystem för spjällstyrning

Modelling of a mechatronic system for valve control

Anton Bondesson
Fredrik Johansson

Institutionen för signaler och system
Avdelningen för Reglerteknik, Automation och Mekatronik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2013

Förord

På mekatronikprogrammet vid Chalmers tekniska högskola genomförs i slutet av utbildningen ett examensarbete. Mekatronikprogrammet är en treårig högskoleutbildning på 180 Hp. En utbildning som ger en bred teknisk bas. Examensarbetet ska genomföras på ett företag och omfattar 10 veckors heltidsjobb om 15 högskolepoäng. Detta arbete är genomfört åt Volvo Car Corporation i samarbete med ÅF som förmedlade uppgiften. Arbetet är skrivet för institutionen signaler och system där Bertil Thomas är examinator. Den mesta av tiden har varit förlagd ute på Volvo där tillgång till eget skrivbord och dator har getts. Mätningar har framför allt genomförts i Chalmers lokaler på Lindholmen och med Chalmers mätutrustning.

Under arbetets gång har många varit behjälpliga för frågor och vägledning. Därmed vill vi ge ett särskilt tack till följande personer.

- Thomas Vidjeskog, var den stora länken till examensarbetets tillkomst.
- Jonas Jange, för handledning från Volvo.
- Göran Hult, för handledning från Chalmers.
- Juan Sagarduy, för hjälp med simuleringsmodeller och verktyget Simscape.
- Morgan Osbeck, för hjälp med mätningar och diskussioner om stegmotor.

Anton Bondesson & Fredrik Johansson

Göteborg juni 2013

Sammanfattning

Volvo Car Corporation använder aktuatorer bestående av stegmotor och växellåda för att styra spjäll i bilarnas klimatanläggning. Volvo har från Mathworks fått en simuleringsmodell av en stegmotor med tillhörande växellåda med last. Modellen var konstruerad i simuleringsverktyget Simulink med block från Simscape och SimElectronics. Detta var en allmän modell bestående av de vanligaste parametrarna hos en stegmotor. Volvo önskade att denna modell skulle vidareutvecklas och verifieras för att kunna användas vid framtida simuleringar av stegmotorbaserade aktuatorer i bilarnas klimatanläggningar. Det som ansågs mest intressant var att kunna simulera hur aktuatoren uppförde sig då ett spjäll gick in i ett ändläge. Tanken var att i framtiden kunna vidareutveckla modellen för allt större simuleringar avseende hela klimatanläggningen. I detta arbete är fokus på att kunna simulera enbart aktuatoren med linjära laster, utan friktion eller hänsyn till luftmotstånd. Inledningsvis genomfördes ett flertal tester för att lära känna aktuatoren och dess beteende. Genom att montera isär aktuatoren och studera den grundligt kunde diverse mätningar genomföras för att få ut de parametrar som krävdes för simulering. Efter att ha mätt upp parametrar och genomfört simuleringar identifierades ett antal utvecklingsområden. Dessa studerades närmare och resulterade i att några av de ursprungliga block som användes byggdes om för att modellen bättre skulle överensstämma med verkligheten. Bland annat byggdes ett block för att identifiera ett ändläge genom att studera strömmen genom stegmotorns lindningar. Även ett block för styrning av stegmotoren byggdes då den ska bli spänningslös efter slutförd körning. Efter vidareutveckling av block till modellen kopplades dessa samman till en ny simuleringsmodell. Graferna som har erhållits efter simulering är trovärdiga enligt känd karakteristik för stegmotorer och enligt de erfarenheter som dragits efter mätningar och testkörningar. Dock är resultaten inte helt korrekta då inre friktion kommer påverka aktuatorns prestanda, friktion har dock inte behandlats i detta arbete.

Nyckelord: Stegmotor, Simscape, HVAC,

Abstract

Volvo Car Corporation utilizes actuators consisting of a stepper motor and a gearbox to control valves in the climate control system in their cars. Mathworks has provided Volvo with a simulation model of a stepper motor with a gearbox and a load. This model is constructed with the simulation tool Simulink using blocks from the toolboxes Simscape and SimElectronics. This was a universal model of a stepper motor consisting of the common parameters of a stepper motor. However Volvo wanted to customize this model to fit their needs and to enable future simulations together with the other components of the climate control system. In particular the case when the valve reaches the end position was of interest. This work has been focused on simulating the actuator with linear loads without consideration of friction or the effects of airflow around the valves. Initially several tests were conducted to get to know the characteristics of the system and it's behaviour in different conditions. By disassembling the actuator the stepper motor was further studied to obtain the parameters needed by the model. The model was simulated using the obtained parameters. Based on the simulations a number of development areas were identified. For example this resulted in the development of the stall detection block that detects an unexpected stall of the rotor. Later the improved blocks were combined into a new model. This model was simulated and the results were found to be credible according to the previous test results and known characteristics of stepper motors. However it is important to note that the results have some inaccuracies since the model leave out the effects of friction.

Keywords: Stepper motor, Simscape, HVAC

Innehåll

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av uppgiften.....	2
2 Teknisk bakgrund.....	3
2.1 Stegmotorer – allmänt	3
2.1.1 Risker	3
2.1.2 Kvarstående moment.....	3
2.2 HVAC.....	3
2.3 Aktuator.....	4
2.4 Simulink	5
3 Metod	6
3.1 Studier av aktuatorns beteende.....	6
3.1.1 Alternativ metod.....	6
3.2 Mätningar på motor	7
3.2.1 Moment på utgående axel	7
3.2.2 Matningsspänning	7
3.2.3 Lindningarnas spänningsvariation.....	8
3.2.4 Lindningarnas resistans	8
3.2.5 Lindningarnas induktans	8
3.2.6 Momentkonstant.....	9
3.2.7 Utväxling.....	9
3.3 Identifiering av utvecklingsområden i modellen.....	9
3.4 Vidareutveckling av modell	10
4 Resultat.....	11
4.1 Studier av aktuatorns beteende.....	11
4.2 Mätningar på stegmotor	11
4.3 Vidareutveckling av modell	12
4.3.1 Stall detection.....	12
4.3.2 Spänningslösa lindningar	13
4.3.3 Spjällsimulering	14
4.3.4 Kvarstående moment.....	15
4.3.5 Hänsyn till temperatur.....	15
4.4 Hela simuleringen	15

5 Diskussion	18
5.1 Mätningar på stegmotor	18
5.2 Stegmotorns beteende	18
5.3 Identifiering av utvecklingsområden i modellen.....	19
5.4 Vidareutveckling av modell	20
5.4.1 Styrblocket	20
5.4.2 Stall detection.....	20
5.4.3 Kvarstående moment.....	21
5.4.4 Stegmotor	21
5.5 Påverkan av friktion	24
5.6 Verifiering av modell	26
6 Slutsats	27
7 Referenser.....	29

1 Inledning

Detta arbete behandlar en jämförelse mellan en verklig aktuator och en modell i Simulink. Arbetet gick ut på att verifiera om modellen går att anpassa till aktuatoren vilken används för reglering av spjäll i klimatanläggningen hos Volvobilar. Arbetet utfördes på Volvo Car Corporations utvecklingsavdelning för klimatanläggningar. I rapporten kommer tester och mätningar av aktuatoren att presenteras. Även tankar och idéer kring utveckling och förbättringar av modellen kommer att behandlas.

1.1 Bakgrund

Mathworks har på uppdrag av Volvo tidigare gjort en modell av stegmotor med utväxling och last i Simulink. Det finns en önskan att denna modell skall kunna användas för simulering av spjällstyrningen vid olika driftsscenarior. Modellen som tillhandahölls var uppbyggd av standardvärden på stegmotorer. Nu vill man anpassa parametrarna för den befintliga motorn. Aktuatoren ska användas i en på marknaden redan befintlig klimatanläggning (hädanefter kallad HVAC) där den styr spjäll. Det är önskvärt att studera situationen vid ändlägen, då spjället går emot väggen. Idag finns en väldokumenterad aktuator som används för styrningen, denna kommer eventuellt att sluta tillverkas och en ny lösning måste hittas. Volvo vill kunna simulera den tänkta nya aktuatoren för att säkerställa en god kvalitetssäkring. Mekatroniksystemet består av stegmotor, växellåda, drivsteg, kamhjul, länkarm, spjäll, stegmotorstyrning samt spjällreglering.

1.2 Syfte

Volvo måste kunna säkerställa att eventuella felregleringar av spjällens position upptäcks eller undviks. Fel uppstår i regel då spjällen går in i ett ändläge. Tidigare har en Hall-sensor använts för att säkerställa att steg genomförts. I den nya aktuatoren kommer man inte att använda någon sensor för att säkerställa att steg utförts. Nu vill man istället kunna verifiera att steg genomförs genom att övervaka hur strömmarna beter sig. Detta arbete hoppas man kunna underlätta med hjälp av simulering. Anses detta möjligt att simulera är förhoppningen att man ska kunna bygga vidare modellen till att kunna simulera HVAC i en större utsträckning med samverkan mellan dess olika komponenter.

1.3 Avgränsningar

Eftersom att spjällen ska styra luftströmmar kommer dessa att påverkas av luftmotstånd. Eftersom växellåda och spjäll är mekaniska delar kommer glapp och friktion att påverka funktionen. Detta är något som inte kommer behandlas i arbetet. Här kommer istället linjära moment och hårda stopp att studeras. Temperaturberoende är något som inte heller kommer att studeras närmare.

1.4 Precisering av uppgiften

Aktuatoren som används för spjällstyrning vid reglering av luftströmmar i HVAC har tidigare haft en Hall-sensor för att identifiera ändläget. Hall-sensorn har då kunnat visa när motorn inte längre klarar av att genomföra steg. Då denna aktuator riskerar gå ur produktion vill man förbereda sig med andra alternativ. Ett alternativ är att använda en aktuator från Johnson Electric som dock inte använder någon Hall-sensor för att detektera att stegmotorn inte orkar genomföra begärda steg. För att kunna testa olika körningar på ett tids- och kostnadseffektivt sätt vill Volvo kunna simulera stegmotorn i Simulink.

- Vad behövs det för parametrar för att kunna simulera modellen?
- Vad händer när aktuatoren når ett ändläge?
- Finns det förbättringar på modellen?
- Går modellen att vidareutveckla, alternativt byggas om i Simscape?

2 Teknisk bakgrund

2.1 Stegmotorer – allmänt

Stegmotorer används ofta vid positionsreglering då roterns position är lätt styrbar. Rotorn är magnetiserad med ett flertal poler. Lindningens magnetfält i sin tur varierar på ett kontrollerat sätt med hjälp av elektronik. Genom att ändra spänningen till lindningarna kan man få den att gå ett specifikt antal steg. Detta möjliggör en noggrann positionering av rotorn. Stegmotorer roterar inte likt en vanlig motor eftersom att de går ett visst antal steg per varv. Antalet steg per varv varierar beroende på motorns konstruktion. Genom att spänningssätta lindningarna i en bestämd sekvens varieras magnetfältet så att rotorn förflyttas mot det nya jämviktsläget. En stegmotor körs i regel på två olika sätt genom hel eller halvsteg (1). Även mikrostepping används ibland.

Helsteg

Vid stegning varieras spänningen över lindningarna i två nivåer så att magnetfältet genom respektive lindning byter riktning. Vid detta driftsätt blir stegmotorn som starkast.

Halvsteg

Vid stegning kommer spänningen över lindningarna att varieras på liknande sätt som för helsteg med skillnaden att det varieras i tre nivåer där mittnivån ofta är 0 V. Motorn är något svagare men vinsten är att precisionen blir större då man får dubbelt så många steg per varv jämfört med helstegning.

Mikrostepping

Förekommer för att kunna köra en motor väldigt många steg per varv. Här ändras spänningen succesivt mellan lindningarna och du får ett flertal steg mellan varje pol (2).

2.1.1 Risker

En stegmotor kan vid vissa tillfällen fås att driva baklänges. Detta kan inträffa om momentet är så stort att rotorn inte klarar att genomföra steget till nästa pol. Istället för ett steg framåt kan rotorn i vissa fall då gå tre steg bakåt till det jämviktsläge som ligger fyra steg från det sökta stegläget. Vid ett sådant tillfälle kan motorn börja driva bakåt med tredubbel hastighet.

2.1.2 Kvarstående moment

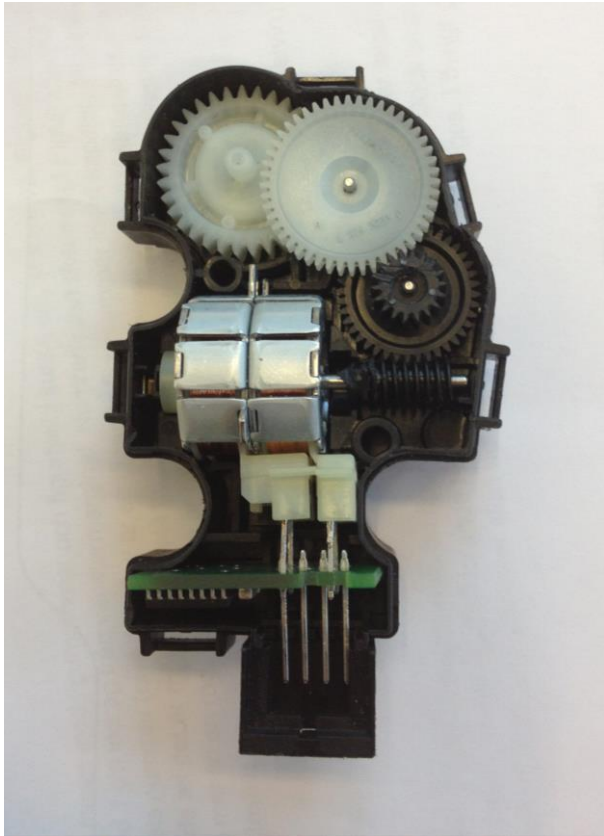
En stegmotor permanentmagnetiserad rotor kommer ha ett kvarstående moment då dess lindningar görs spänningslösa. Detta beror på att den magnetiska rotorn kommer att attraheras av järnet i statorn.

2.2 HVAC

HVAC (Heating, Ventilation and Air Condition) är den enhet där aktuatorn används. HVAC är hela ventilationssystemet på bilarna och ska klara av att reglera klimatet i bilen till det önskade värdet. Här värms, alternativt kyls luften, här styrs om luft ska recirkulera i bilen eller om friskluft ska hämtas utifrån. I HVAC styrs också hur luftflödet fördelas i bilen mellan vindruta, stolar och golv. För att få luftströmmarna att styras rätt innan de når kupén används aktuatorer för styrning av de olika spjällen i HVAC.

2.3 Aktuator

Aktuatoren EFB4 från Johnson Electric behandlas i detta arbete. Den består av en stegmotor som driver en utgående axel via en växellåda.



Figur 1. Aktuator EFB4

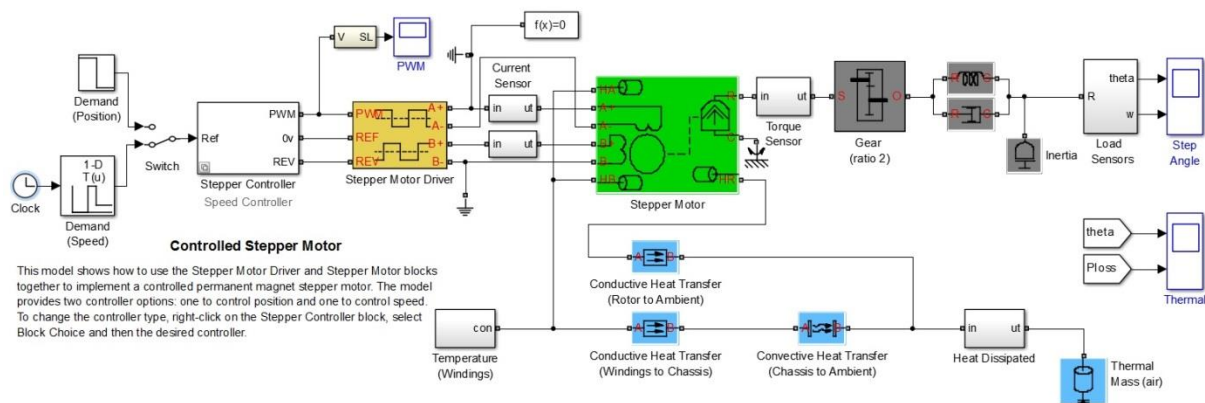
Denna används för reglering av spjäll i HVAC hos Volvos och många andra biltillverkares bilar. Motorn är uppbyggd med två lindningar om tio poler på varje spole. Rotorn har även den tio poler. Ett fullsteg blir 18° vilket resulterar i 20 steg per varv.

Motorn styrs av en intern styrkrets som ansluts till bilens styrenhet via en LIN-buss. LIN står för Local Interconnected Network och denna lösning är vanlig inom bilindustrin (3). LIN-bussen ger information om hur många steg motorn ska förflyttas samt i vilken hastighet och riktning motorn ska köras. Motorn kan köras i tre olika hastigheter. Den lägsta hastigheten, vilken ger det högsta momentet är 240 steg per sekund (hädanefter förkortat sps), nästa hastighet är 320 sps. Motorn går även att köra i autospeed, då är hastigheten ännu högre men varierar med belastningen. Momentet vid denna hastighet blir dock betydligt lägre. Elektronikdelen i aktuatoren behandlar informationen från LIN-bussen och skickar ut det önskade antalet steg till motorn, genom att variera spänningen över lindningarna. Om stegmotorn inte klarar av att utföra stegen förändras strömkurvorna för motorkretsen som elektroniken i sin tur känner av. Då slutar styrelektroniken att driva motorn och den meddelar styrdatoren via LIN-bussen att något blivit fel. Detta kallas stall detection och används för att

inte tappa kännedom om rotorns aktuella position. En problematik med detta är att veta hur många steg det tog innan elektroniken upptäckte felet. Antal missade steg innan elektroniken upptäcker felet kan också variera beroende på spänning och temperatur. För att tydligt kunna identifiera ett ändläge har tidigare en Hall-sensor använts för att detektera ett stopp av rotorn. På denna aktuator finns ingen Hall-sensor eller annan givare som kan ge information om rotorns status. Istället övervakar styrelektroniken strömvariationerna genom lindningarna och kan identifiera karakteristiska förändringar hos dessa. Då stegmotorn inte klarar att genomföra steg stoppas motordrivningen. Denna funktion kallas stall detection.

2.4 Simulink

Simulink är ett simuleringsprogram som är en del av Matlab. Här används matematiska överföringsfunktioner för att simulera verkligheten. Detta har utvecklats och allt fler toolboxar finns tillgängliga att använda vid konstruktion av modeller. I detta arbete har toolboxen Simscape använts samt SimElectronics. Dessa är förberedda med vanliga elektroniska respektive mekaniska komponenter. Utifrån dessa har Mathworks gjort en modell av en aktuator med styrning och last.



Figur 2. Originalmodell från Mathworks

3 Metod

3.1 Studier av aktuatorns beteende

Då aktuatorn normalt styrs via LIN-buss används konverteringsenheten MINI BUS-FLEX II, tillhandahållen av Volvo som möjliggör styrning av aktuatorn från en PC. Med konverteringsenheten och den enkla programvaran Cooling LabView går det sedan att kommunicera med aktuatorn via LIN-bussen. Genom att kontrollera aktuatorn från PC styrs denna till lämpliga driftsfall för att kunna observera dess beteende.

Intressanta frågeställningar är:

Stannar alltid aktuatorn om den överbelastas?

I den inbyggda logiken finns en funktion som skall stoppa stegmotorn då den inte klarar att genomföra sina steg. Det är av stort intresse att eventuella specialfall då logiken inte stoppar stegmotorn upptäcks.

Börjar aktuatorn någonsin backa vid överbelastning?

En stegmotor som inte orkar genomföra ett begärt steg kan i vissa fall börja driva åt motsatt riktning enligt beskrivning i Teknisk bakgrund.

Tappar aktuatorn hastighet vid hög belastning?

Är aktuatorn med dess växellåda självhämmande?

En stegmotor som gjorts spänningslös har fortfarande ett hållmoment med vilket den klarar att hålla en last. Eftersom växellådan innehåller en snäckväxel finns det en möjlighet att hela systemet blir självhämmande och därmed inte kommer kunna tvingas att rotera utan att motorn driver.

Genom att variera matningsspänningen och pålagt moment studeras hur aktuatorns beteende påverkas. Experimenten görs även med både inkopplad och urkopplad stall detection.

3.1.1 Alternativ metod

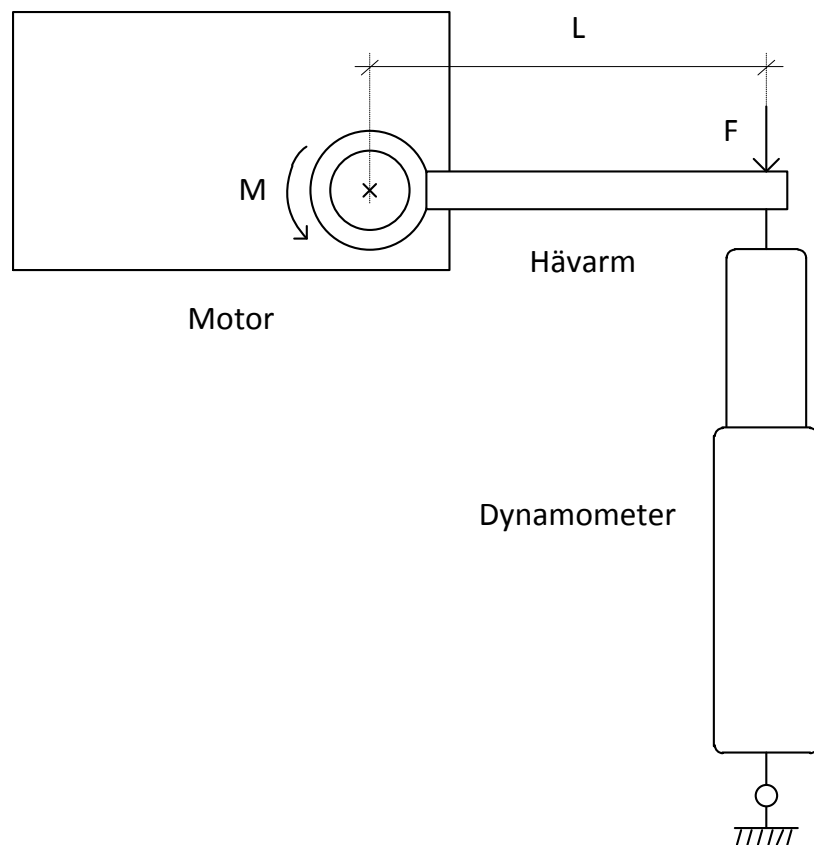
Ett annat sätt att studera aktuatorn kan vara att bygga en egen styrenhet för att kunna styra aktuatorn med större frihet eftersom LIN-bussen kommunicerar med den inbyggda styrelektroniken i aktuatorn. Den inbyggda styrelektroniken är programmerad från fabrik och kan inte ändras och vid Volvo finns inte detaljkännedom kring hur detta program ser ut. Därför kan det vara en begränsning i att stegmotorn styrs via denna elektronik eftersom stegmotorn under vissa driftsbetingelser stoppas av elektroniken. Detta ansågs dock vara fel väg att gå då Simulink-modellen skall representera hela aktuatorn och därför finns ett behov av att inhämta erfarenheter av hur denna styrs.

3.2 Mätningar på motor

3.2.1 Moment på utgående axel

Denna mätning görs genom att montera en hävarm på utgående axel. En dynamometer används för att simulera en last. Mätvärdet från dynamometern är i Kg vilket medför att detta måste multipliceras med normalaccelerationen g . Genom att ha en hävarm med känd längd som belastas med en känd last erhålls momentet kring axeln enligt:

$$M = FL = mg \quad (\text{Ekvation 1})$$

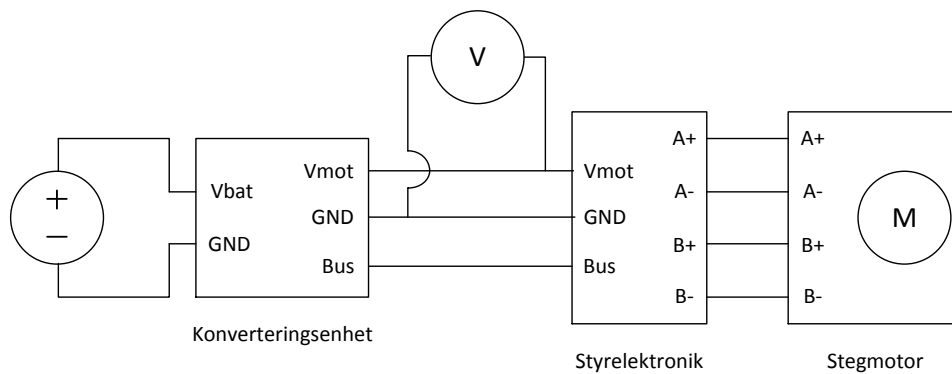


Figur 3. Mätning av moment

Aktuatorn skall kunna operera vid en matningsspänning mellan 9-16 V därför genomförs mätningarna vid 10 V, 12 V och 14 V (4).

3.2.2 Matningsspänning

Eftersom den konverteringsenhet som används för kommunikation med PC inte existerar i en HVAC-enhet är det önskvärt att undvika att mätvärden påverkas av denna. För att eliminera mätfel vid eventuellt spänningsfall över konverteringsenheten så mäts motorenhetens matningsspänning mellan ledarna V_{mot} och GND hos LIN-bussen.

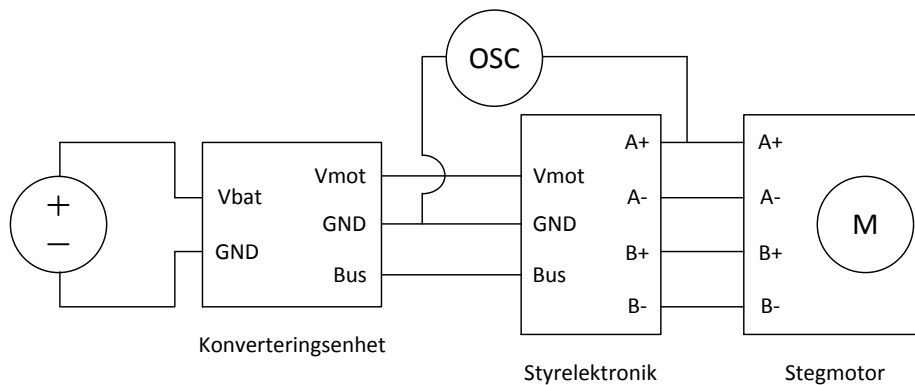


Figur 4. Mätning av matningsspänning

3.2.3 Lindningarnas spänningsvariation

När stegmotorn stegar kommer spänningen över lindningarna att växlas. Det är nödvändigt att veta amplituden på spänningen eftersom denna står i direkt proportion till motorns moment.

Ett oscilloskop kopplas mellan jord och en lindnings ena anslutning. På oscilloskopet går det sedan att utläsa amplituden hos spänningsvariationen.



Figur 5. Mätning av spänningens amplitud

3.2.4 Lindningarnas resistans

En multimeter kopplas mellan ena lindningens båda anslutningar och ett mätvärde erhålls.

3.2.5 Lindningarnas induktans

En RCL-meter kopplas mellan ena lindningens båda anslutningar. Eftersom induktans är beroende av frekvensen görs mätningen vid en frekvens som ligger så nära stegmotorns driftfrekvens som möjligt.

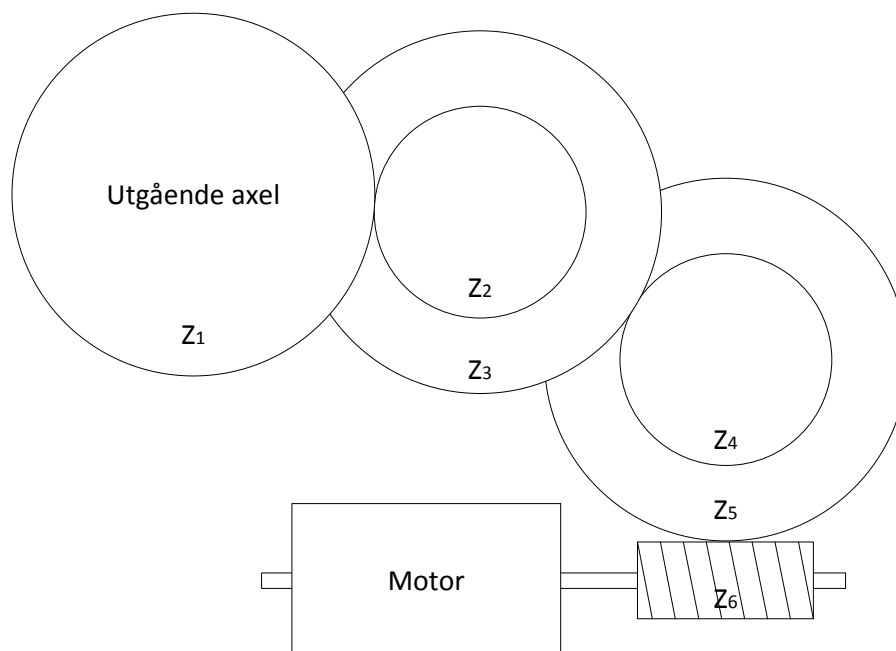
3.2.6 Momentkonstant

Enheten för denna momentkonstant är [Nm/A] och beskriver förhållandet mellan stegmotorns moment och dess ström. Eftersom detta är en konstant för hela stegmotorn så mäts strömmen över aktuatorns spänningsmatning. Mätningen görs genom att aktuatorns stoppmoment mäts upp enligt tidigare beskriven metod samtidigt som strömmen läses av med hjälp av en multimeter.

3.2.7 Utväxling

Aktuatorns utväxling beräknas enligt följande ekvation där Z är antal kuggar och i är utväxlingen:

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_3}{Z_4} \cdot \frac{Z_5}{Z_6} \quad (\text{Ekvation 2})$$



Figur 6. Motor med växellåda

3.3 Identifiering av utvecklingsområden i modellen

Med de uppmätta värdena hos aktuatorn som grund testas så den befintliga Simulink-modellen. Eftersom den aktuella aktuatorn används i bilar skall den klara stora variationer av såväl matningsspänning som varierande moment. Temperaturs variationer påverkar spjällens och länkarmarnas styvhet och därmed påverkas sättet på vilket momentet byggs upp. Detta beror på att aktuell HVAC till stor del är uppbyggd i plast och dess elasticitet varierar med temperaturen. Genom att simulera modellen med olika kombinationer av matningsspänning och momentvariationer identifieras de driftsfall där modellen inte ger ett resultat som stämmer med det förväntade.

3.4 Vidareutveckling av modell

De utvecklingsområden som identifierats hos modellen granskas och efter genomgång av de existerande blockens uppbyggnad görs en första plan för hur blocken kan modifieras alternativt helt bytas ut. Under utvecklingen görs löpande tester för att verifiera att arbetet leder mot önskad funktion hos blocket. När respektive block modifierats enligt plan kopplas dessa ihop till en gemensam modell som sedan testkörs och justeras så att förväntat beteende hos modellen erhålls.

4 Resultat

4.1 Studier av aktuatorns beteende

Studierna av aktuatorns beteende gjordes med utgångspunkt i fyra frågeställningar:

Stannar alltid aktuatoren om den överbelastas?

Då stall detection är aktiverad så stoppas alltid motorenheten då den överbelastas. Inte vid något av de olika driftsfallen har motorn försökt fortsätta driva trots att den stått still. Givetvis kommer motorn försöka fortsätta driva om stall detection är urkopplad.

Börjar aktuatoren någonsin backa vid överbelastning?

Då stall detection är aktiverad så hinner alltid denna slå från motorn innan motorn hunnit börja rotera i motsatt riktning. Endast vid ett tillfälle kunde det noteras en tendens till att motorn skulle driva åt motsatt riktning. Det inträffade under en mycket kort tid. Dock om stall detection är avstängd samtidigt som aktuatoren belastades med ett moment långt större än dess stoppmoment. Här krävdes det att momentet bidrog till att driva motorn i fel riktning. Så fort momentet minskades så vände motorn till sin ursprungliga rotationsriktning.

Tappar aktuatoren hastighet vid hög belastning?

En av den mest utmärkande karakteristiken för en stegmotor är att den håller rätt hastighet ända tills belastningen blir för hög så att motorn därmed tappar steg. Endast då tappar motorn hastigheten.

Är aktuatoren med dess växellåda självhämmande?

Vid några tillfällen då aktuatoren körts mot ett växande moment tills den inte orkat längre har aktuatoren dragits bakåt av det uppbyggda momentet. Att motorn har dragits bakåt har endast inträffat då matningsspänningen varit 14 V och hastigheten varit 240 sps, alltså då motorn varit som starkast. Detta är dock lite oroande då detta kan leda till att elektroniken inte vet var spjället befinner sig. Det anses alltså konstaterat att aktuatoren inte är självhämmande.

4.2 Mätningar på stegmotor

Modellen kräver ett visst antal parametrar för att kunna simuleras korrekt. Framtagning av dessa har genomförts med diverse olika mätmetoder. Resistans, induktans, strömbeteende samt moment är viktiga beteenden att kontrollera hos motorn. Baserat på erhållna mätvärden räknades följande medelvärden fram för att använda vid fortsatta simuleringar. En mer utförlig beskrivning av mätningar finns i bilaga 4. Magnetisk resistans syftar till den permanentmagnetiserade rotorn och dess motstånd till ändring av magnetiseringen. De värden som behövs för modellen är uppmätta och uppskattade, de presenteras i nedanstående tabell.

Tabell 1. Uppmätta värden som använts vid simulering

Parameter	Storlek	Enhet
Lindningarnas resistans	59	Ohm
Lindningarnas induktans	0,07	Henry
Momentkonstant	0,017	Nm/A
Magnetisk resistans	oändlig	Ohm
Fullsteg	18	Grader
Rotorns masströghet	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
Rotorns dämpning	$3 \cdot 10^{-6}$	$\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad/s})$
Utväxling	320	Gångar

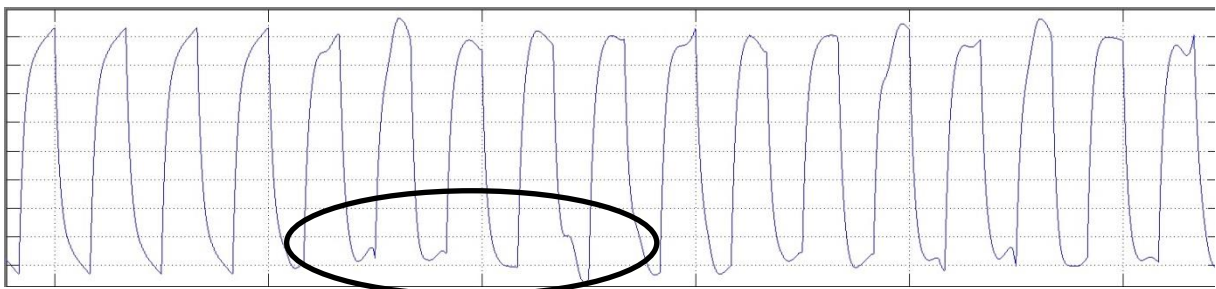
4.3 Vidareutveckling av modell

Modellen har studerats och testats för att identifiera olika utvecklingsområden. Nedan presenteras de områden där utveckling skulle vara av intresse.

4.3.1 Stall detection

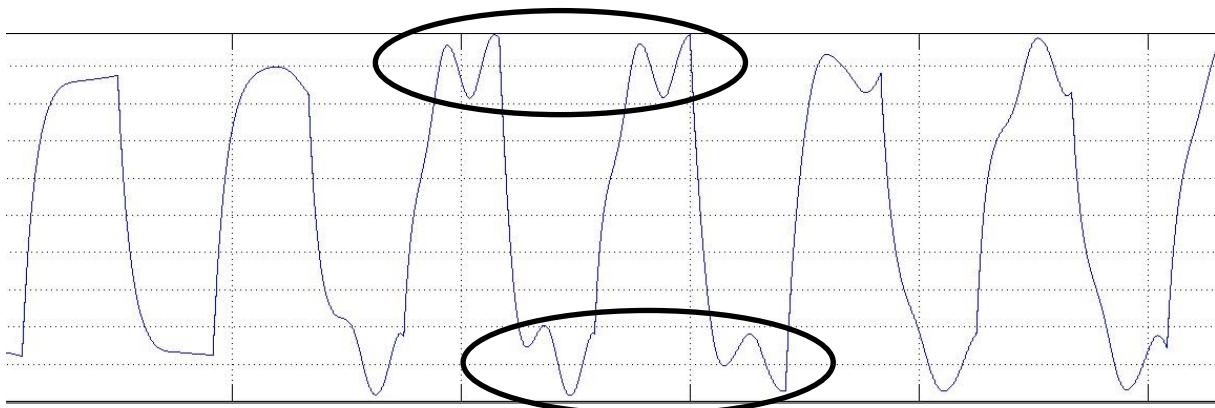
Ett potentiellt utvecklingsområde på modellen är att möjliggöra stopp av motordrivningen då det pålagda momentet är så stort att stegmotorn tappar steg. I aktuators elektroniken finns en funktion för detta som kallas stall detection. Den ursprungliga modellen har ingen återkoppling till styrelektroniken utan denna kommer fortsätta att driva motorn ända tills det begärda antalet steg har stegats. Elektroniken räknar alltså endast antalet stegpulser som ges till stegmotorn men den har ingen vetskap om huruvida steget faktiskt genomförts. Detta är ett problem då det gör att stegmotorn fortsätter att driva trots att den inte klarar genomföra stegen och därför kan den också dras baklänges en bit av det pålagda momentet för att sedan när momentet minskar åter igen börja driva.

Ett block för stall detection har byggts efter att strömmen genom respektive lindning studerats vid simulering av ändläget. Här har noterats att strömmen som vid normal drift har jämna mjuka kurvor istället vid ett stopp får ett antal överlagrade svängningar. Beroende på hur simuleringen av ett ändläge görs så kommer också strömkurvan se något olika ut.



Figur 7. Strömkurva vid hårt stopp

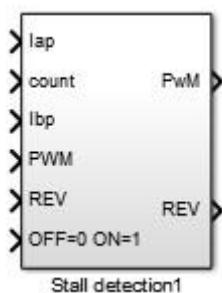
Ett hårt stopp ger ett beteende hos rotorn där den står och slår i ändläget. Detta ger en ström med små tendenser på överlagrade svängningar.



Figur 8. Strömkurva vid mjukt stopp

Ett mjukare ändläge med en fjäder som spänns upp då rotorn roterar ger en långsam uppbyggnad av momentet där stegmotorn vid ändläget kan drivas baklänges av momentet tills den åter orkar påbörja drivning åt rätt håll. Detta ger en tydligare indikering på strömkurvan.

Med hänsyn till detta har derivatan av strömmen studerats och utefter derivatans beteende har ett block byggts. Då derivatan passerar noll ändrar kurvan riktning. Passerar derivatan noll mer än tre gånger innan strömmen i sin tur passerat noll betyder det att aktuatoren står i ett ändläge.



Figur 9. Block stall detection

PWM-signalen från blocket för stall detection nollställs om ett ändläge har påträffas.

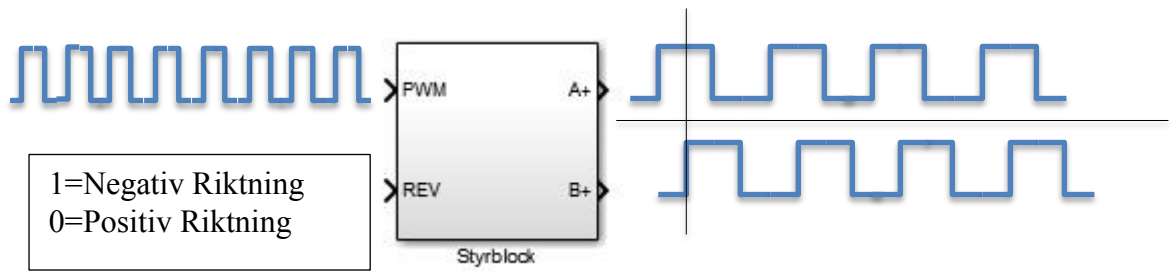
En mer detaljerad beskrivning av stall detection med uppbyggnad finns i bilaga 1.

4.3.2 Spänningslösa lindningar

När motorn står still efter en körning blir den spänningslös, i verkligheten. Vid körning med SimElectronics driver-block, kommer spänningen över lindningarna ligga kvar på de värden som gällde för det sista steget som togs. Detta skulle innebära att motorn får ett högt hållmoment. Om motorn står spänningssatt efter körningarna kommer också strömförbrukningen att vara onödigt stor vilket även skulle innebära en viss värmeutveckling. För att ha möjlighet att simulera en motor som görs spänningslös är det därför nödvändigt att modellen kan ta hänsyn till detta.

För att nollställa spänningen efter en körning har ett styrblock tagits fram. Blocket för styrning av motorn byggdes för att kunna göra motorn spänningslös efter att en körning

genomförs. För att underlätta implementeringen av stall detection valdes att bygga styrblocket i Simulink. Genom att skicka in ett pulståg till PWM-porten som håller den frekvens som stegningen görs i och där antalet pulser motsvarar antal steg skapar styrblocket utsignalerna till stegmotorn. Önskad riktning styrs via REV-porten. Blocket genererar två pulståg som är förskjutna 90° relativt varandra till stegmotorn och på så sätt fås motorn att stega för varje genererad puls. Då REV-porten erhåller en nolla som insignal kommer pulståget från port B+ förskjutas 90° efter pulståget från port A+. Vid en etta som insignal till REV-porten kommer istället pulståget från port A+ ligga 90° efter pulståget vid port B+.



Figur 10. Styrblock

Motorn körs genom att styrblocket varierar spänningen enligt tabell 2.

Tabell 2. Stegmotorns stegningssekvens

Steg	A+	B1+
1	+	-
2	+	+
3	-	+
4	-	-
5	+	-

Då motorn stoppas av stall detection eller för att den gjort det antal steg som begärts skall motorns lindningar göras spänningslösa. Styrblocket kommer detektera då PWM-signalen har stannat och då görs portarna A+ och B+ spänningslösa.

Närmare beskrivning av hur blocket är uppbyggt finns i bilaga 2.

4.3.3 Spjällsimulering

För att genomföra mer omfattande simuleringar skulle ett trovärdigt spjäll vara intressant. Genom att studera spjällens uppbyggnad och beräkna dess fjäder- och dämparkonstanter skulle modellen kunna täcka in i princip hela HVAC.

För att simulera spjäll har det byggts upp med enbart fjäder, dämpare och ett hårt stopp. Detta ger en trovärdig liknelse av ändläget hos ett relativt enkelt spjäll. Vissa spjäll i dagens HVAC är dock kopplade till aktuatorn via kamhjul och länkar och det kan därför antas att dessa

har helt andra momentvariationer. För att kunna simulera dessa skulle det dock krävas ett relativt omfattande jobb för att få fram dess momentkaraktistik.

4.3.4 Kvarstående moment

När spänningen är helt fränkopplad från stegmotorn kommer fortfarande ett moment att uppkomma på grund av att rotorn är magnetiserad. Detta kvarstående moment är av betydelse för en trovärdig simulering. Momentet är sinusformat och strävar efter jämvikt. Det är som starkast i det läge där polerna står mitt för varandra.

För att ta hänsyn till det kvarstående momentet kunde Mathworks ta fram ett block som kopplas in på utgående axel för att representera ett kvarstående moment. Här utnyttjas vinkeln hos rotorn för att avgöra hur stort momentet blir.

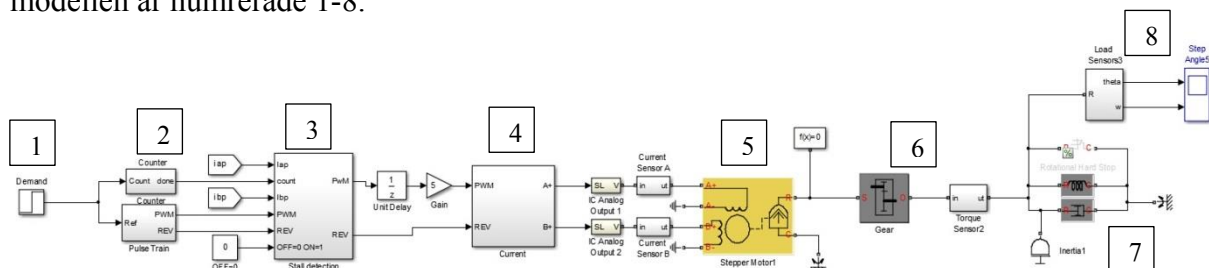
En beskrivning om hur blocket är uppbyggt finns i bilaga 3.

4.3.5 Hänsyn till temperatur

Parametrar för temperatur finns i stegmotorblocket från Mathworks. I detta arbete har det inte tagits hänsyn till temperaturberoende. Det skulle vara intressant att simulera modellen för att se hur aktuatorsn uppför sig vid varierande temperaturer.

4.4 Hela simuleringen

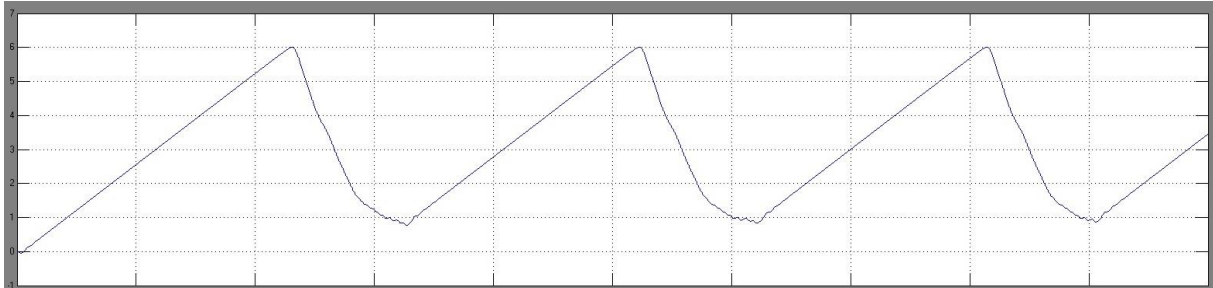
Nedan visas en bild på hur hela uppbyggnaden av simuleringsmodellen ser ut. Den går tydligt att följa från vänster till höger för att få förståelse hur den fungerar. De olika stegen hos modellen är numrerade 1-8.



Figur 11. Ny simuleringsmodell

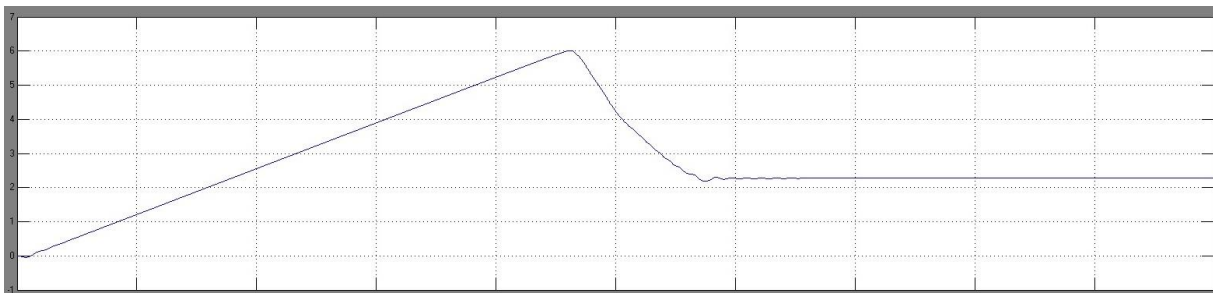
1. I första steget sätts antalet steg som önskas göras.
2. En räknare för att räkna hur lång tid hela simuleringen kommer att ta. Denna signal används senare i blocket för stall detection. Här är också en pulståggenerator. Den genererar ett pulståg om 240 pulser per sekund, vilket blir hastigheten hos aktuatorsn.
3. Stall detection blocket kollar om föregående steg nådde ett ändläge. Upptäcktes ett ändläge kommer PWM-signalen att nollställas.
4. Här kommer pulståget in och blir till spänning som ligger fasförskjutet med 90° och kopplas till motorn. Spänningen passerar en sensor som mäter strömmen som används för stall detection.
5. Stegmotorn som finns i Simscape under SimElectronics. Här sätts motorns parametrar. På utgående axel kommer en fysisk signal som ett moment.
6. Utväxlingen som i detta faller är 320.

7. Olika motstånd, här är ett motstånd av en fjäder och dämpare. Där har motorn testats mot linjära motstånd. Även ett hårt stopp har används för att simulera ett ändläge. Då kommer momentet plötsligt att gå i taket.
8. Här erhålls graf med vinkel och hastighet. Det som är mest intressant är vinkeln hos utgående axel.



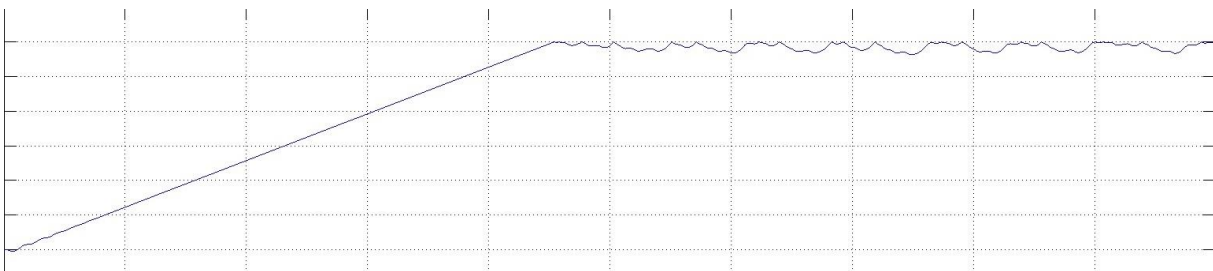
Figur 12. Spjällvinkel vid mjukt stopp utan stall detection

Då stall detection är avstängd kommer aktuatoren drivas tillbaka då det pålagda momentet blir för stort. Då momentet minskat kommer motorn på nytt att driva framåt.



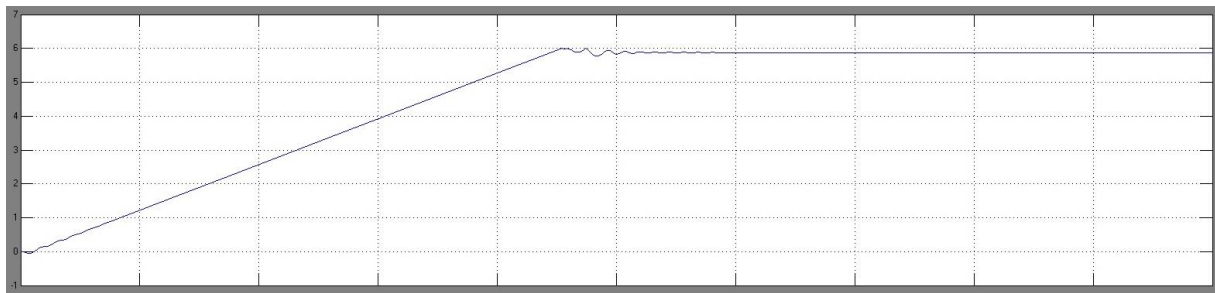
Figur 13. Spjällvinkel vid mjukt stopp med stall detection aktiverad

Då stall detection är aktiverad kommer aktuatoren fortfarande drivas bakåt om det pålagda momentet blir för stort men den kommer inte att börja driva framåt då momentet minskats.



Figur 14. Spjällvinkel vid hårt stopp utan stall detection

Då stall detection inte är aktiverad kommer aktuatoren fortsätta stega trots att momentet är för stort. Dock kommer den inte drivas tillbaka lika långt eftersom momentet avtar mycket snabbt vid tillbakagång.



Figur 15. Spjällvinkel vid hårt stopp med stall detection aktiverad

Då stall detection är aktiverad kommer aktuatoren att stoppas och ligga kvar vid ändläget. De första krökningarna på kurvan efter att den nått ändläget beror på att det är svårt att detektera att rotorn stannat vid ett hårt stopp och därför kan det dröja lite innan stall detection stannar stegmotorn.

5 Diskussion

5.1 Mätningar på stegmotor

För att kunna verifiera modellen behövs uppgifter om stegmotorns elektriska karakteristik, därför ansågs det viktigt att mäta upp denna. Snart insåg vi att det var svårt att genomföra nog exakta mätningar för att kunna använda dessa värden till att verifiera modellen.

Rotorns masströghetsmoment räknades ut med hjälp av stora förenklingar avseende både material och geometri. För att kunna göra en säker beräkning skulle vi dock behöva veta mer om vilka material rotorn är uppbyggd av.

Rotorns dämpningskonstant kommer från den friktion som uppkommer i lager samt luftmotståndet runt rotorn. Detta är mycket små värden som är oerhört svåra att mäta upp. Därför har vi uppskattat detta värde till $3 \cdot 10^{-6}$ vid våra simuleringar. Möjligen kan man ju också tänka att denna dämpning till viss del "tas om hand" av stegmotorns momentkonstant.

Stegmotorns momentkonstant skulle kunna mätas upp genom att koppla stegmotorns utgående axel till en likströmsmotor och sedan mäta ström och spänning över denna. Detta diskuterades med två representanter från Chalmers Robotförening och det fanns möjlighet att besöka deras föreningslokal för att bygga en testrigg med hjälp av deras utrustning och komponenter. Dock ansågs detta vara för tidskrävande så istället mättes momentet enbart på aktuatorns utgående axel. Motorenheten belastades med ett växande moment genom att en dynamometer kopplades till en hävarm kopplad till axeln. Genom att notera den totala strömmen genom aktuatoren vid den tidpunkt då momentet blev så stort att denna stannade kunde ett värde för momentkonstanten beräknas.

Resistansen och induktansen i lindningarna var egentligen de enda värden som gick att mäta även om dessa kunde variera något mellan olika mätningar.

Efter diskussion med vår handledare på Volvo beslutade vi att inte göra fler mätningar eftersom vi insåg att detta skulle vara mycket tidskrävande om det skulle vara möjligt att uppnå den exakthet som krävs. Istället kontaktades Johnson Electric som tillverkar aktuatoren då de borde ha tillförlitliga mätningar på sin produkt. Efter vår första kontakt den 29/4-13 lovade deras kontaktperson att återkomma men efter otaliga påminnelser har han ännu inte den 31/5-13 hörts av. Därför har vi varit tvungna att använda de mätvärden vi själva mätt upp i väntan på mer tillförlitliga värden. Vi anser ändå att våra värden är så pass tillförlitliga att vi vågar använda dem som tillfälliga närmevärden under utvecklingsfasen eftersom de antas ligga i närheten av det verkliga värdet. Däremot skulle inte våra värden kunna användas vid en riktig simulering eftersom kraven på exakthet då blir större.

5.2 Stegmotorns beteende

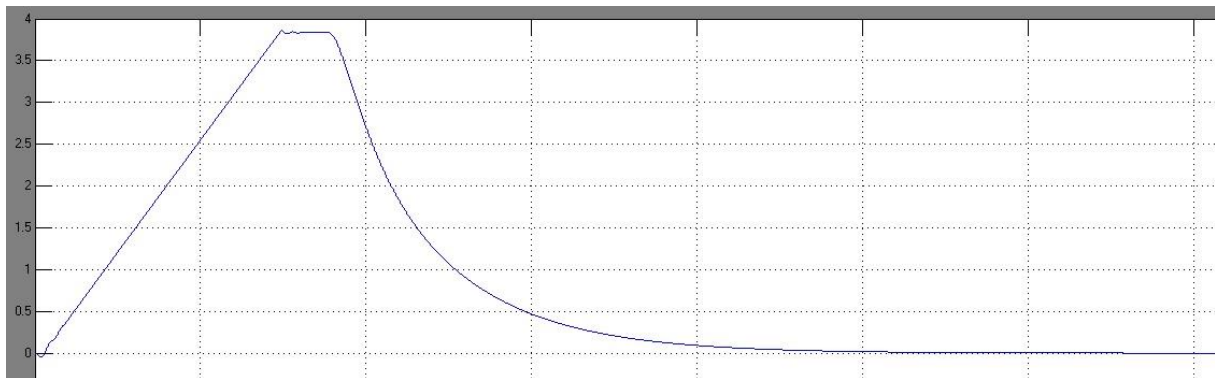
Det finns tre hastighetsval för stegmotorn, 240 sps, 320 sps och autospeed. För autospeed så varierar hastigheten med belastningen. Obelastad går stegmotorn i ca 600 sps och minskar sedan när belastningen ökar. Dock är maxmoment betydligt lägre än vid de andra hastighetsvalen. Det är högst oklart hur denna styrning ser ut eftersom en stegmotor normalt

aldrig tappar i hastighet vid ökad belastning. Detta tyder på att det finns någon form av reglering av steghastigheten. Givetvis är det möjligt att av strömkurvorna uttyda när stegmotorn belastas och därmed reglera hastigheten men denna funktion vet vi inget om och därför har den inte behandlats. Det skulle också krävas stora modifieringar av modellen för att klara denna typ av reglering.

5.3 Identifiering av utvecklingsområden i modellen

För att identifiera utvecklingsområden hos modellen lades mycket tid på att simulera modellen med olika laster på motstånd samt olika värden på de parametrar som var ofullständiga. Utan att egentligen veta mycket mer om aktuatorn än det vi själva mätt upp och testat, var det svårt att säga om de grafer vi fick ut stämde med verkligheten men allteftersom vi lärde oss mer om vår stegmotor och stegmotorer i allmänhet gick det alltmer att utröna vilka beteenden som inte borde uppträda i verkligheten. De beteenden som ansågs främmande studerades mer och orsaken till dessa undersöktes ytterligare.

Ett område där modellen inte stämde var kvarstående moment. I det ursprungliga stegmotorblocket fanns det inget kvarstående moment och det gjorde att när stegmotorn stannade då den var belastad med ett moment så drogs den baklänges tills momentet försvunnit. Växellådan i modellen är även utan friktion vilket gör att det blir lika lätt att dra tillbaka stegmotorn efter en körning. Vilket gör att om aktuatorn spänner upp en fjäder och efter det sätts spänningslös, kommer fjädern att sträva mot jämvikt och aktuatorn dras mot utgångsläget.



Figur 16. Vinkeländring hos utgående axel under belastning, utan hänsyn till kvarstående moment

5.4 Vidareutveckling av modell

5.4.1 Styrblocket

För att få med i modellen att stegmotorn görs spänningslös efter en körning anpassades styrblocket så att detta fick en möjlighet att sätta motorn spänningslös efter körning.

För att generera en fasförskjutning mellan faserna A och B användes ett antal JK-vippor som kopplades samman. Detta känns lite omständligt och det kanske inte är så snyggt men det fungerar och en fördel med denna konstruktion är att denna alltid kommer ha rätt fasförskjutning oavsett vilken frekvens som används.

5.4.2 Stall detection

Detta block skall kunna stoppa drivning av stegmotorn då denna belastas med ett så högt moment att den inte orkar genomföra stegen. Vi vet inte så mycket om aktuatorns styrelektronik men enligt Jonas Jange har tidigare lösningar hos aktuatorer från samma leverantör mätt strömmen genom lindningarna och detekterat karakteristiska förändringar i dessa.

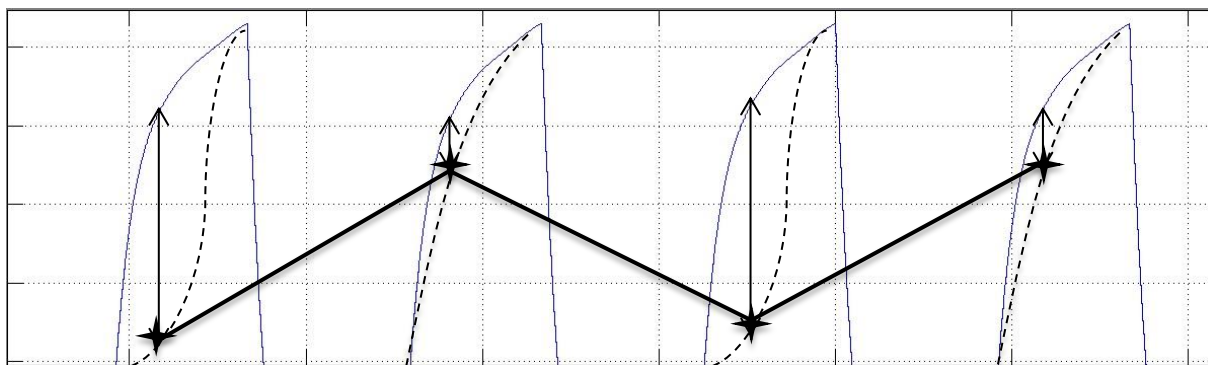
När vi simulerade såg vi mycket riktigt att strömkurvorna förändrades då stegmotorn tappade steg. Förändringarna vi uppfattade var enligt bild:



Figur 17. Överlagrade svängar hos strömkurva då stegmotor stannat

Vårt val av lösning blev att läsa av kurvans derivata och ställa upp villkoret att om kurvans derivata får värdet noll tre gånger utan att kurvan däremellan passerat noll så skulle stegmotorn anses ha stoppat. När detta inträffar så stoppas fortsatt drivning av stegmotorn.

Senare visade det sig att den metod som den verkliga styrelektroniken använder sig av inte bygger på samma princip. Troligen är principen för stall detection enligt följande.



Figur 18. Trolig princip för detektering av stopp

Den ström som går genom lindningen går fint upp i en bølge för att sen gå raskt ner igen. För identifiering av ett ändläge ska värdet en liten bit in på strömmen tas. Detta värde ska sedan jämföras med föregående. Om det vid upprepade tillfällen skiljer sig avsevärt står rotorn still. Detta är något vi inte lyckats se under de körningar som vi har genomfört. Den heldragna linjen visar ett steg som går enligt plan. Den streckade linjen visar vår tolkning på hur ett ändläge skulle kunna se ut. Då mätpunkterna som satts ut bildar ett sågtandsmönster detekteras att ett ändläge är påträffat.

5.4.3 Kvarstående moment

Då rotorn står still och lindningarna är spänningslösa kommer en magnetisk kraft att upphäva till ett moment. Momentet kommer från att rotorn är magnetiserad och attraheras av kringliggande metall. Detta moment är inte med i modellen från början utan har försökt utvecklats. Ett förslag togs fram med hjälp av Mathworks. Där kopplades ett moment in över axeln från stegmotorn. Med avseende på rotorns vinkel kommer det bidragande momentet att variera sinusformat.

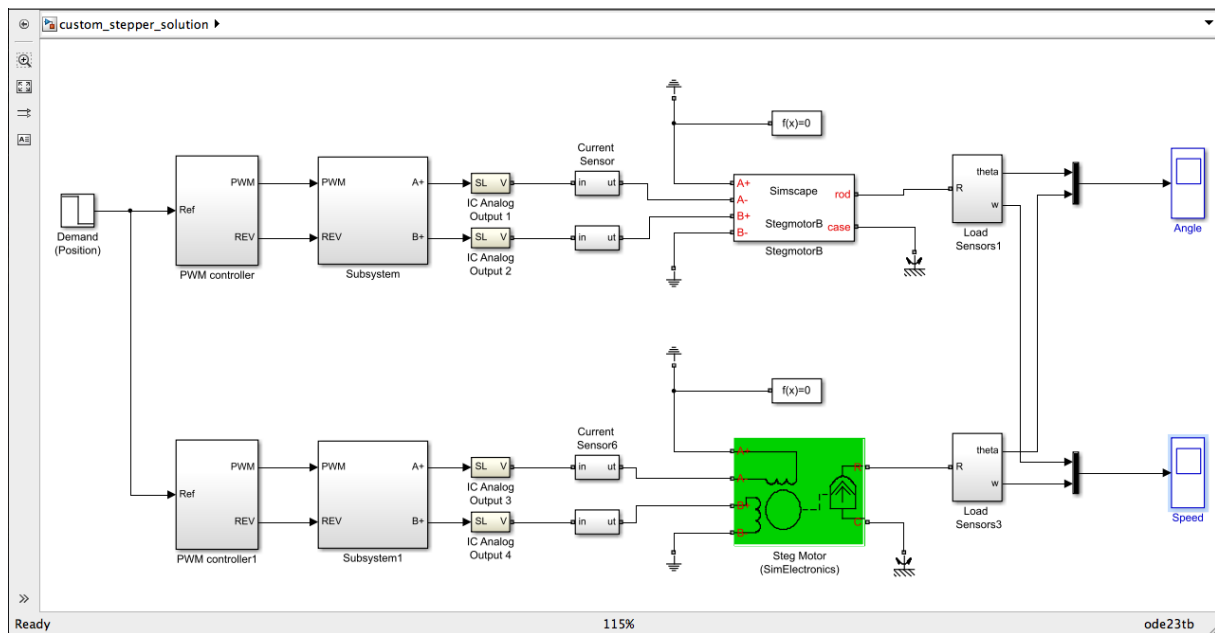
Ytterligare ett förslag är att bygga om stegmotorblocket. Vilket har varit funderingar kring tidigare. Där borde det gå att lägga till funktion som tar hänsyn till det kvarstående momentet.

5.4.4 Stegmotor

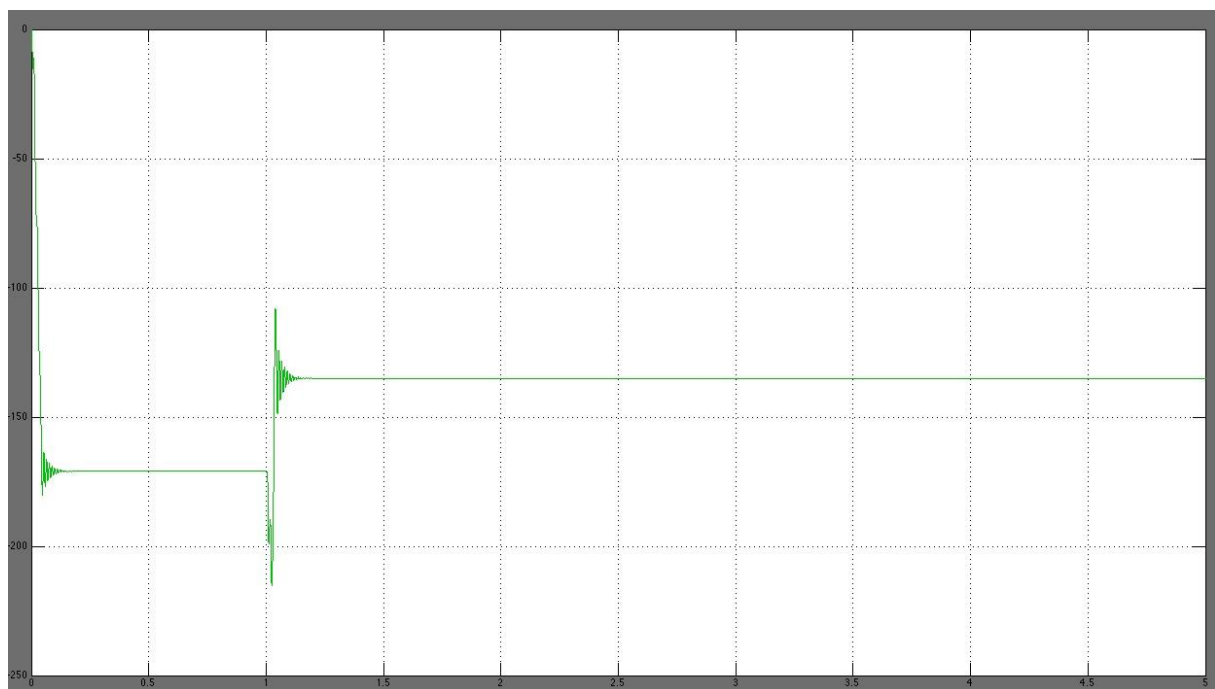
Det ursprungliga stegmotorblocket i SimElectronics uppförde sig som en stegmotor kan förväntas förutom att det saknade stegmotorns kvarstående moment. Med anledning av detta samt att Volvo önskade att blocket inte skulle vara kopplat till SimElectronics för framtida samkörning med testtrigg beslutades det att ett försök att realisera ett stegmotorblock i Simscape skulle genomföras. Efter diskussion med Jonas Jange samt Ulf Gimbergsson bestämdes det att vi skulle göra detta block baserat på de ekvationer som stegmotorblocket i SimElectronics byggts upp på (5).

Utvecklingsarbetet i Simscape bygger till stor del på vanliga Matlab-uttryck men med några undantag då man kan ange flera implicita differentialekvationer för att beskriva förhållandet mellan blockets in- och utgångar. Dessa ekvationer kommer sedan att kontinuerligt behandlas genom simuleringen (6). Då Simscape är en relativt ny toolbox fanns det inte så mycket

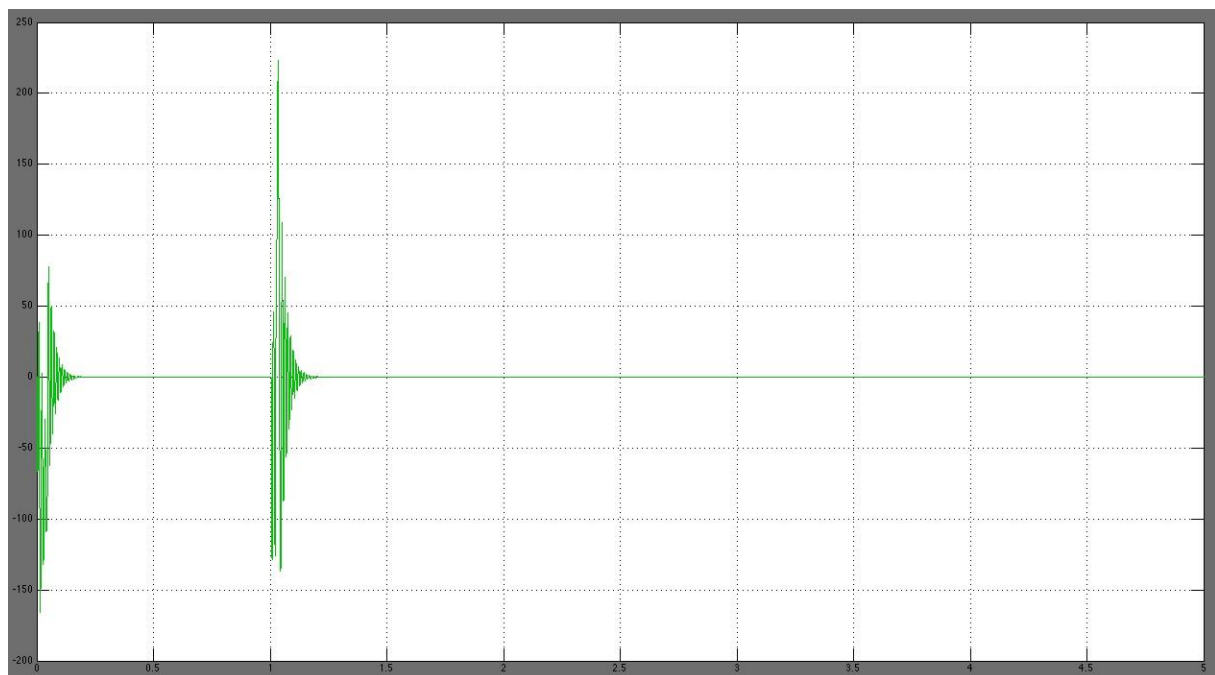
information att få om dess uppbyggnad annat än i hjälpavsnittet i Matlab. Därför byggdes det nya blocket upp enligt de exempel som fanns i Matlab. Efter avhjälpning av de felmeddelanden som uppkom då blocket byggdes kunde så det färdiga blocket testköras i modellen. Då kom nya felmeddelanden som vi också försökte lösa men det fanns ändå ett meddelande kvar som vi istället rådfrågade Juan Sagarduy på Mathworks om. Efter egna simuleringar återkom Juan med ett justerat block där han hade gjort små justeringar i en av ekvationerna, han gav även rekommendationen att byta steg-lösaren till en variabel steg-lösare. Med nämnda justeringar gjordes så en ny simulering tillsammans med ett vanligt stegmotorblock från SimElectronics. Fullständig Simscape-kod finns i bilaga 5.



Figur 19. Jämförelse mellan eget stegmotorblock och stegmotorblock i SimElectronics

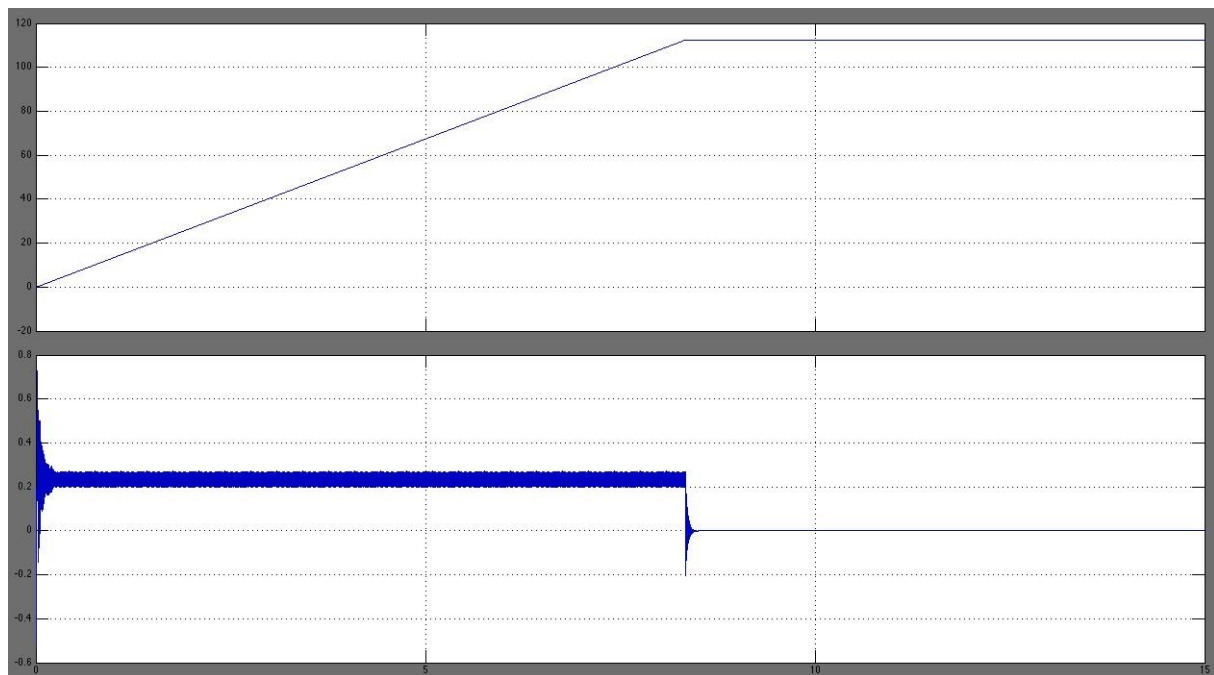


Figur 20. Jämförelse av vinkel mellan eget stegmotorblock och stegmotorblock i SimElectronics



Figur 21. Jämförelse av hastighet mellan eget stegmotorblock och stegmotorblock i SimElectronics

Endast då graferna i Figur 20 och Figur 21 förstoras mycket kan en blå graf urskiljas bakom den gröna grafen. Detta beror på att dessa två grafer följs åt och därmed skymms den blå grafen. Därmed ser de båda stegmotorblocken ut att vara likvärdiga varvid det nya stegmotorblocket lades in i den vidareutvecklade modellen. När detta gjordes blev det dock tydligt att det nya stegmotorblocket inte fungerade som tänkt. Det visade sig att detta inte alls tog hänsyn till det pålagda momentet och därmed blev stegmotorn oändligt stark. Då fjäderkonstanten sattes oändligt stor så orkade motorn fortfarande genomföra de steg som hade begärts.



Figur 22. Vinkel och hastighet för Simscape motorn vid oändligt stort moment

Trots att momentet borde bli oändligt stort om fjäderkonstanten är satt oändligt stor så fanns det inget registrerat värde hos momentgivaren vilket antyder att det är något fel i hur modellen tar hänsyn till moment. Tyvärr fanns det inte tid att undersöka detta vidare så därför kunde aldrig detta block implementeras i modellen. Det nyutvecklade blocket kan dock troligen justeras av Volvo senare för att kunna realiseras i framtida simuleringar.

5.5 Påverkan av friktion

Vid närmare studier går det att se friktionen som uppkommer i växellådan får en stor påverkan på aktuatorns prestanda. Johnson Electric som tillverkar den aktuella aktuatoren uppger att dess kvarstående moment är större än 1 Nm samtidigt som dess lägsta maxmoment är 0,4 Nm och högsta maxmoment är mindre än 1 Nm (4). Då det kvarstående moment som uppkommer i en stegmotor är ett moment som ligger kvar konstant innebär det också att stegmotorn måste orka övervinna detta då den drivs. Detta skulle bli en motsägelse då man kan se att aktuatorns kvarstående moment är större än både dess största och minsta maxmoment och därmed skulle stegmotorn aldrig orka övervinna det kvarstående momentet. Anledningen till att det kvarstående momentet är så högt blir därför intressant att studera närmare.

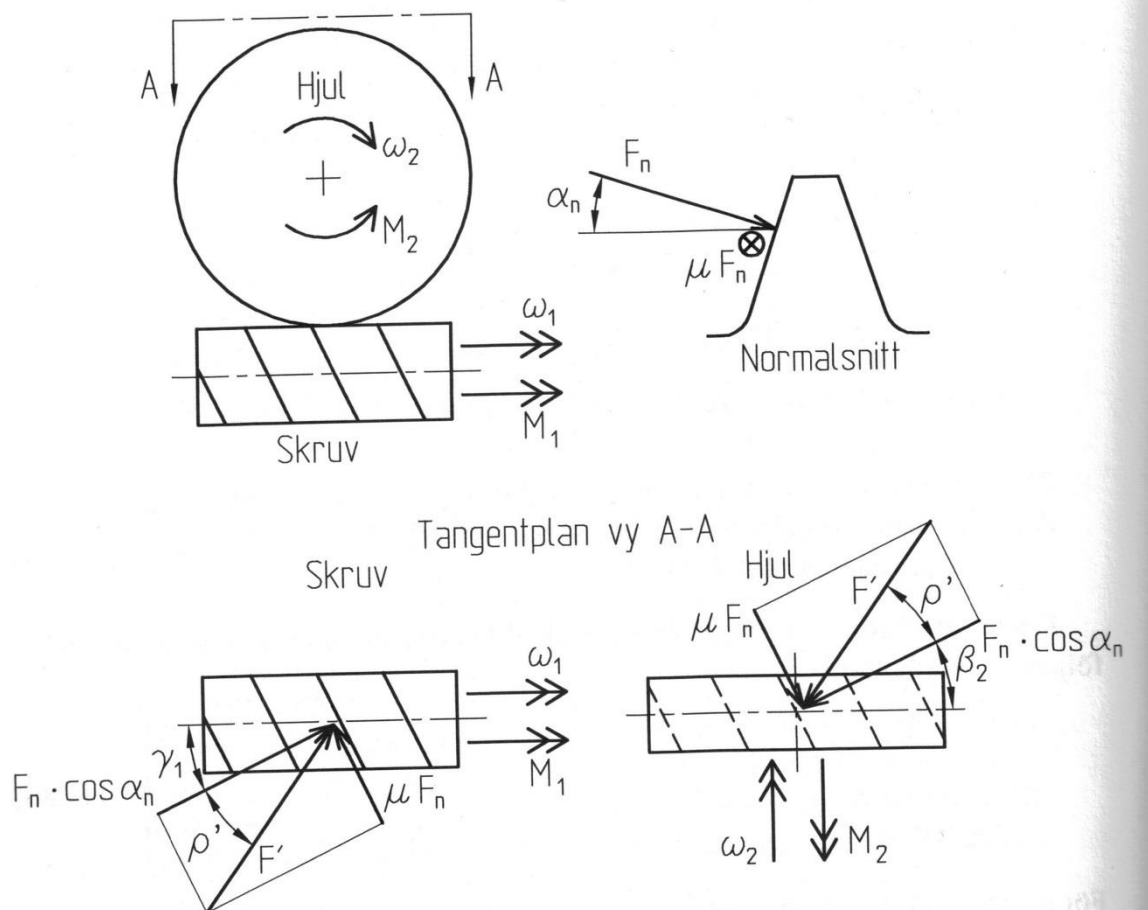
Aktuatorns växellåda består av två kuggväxlar och en snäckväxel. I alla former av kuggväxlar förekommer friktion men då vi saknade uppgifter om friktionstalet i växeln så gjordes ingen beräkning på denna men det är högst troligt att det förekommer stora förluster i växellådan. En kuggväxel har ofta bara förluster på några procent medan snäckväxelns förluster kan räknas i tiotals procent. Ett speciellt intressant fenomen hos snäckväxlar är att dess verkningsgrad varierar beroende på om växeln drivs på skruven eller hjulet (7). Vid drivning på skruven erhålls verkningsgraden enligt:

$$\eta_{skruv} = \frac{M_2 \omega_2}{M_1 \omega_1} = \frac{\tan \gamma_1}{\tan(\gamma_1 + \rho)} \quad (\text{Ekvation 3})$$

Vid drivning på hjulet erhålls verkningsgraden enligt:

$$\eta_{hjul} = \frac{M_1 \omega_1}{M_2 \omega_2} = \frac{\tan(\gamma_1 - \rho')}{\tan \gamma_1} \quad (\text{Ekvation 4})$$

Där vinklar och moment erhålls från:



Figur 11.64: Krafter i en snäckväxel

Figur 23. Krafter i en snäckväxel (7).

Bilden ger också:

$$\gamma_1 = \beta_2 < 45^\circ \quad (\text{Ekvation 5})$$

Som medför att:

$$\eta_{skruv} > \eta_{hjul} \quad (\text{Ekvation 6})$$

Därmed blir det tydligt att tillverkarens uppgift om ett kvarstående moment som är större än aktuatorns maxmoment till stor del har sitt ursprung i växellådans låga verkningsgrad då den drivs från den utgående axeln. Detta visar på behovet av att ta hänsyn till växellådans olika verkningsgrader i modellen.

Det block som utvecklades för att hantera ett kvarstående moment togs från början fram för att simulera det kvarstående moment som utvecklas av stegmotorn men senare väcktes en tanke på om detta skulle kunna användas för att ge en mer rättvisande bild av det kvarstående momentet på den utgående axeln för att simulera växellådans förluster. Detta har inte genomförts då det antagligen skulle fungera bättre att använda en växellåda ur toolboxen SimDriveline som kan ta hänsyn till inre friktion. Alternativt skulle en ny växellåda kunna realiseras i Simscape.

5.6 Verifiering av modell

För att kunna verifiera att modellen stämmer överens med verkligheten krävs goda mätvärden från aktuatorn. Ganska snart stod det klart att det skulle krävas omfattande mätningar för att kunna verifiera modellen mot verkligheten. För dessa mätningar skulle det krävas instrument med hög noggrannhet och mycket tid. Efter diskussion med Jonas Jange beslutades därför att arbetet skulle koncentreras kring modellens beteende och funktioner eftersom detta måste fungera innan det går att finjustera modellen med hjälp av erhållna mätvärden.

6 Slutsats

Den ursprungliga modellen hade till stor del en verklighetstrogen karakteristik men det identifierades ändå några områden där det krävdes ändringar för att denna skulle vara ett relevant verktyg för simulering av den aktuator som Volvo vill studera.

Motorstyrningsblocket var låst så att det inte gick att se dess uppbyggnad. Därmed byggdes blocket om helt nytt. Det tidigare blocket lät spänningsnivån från det sista steget ligga kvar och därmed erhöles ett betydande kvarstående moment från motorn vilket ansågs felaktigt då aktuatoren normalt inte styrs på detta sätt monterad på en HVAC. Det nya blocket konstruerades så att det även skulle kunna göra stegmotorns lindningar spänningsfria vid stopp av motorn vilket medför att modellen kan visa ett korrekt kvarstående moment.

Modellen utökades också med ett block för stall detection. Detta block identifierar karakteristiska svängningar i lindningarnas strömkurvor och ger då en signal som används för att stoppa PWM-signalen till motorstyrningsblocket som sedan stoppar stegmotorn. Den metod som används för att detektera ett stopp som kom att användas är troligen inte den som används av aktuatorns styrelektronik men då detta inte uppmärksammades nog tidigt så fanns det inte tid att justera denna funktion. Metoden som troligtvis används i styrelektroniken jämför strömkurvorna ett antal perioder tillbaka och detekterar en förändring i kurvformen för att ge stoppsignal. Den metod som används har dock fungerat mycket bra men den detekterar ett stopp snabbare än den troliga metoden. Detta skulle kunna göra att motorn aldrig körs på ett sådant sätt att den kan drivas baklänges då ett snabbt stopp gör att risken att denna vänder minskar. Vilket ger en differens mellan modell och verklighet.

Stegmotorblocket i den ursprungliga versionen uppvisar de karakteristiska egenskaperna som en klassisk stegmotor har förutom att det inte tar hänsyn till motorns kvarstående moment. Detta löstes genom att ett eget block för kvarstående moment konstruerades och monterades på stegmotorns utgående axel. Detta var en enkel lösning men funderade bra då detta var det enda egentliga felet med stegmotorblocket.

Friktionens påverkan på aktuatoren bör utredas närmare. Dagens modell tar inte alls hänsyn till aktuatorns inre friktion och därmed blir dess hållmoment felaktigt. Den enklaste lösningen vore att använda de block för växellådor som finns i SimDriveline som tar hänsyn till inre förluster. Detta skulle säkert också vara möjligt att realisera via Simscape.

Temperaturberoendet hos aktuatoren skulle kunna vara av intresse för att få en mer heltäckande modellering. I stegmotorblocket i SimElectronics finns möjligheten att ta hänsyn till omgivningens temperatur samt den värme som alstras av motorn. Även spjäll, länkarmar samt andra delar av HVAC påverkas av temperaturen vilket också skulle kunna vara en intressant aspekt att kunna ta hänsyn till.

Ännu en intressant aspekt för framtida utveckling av modellen skulle kunna vara att komplettera denna med en möjlighet att variera matningsspänningen under simulering. I en bil kan spänningen variera stort t.ex. kan spänningen bli mycket låg då startmotorn körs. Ett möjligt intressant scenario att simulera skulle därför kunna vara ett plötsligt spänningsfall samtidigt som spjället når ändläget. Det uppbyggda momentet skulle då kunna bli övermäktigt då motorns maxmoment plötsligt minskas pga. ett spänningsfall.

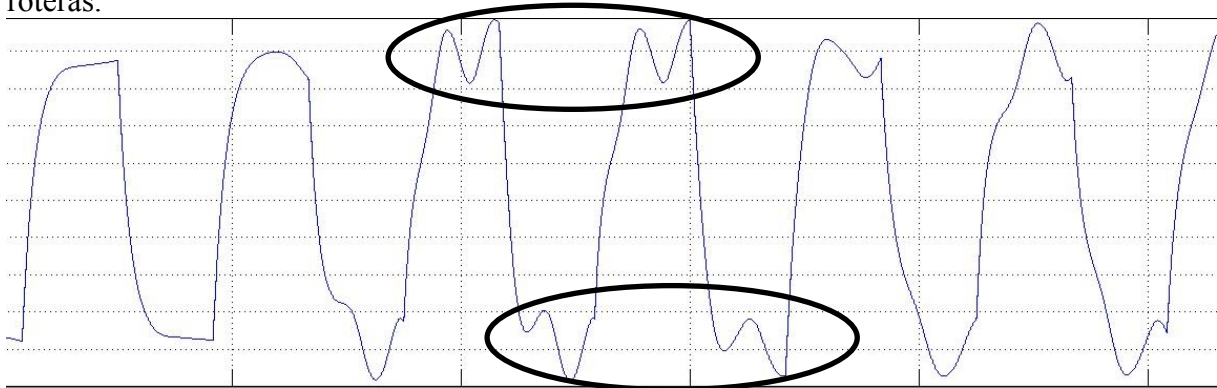
Dagens modell kan inte heller simulera att motorn körs på autospeed. Detta borde också kunna vara av intresse men det skulle kräva att man har god kunskap i hur regleringen av stegmotorn sker. Det skulle också kräva relativt stora kompletteringar av modellen för att denna simulering skulle vara möjlig.

7 Referenser

- (1) Wikipedia. Stepper motor. 2013. Hämtad från:
http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor. Tillgänglig 4 juni 2013.
- (2) Acarnley P. P. STEPPING MOTORS: a guide to modern theory and practice. London: Peter Peregrinus Ltd; 1982.
- (3) Local Interconnect Network. LIN Specification Package revision 2.2A, 31 dec 2010. Hämtad från: <http://www.lin-subbus.org/>. Tillgängligt 13 juni 2013.
- (4) Johnson Electric. EFB Climate control actuator. Hämtad från:
<http://www.johnsonelectric.com/en/products/motion/datasheets/1-6-10-57-948-m-en.pdf>.
Tillgänglig 4 juni 2013.
- (5) The MathWorks, Inc. Stepper Motor. Hämtad från:
<http://www.mathworks.se/help/phymod/elec/ref/steppermotor.html?searchHighlight=stepper+motor>. Tillgängligt 4 juni 2013.
- (6) The MathWorks, Inc. Simscape Language Guide. 2012. Hämtad från:
http://www.mathworks.se/help/pdf_doc/phymod/simscape/simscape_lang.pdf.
Tillgänglig 4 juni 2013.
- (7) Mägi M, Melkersson K. Lärobok i MASKINELEMENT. Göteborg: EcoDev International AB; 2006.

Bilaga 1. Stall detection

För att kunna stanna motorn vid ett ändläge behövs någon identifiering på beteendet. Ett beteende som syns är att strömmen får ett antal överlagrade svängningar om rotorn inte kan roteras.

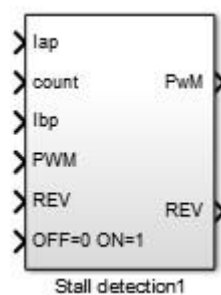


Figur 1. Ena lindningens strömkurva vid ändläge

Genom att utnyttja detta och granska strömmens derivata kan identifiering av stopp ske. För detta ändamål har ett block utvecklats.

Beskrivning

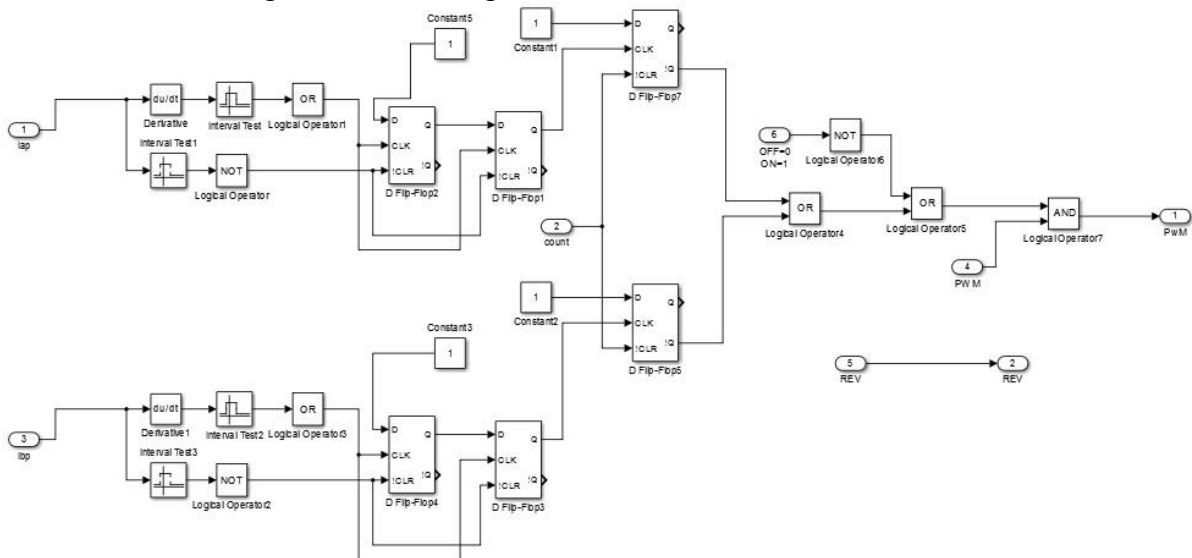
Till blocket kopplas strömmätning från lindningarna A och B till ingång Iap respektive Ibp. En räknare används för att räkna det totala antal steg som önskas stegas. Denna gör att om ett ändläge identifieras kommer signalen att upphöra tills samtliga steg tidsmässigt skulle blivit utförda. Efter den tiden kan en ny körning påbörjas. Räknaren kopplas till count-ingången. Till PWM-ingången skickas ett pulståg där varje topp är ett önskat steg. Till REV-ingången skickas information om vilken riktning motorn ska köras. Denna signal går bara rakt igenom utan att påverkas.



Figur 2. Block
stall detection

Uppbyggnad

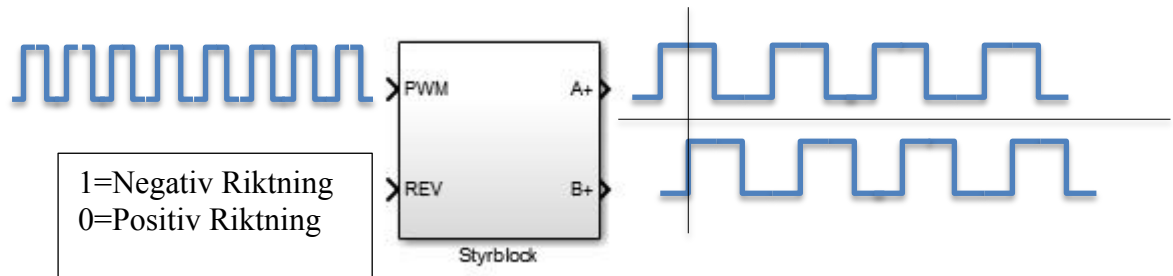
Strömmen som kommer in som insignal deriveras och övervakas för passering av nollinjen. Passerar derivatan noll kommer första vipporna att ettställas. Hinner båda vipporna ettställas innan strömmen passerar nollinjen, vilken är kopplad som reset av vipporna har ett ändläge nåtts. Räkaren används till reset av de sista vipporna för att återigen kunna genomföra en körning. När ett ändläge identifieras kommer PWM-signalen att bli noll efter AND-grinden. På så vis kommer stegmotorn sluta stega.



Figur 3. Uppbyggnad hos block stall derivata

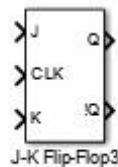
Bilaga 2. Styrblock

Genom att skicka in ett pulståg till PWM-ingången och önskad rotationsriktning till REV-ingången genererar blocket två pulståg med 90° förskjutning ut till stegmotorn och på så sätt kommer stegmotorn att stega för varje puls.



Figur 1. Styrblockets genererade pulståg

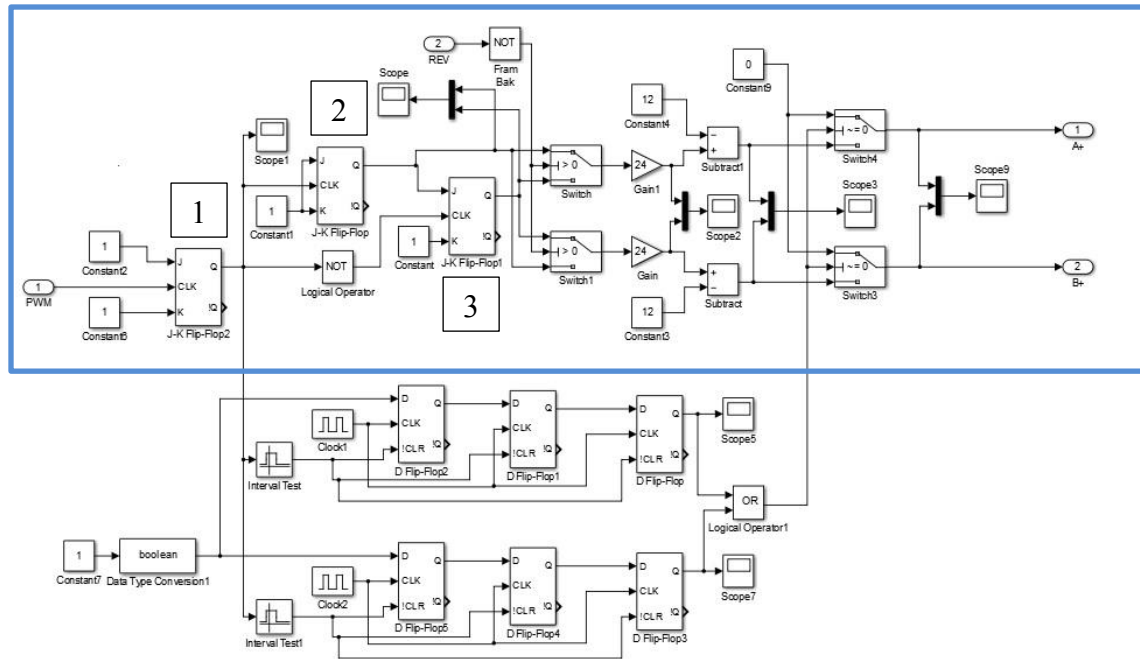
Styrblocket är uppbyggt av ett flertal JK-vippor. Den stora fördelen som utnyttjats är att JK-vippan växlar värde på utsignalen då både J och K är ettställda. Vippan reagerar på negativ flank hos klocksignalen. Detta ger att vid ettställd J-port och K-port genereras ett pulståg med halva frekvensen av klockpulsen.



Figur 2. JK-vippa

Tabell 1. JK-vippans funktion

J	K	q	Förklaring
0	0	q	Inget
0	1	0	Nollställ
1	0	1	Ettsäll
1	1	$\bar{q}$	Växlar värde



Figur 3. Styrblockets uppbyggnad

Det markerade områdets funktion

PWM-signalen som kommer in från vänster agerar klocka till den första JK-vippan (1). Här ges nu ett pulståg med halva frekvensen som utsignal från vippan. Denna signal bildar klocksignal till JK-vippa (2) vilken genererar ett pulståg med en fjärdedel av ursprungsfrekvensen. Genom att invertera klocksignalen till JK-vippa (3) ges förskjutningen 90° av det andra pulståget. De båda pulstågen förstärks sedan 24 gånger och subtraheras med 12. Detta ger styrsignaler som varierar mellan -12 och 12 volt. Från insignalen REV kommer en etta eller en nolla som sätter riktningen på motorn. Om den är noll leder pulståg A före pulståg B och resulterar i att motorn går i positiv riktning.

Det ommarkerade områdets funktion

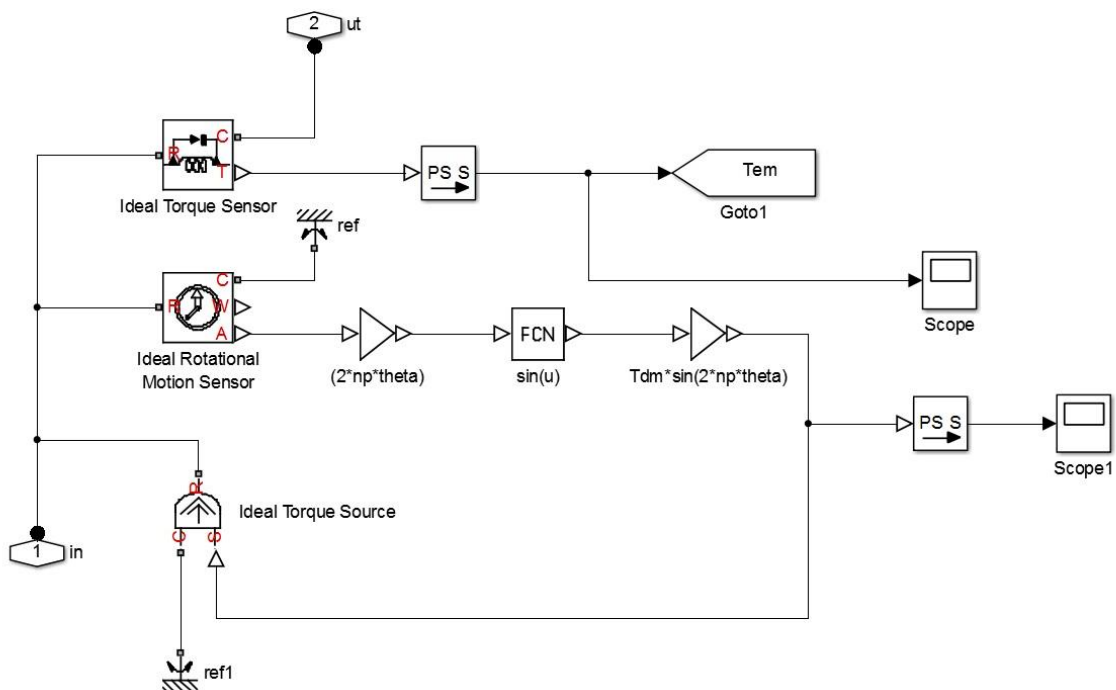
Det ommarkerade området sätter matningsspänningen till motorn till 0 volt efter drift. Räknaren är uppbyggd med ett antal DK-vippor. Klocksignalen till DK-vipporna håller halva PWM-frekvensen. Kretsens utsignal nollställs så länge PWM-signalen fortfarande varierar. Då PWM-signalen stoppas kommer kretsens utsignal att ettställas och switchen i det markerade området att skifta utsignal till 0 volt.

Bilaga 3. Kvarstående moment

Då lindningarna är spänningslösa kommer fortfarande ett moment att påverka betydligt. Detta har tillsammans med Mathworks studerats och funnit ett sätt att kunna simulera hur det påverkar hela modellen. Blocket kopplas direkt på utgående axel från stegmotorn innan axeln kopplas till växellådan.



Figur 1. Blocket för det kvarstående momentet



Figur 2. Uppbyggnad av blocket för kvarstående moment

Genom att avläsa aktuell vinkel hos rotorn utnyttjas vinkeln för att skapa ett kvarstående moment. Detta moment kommer att vara sinusformat.

Bilaga 4. Mätningar

Modellen kräver att motorns parametrar fylls i. Då detta inte fanns tillgängliga genomförs en del mätningar av motorn. Mätningar utfördes med utrustning tillhandahållna från Chalmers. Det ger en vägledning om i vilken storleksordning parametrarna bör ha. Rotorns masströghetsmoment och rotorns dämpning är uppskattade värden.

Tabell 1 Parametrar som används vid simulering

Parameter	Storlek	Enhet
Lindningarnas resistans	59	Ohm
Lindningarnas induktans	0,07	Henry
Moment konstant	0,017	Nm/A
Magnetisk resistans	oändlig	Ohm
Fullsteg	18	Grader
rotorns masströghet	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
Rotorns dämpning	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad/s})$
Utväxling	320	Gångar

Mätning av resistans

För uppmätning av resistans användes en multimeter. Multimetern ställdes in på mätning av resistans och kopplades över lindningarna. Här erhöles resistansen 59 Ohm.

För att verifiera resistansen mättes den även med en mer noggrann multimeter. Även då erhöles resistansen till 59 Ohm.

Mätning av induktans

För uppmätning av induktans användes en RCL-meter (Fluke Pm 3606). Här kopplas RCL-metern över lindningarna och en spänning skickas in med en viss frekvens. För att verifiera genomfördes en mätning då rotorn var i motorn och en där rotorn monterades bort från lindningarna.

Tabell 2. Resultat efter mätning med RCL-meter då rotorn plockats ur

Frekvens (Hz)	Lindning 1 (mH)	Lindning 2 (mH)
50	76,5	79,0
100	75,7	78,1
120	75,3	77,7
200	73,2	75,4
300	70,4	72,4
400	67,7	69,4
500	65,3	66,8

Tabell 3. Resultat efter mätning med RCL-meter då rotorn är kvar

Frekvens (Hz)	Lindning 1 (mH)	Lindning 2 (mH)
50	70,7	68,52
60	70,16	68,9
100	69,55	68,3
120	69,17	67,94
200	67,49	66,32
300	65,25	69,14
400	63,0	61,93
500	60,99	59,96

Motorn körs i regel med en hastighet av 240 sps. Detta resulterar i att strömmen kommer att variera med en frekvens på 60 Hz. Ur Tabell 3 fås då ett medelvärde av induktansen på 70 mH.

Mätning av strömmar

För att ta reda på i vilken storleksordning strömmen ligger på valdes att koppla matningsspänningen via en amperemeter. Körningarna görs utan att någon last kopplas till utgående axel. Matningsspänningen är den spänning som kopplas till LIN-bussen. Hastigheten är den valda hastigheten för drift av motorn. Grundström är den ström som elektroniken drar då motorn står still. Här kommer inget av den strömmen att gå till lindningarna. Driftspänningen är den spänning som dras då motorn körs. Driftström är den ström som motorn drar då motorn driver. Det värdet är ett medelbildat värde.

Tabell 4. Mätvärden från mätning av strömmar

Matningsspänning (V)	Hastighet (SPS)	Grundström (mA)	Driftspänning (V)	Driftström (mA)
10	240	2,6	9,78	160,5
10	320	2,6	9,28	112,8
10	Auto	2,6	9,82	30,5
12	240	2,6	11,74	178
12	320	2,6	11,78	152,1
12	Auto	2,6	11,8	31,1
14	240	2,7	13,78	156,8
14	320	2,7	13,78	153,8
14	Auto	2,7	13,8	31,9

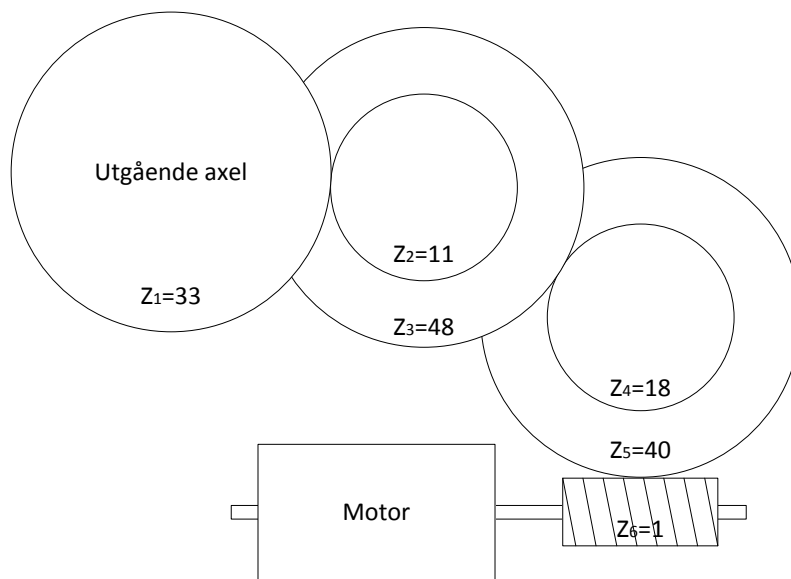
Från mätningarna kan ses att motorn drar olika ström beroende på vilken spänning som matas in till LIN-bussen. Grundströmmen är alltid densamma beroende på att det är strömmen som går åt för att hålla elektroniken i drift.

Beräkning av utväxling

För att räkna ut utväxlingen från motorn till utgående axel används ekvation 3.

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_3}{Z_4} \cdot \frac{Z_5}{Z_6} \quad (\text{Ekvation 1})$$

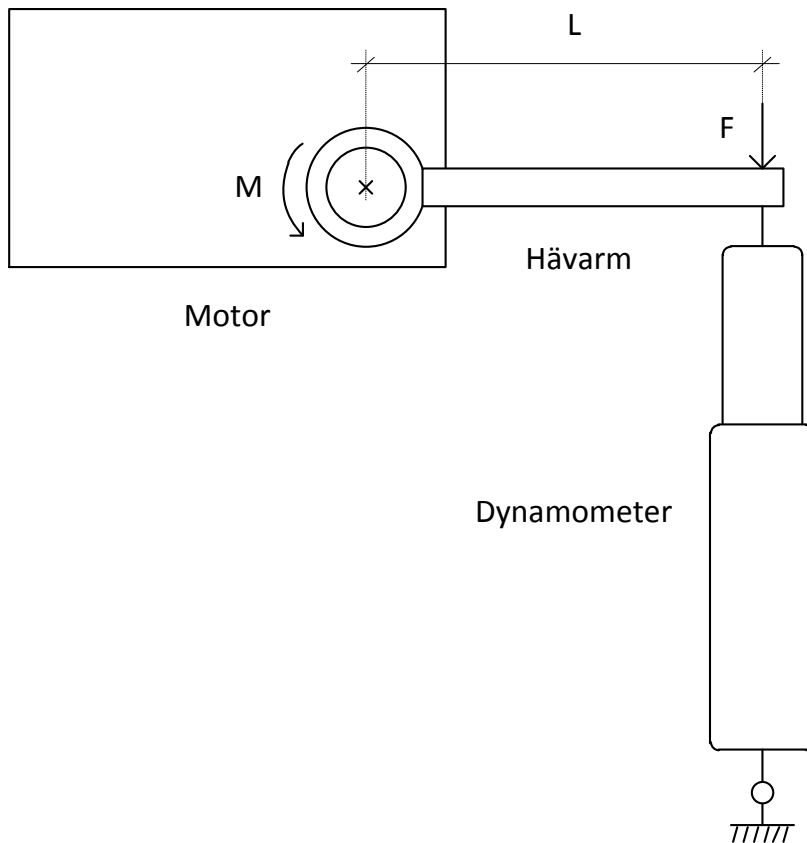
$$i = \frac{33}{11} \cdot \frac{48}{18} \cdot \frac{40}{1} = \frac{63360}{198} = 320$$



Figur 1. Växellåda för utväxling i aktuatorn

Mätning av maxmoment

För att mäta upp aktuatorns maximala moment vid olika spänningar och hastigheter kopplades en hävarm från utgående axel till en dynamometer. Aktuatorn spändes fast och kördes till ett stopp. Beroende av hur långt den orkade dra, flyttades dynamometern så vinkeln blev 90°. Samtidigt som det maximala momentet mättes kopplades strömmen via en amperemeter för att kunna få ut motorkonstanten N*m/A.



Figur 2. Koppling för mätning av maxmoment

I denna mätning användes en hävarm med längden $L=12$ centimeter. I Tabell 5 och Tabell 6 presenteras de olika mätresultaten. Här är spänningen matningsspänningen, strömmen är den ingående strömmen till elektroniken. Dynamometern är den kraft dynamometern visar då ett stopp inträffar. Längden är hävarmen. Ur den kan momentet erhållas enligt ekvation:

$$M = mgL, \text{ där } g = 9,82 \frac{m}{s^2}$$

Motorkonstanten är uträknad med hjälp av utväxlingen.

Tabell 5. Mätvärden vid körning med 240 sps.

Spänning (V)	Ström (mA)	Dynamometer (Kg)	Längd (m)	Moment (Nm)	Utg. axel (Nm/A)	Motorkonstant (Nm/A)
10	2,63	Vila	--	--	--	--
10	155	0,68	0,12	0,801312	5,169755	0,016155484
10	155	0,695	0,12	0,818988	5,283794	0,016511855
10	155	0,765	0,12	0,901476	5,815974	0,018174919
12	2,65	Vila	--	--	--	--
12	174	0,86	0,12	1,013424	5,824276	0,018200862
12	172	0,79	0,12	0,930936	5,412419	0,016913808
12	172	0,785	0,12	0,925044	5,378163	0,016806759
14	2,66	Vila	--	--	--	--
14	151	0,86	0,12	1,013424	6,711417	0,020973179
14	150	0,845	0,12	0,995748	6,63832	0,02074475
14	150	0,85	0,12	1,00164	6,6776	0,0208675

Tabell 6. Mätvärden vid körning med 320 sps

Spänning (V)	Ström (mA)	Dynamometer (Kg)	Längd (m)	Moment (Nm)	Utg. axel (Nm/A)	Motorkonstant (Nm/A)
10	2,61	Vila	--	--	--	--
10	130	0,57	0,12	0,671688	5,166831	0,016146346
10	127	0,57	0,12	0,671688	5,288882	0,016527756
10	129	0,58	0,12	0,683472	5,298233	0,016556977
12	2,62	Vila	--	--	--	--
12	150	0,7	0,12	0,82488	5,4992	0,017185
12	150	0,7	0,12	0,82488	5,4992	0,017185
12	150	0,7	0,12	0,82488	5,4992	0,017185
14	2,7	Vila	--	--	--	--
14	150	0,86	0,12	1,013424	6,75616	0,021113
14	155	0,75	0,12	0,8838	5,701935	0,017818548
14	152	0,76	0,12	0,895584	5,892	0,0184125

Det mest intressanta värdet ur tabellen är momentkonstanten (Nm/A). För att implementera ett korrekt värde väljs ett medeltal. Här valdes momentkonstanten till 0,017 Nm/A.

Bilaga 5. Stegmotorblock i Simscape

Sista version av Simscape-program för Stegmotorblock. Detta fungerade inte tillfredsställande eftersom stegmotorn inte tog hänsyn det pålagda momentet.

För att simulera stegmotorn med hänsyn till kvarstående moment och gärna komma ifrån SimElectronics valdes att försöka åstadkomma en ren simscapemodell. Denna fungerar idealt likt SimElectronics motorn förutom då axeln belastas. På grund av tidspress valdes att inte fokusera mer på lösningen av en Simscapemotor. Då denna inte tar hänsyn till kvarstående moment.

```

component StegmotorB
% StegmotorB
% Copyright 2008 The MathWorks, Inc.

nodes
    p1 = foundation.electrical.electrical; % A+:left
    n1 = foundation.electrical.electrical; % A-:left
    p2 = foundation.electrical.electrical; % B+:left
    n2 = foundation.electrical.electrical; % B-:left
    r = foundation.mechanical.rotational.rotational; % rod:right
    c = foundation.mechanical.rotational.rotational; % case:right

end

parameters
    R = { 60, 'Ohm' }; % Resistance
    L = { 0.075, 'H' }; % Inductance
    Km = { 0.017, 'N*m/A' }; % Motor torque constant
    Rm = { Inf, 'Ohm' }; % Magnetizing resistance
    alfa = { 18, 'deg' }; % Full step size
    J = { 8.5e-08, 'kg*m^2' }; % Rotor inertia
    B = { 3e-06, 'N*m/(rad/s)' }; % Rotor damping
    w0 = { 0, 'rad/s' }; % Initial rotor speed
    theta0 = { 0, 'rad' }; % Initial angle
    Nr = { (pi/2)/(18*pi/180), '1' }; % Number of teeth
end

variables
    eA = { 0, 'V' }; % Back emf A
    eB = { 0, 'V' }; % Back emf B
    iA = { 0, 'A' }; % Current through variable
    iB = { 0, 'A' }; % Current through variable
    vA = { 0, 'V' }; % Voltage across variable
    vB = { 0, 'V' }; % Voltage across variable
    t = { 0, 'N*m' }; % Torque
    w = { 0, 'rad/s' }; % Velocity
    theta = { 0, 'rad' }; % Angle

end

function setup
    if R <= 0
        error( 'Resistance must be greater than zero' )
    end

    through( iA, p1.i, n1.i ); % Through variable ia from node p1 to node n1
    across( vA, p1.v, n1.v ); % Across variable va from p1 to n1

```

BILAGA 5. sid 2(2)

```
through( iB, p2.i, n2.i ); % Through variable ib from node p2 to node n2
across( vB, p2.v, n2.v ); % Across variable vb from p2 to n2

through( t, r.t, c.t ); % torque through from node r to node c
across( w, r.w, c.w ); % velocity across from r to c

w = w0; % w(t=0) = w0
theta = theta0; % theta(t=0) = theta0

end
equations

eA == (-Km*w*sin(Nr*theta));
eB == (Km*w*cos(Nr*theta));
iA.der == ((vA-(R*iA)-eA)/L);
iB.der == ((vB-(R*iB)-eB)/L);
theta.der == w;
w.der == (Km*(-iA*sin(Nr*theta)+iB*cos(Nr*theta))-B*w)/J;

end
end
```