



Designspecifikation

Redaktör Björn Kleman

4 december 2020

Version 0.1



Status

Granskad	Robin Holmbom	
Godkänd	Lars Eriksson	



Projektidentitet

Grupp E-post: fabsu408@student.liu.se

Hemsida: TBD

Beställare: Lars Eriksson, Linköpings universitet
Tfn: 013-28 44 09
E-post: lars.eriksson@liu.se

Kund: Fredrik Wemmert, Volvo Cars Corporation
Tfn:
E-post:

Handledare: Robin Holmbom, Linköpings universitet
Tfn: 013-28 13 27
E-post: robin.holmbom@liu.se

Kursansvarig: Daniel Axehill, Linköpings universitet
Tfn: 013-28 40 42
E-post: daniel.axehill@liu.se

Projektdeltagare

Namn	Ansvar	E-post
Fabian Sund	Projektledare	fabsu408@student.liu.se
Josef Aziz	Mjukvaruansvarig	josaz558@student.liu.se
Fuad Hanic	Komponentansvarig	fuaha830@student.liu.se
Johnny Josefsson	Informationsansvarig	johjo321@student.liu.se
Sanna Renius	Komponentansvarig	sanre362@student.liu.se
Henrik Holmberg	Mjukvaruansvarig	henho614@student.liu.se
Björn Kleman	Dokumentansvarig	bjok1139@student.liu.se
Jesper Rylander	Designansvarig	jesry572@student.liu.se
Gustav Mann	Kvalitetsansvarig	gusma709@student.liu.se
Henrik Lindgren	Testansvarig	henli430@student.liu.se



INNEHÅLL

1	Översikt av systemet	1
2	Simuleringsmiljö	1
2.1	Trottelmodell	2
2.2	Insugsmodell	3
2.3	Kamfasningsmodell (VVT)	3
2.4	Modellbeteckningar	10
3	Reglersystem	12
3.1	Linjärisering och diskretisering	12
3.2	MPC	13
3.3	Målfunktion	15
3.4	Bivillkor	15
3.5	Tillstånd	16
3.6	Integralverkan	16
3.7	Observatör	17
3.8	Hantering av fel i aktuatorer	17
4	Implementering	17
4.1	Simuleringsmiljö	17
4.2	Modellbaserad prediktionsreglering	18



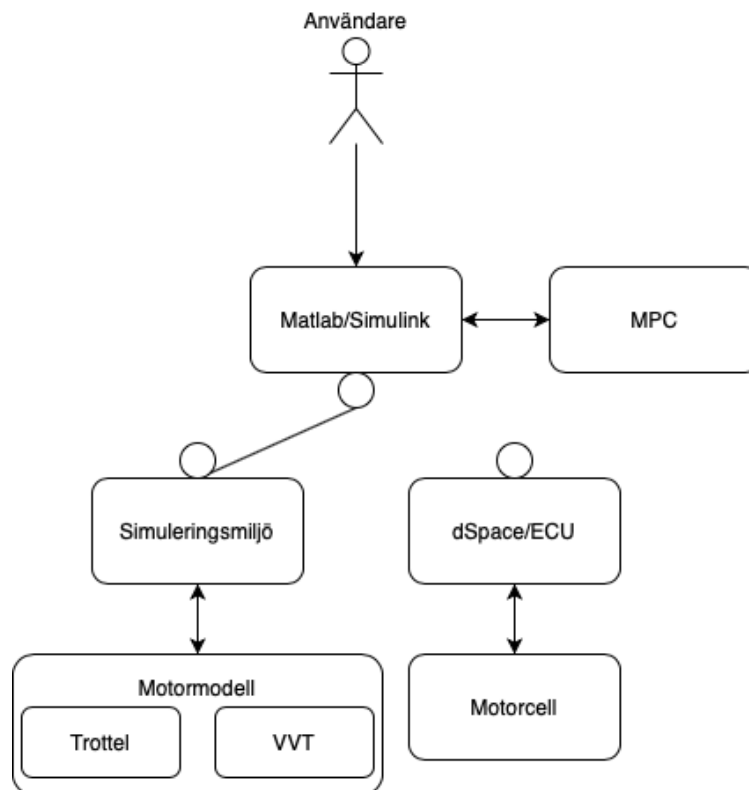
DOKUMENTHISTORIK

Version	Datum	Utförda ändringar	Utförda av	Granskad
0.1	2020-10-07	Första versionen	Projektgruppen	BK
0.2	2020-10-12	Ändringar efter kommentarer från handledare	Projektgruppen	BK
0.3	2020-11-09	VVT-modell tillagd	Projektgruppen	



1 ÖVERSIKT AV SYSTEMET

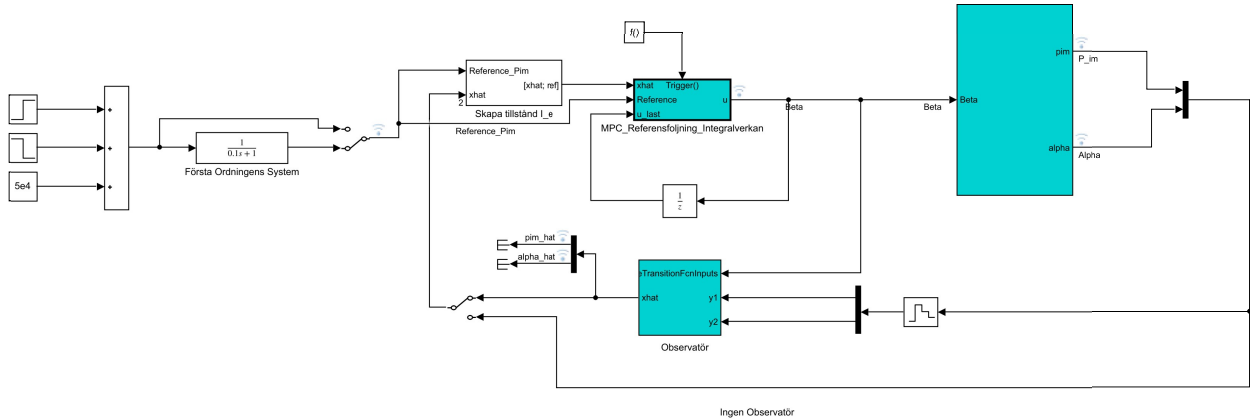
Systemet som kommer att användas för implementation av en realtids-MPC för multivariabel motorstyrning består av en simulering av motormodellen i Matlab/Simulink, ett regelsystem samt ett styrsystem som kan koppla motormodellen till en motortestcell (dSpace). Reglersystemet ska kunna hantera trotteln och kamfasning av insugsventiler. I figur 1 visas en översikt av systemet.



Figur 1: En översikt av systemet

2 SIMULERINGSMILJÖ

En simuleringsmiljö tas fram och implementeras i Simulink. Miljön utgörs av de framtagna motormodellerna (trottelmodell, kamfasningsmodell) och en modell av MPC-regulatorn.



Figur 2: Simuleringsmiljö i Simulink.

2.1 Trottellmodell

Trottellmodellen styr luftmassflödet in i insugsmodellen, se ekvation (2.1), och baseras på Ohata's Compressible Flow Model [1]. Luftmassflödet regleras med kontroll av tryck och temperatur och med utgångspunkt i trottelvinkeln α_{th} som i sin tur beror på dess referens $\alpha_{th,ref}$ enligt ekvation (2.2) där vi har infört dynamik med fördröjning.

$$\dot{m}_{at} = \frac{p_{bef,thr}}{\sqrt{RT_{bef,thr}}} A_{eff}(\alpha_{th}) \Psi(\Pi) \quad (2.1)$$

$$\dot{\alpha}_{th} = \frac{1}{\tau_{th}} (\alpha_{th,ref} - \alpha_{th}) \quad (2.2)$$

Den effektiva trottellarean beskriver flödet förbi trotteln vid vinkel α_{th} och modelleras som polynomet i ekvation (2.3).

$$A_{eff}(\alpha_{th}) = a_0 + a_1 \alpha_{th} + a_2 \alpha_{th}^2 \quad (2.3)$$

$$\Pi = \frac{p_{im}}{p_{bef,thr}} \quad (2.4)$$

Ekvationen nedan beskriver hur flödes hastigheten påverkas av tryckkvoten med hänsyn till ljudets hastighet, där $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

$$\Psi(\Pi) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(1 - \Pi_{lim}\right) \left(\Pi_{lim} + \frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)} \quad (2.5)$$

Ekvationen nedan ger en begränsning i den maximala tryckkvoten som gör så att flödet inte kan öka efter att överljudshastighet uppnås. Den senare delen av ekvationen är den kritiska tryckkvot som uppkommer då flödet går från underljuds- till överljudshastighet.

$$\Pi_{lim} = \max \left(\Pi, \left(\frac{1}{\gamma+1} \right) \right) \quad (2.6)$$



2.2 Insugsmodell

Insugsmodellen är det som kopplar ihop modellerna för trotteln och kamfasning. Trotteln justerar massflödet in i insuget, varpå kamfasningen finjusterar massflödet in i cylindrarna. Två modeller för insug presenteras i [2]. Den första är en enklare isoterm insugsmodell där temperatur och volym ses som konstant och tryckförändringen ses som skillnaden mellan dessa massflöden enligt ekvation (2.7).

$$\frac{dp_{im}}{dt} = \frac{RT_{im}}{V_{im}}(\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac}) \quad (2.7)$$

Den andra modellen är en mer avancerad adiabatisk variant som kan ses i ekvation (2.8). Förutom det som presenteras i ekvation (2.7) tas även faktumet att värmeöverföringen sällan kan ses som noll med i beräkningarna.

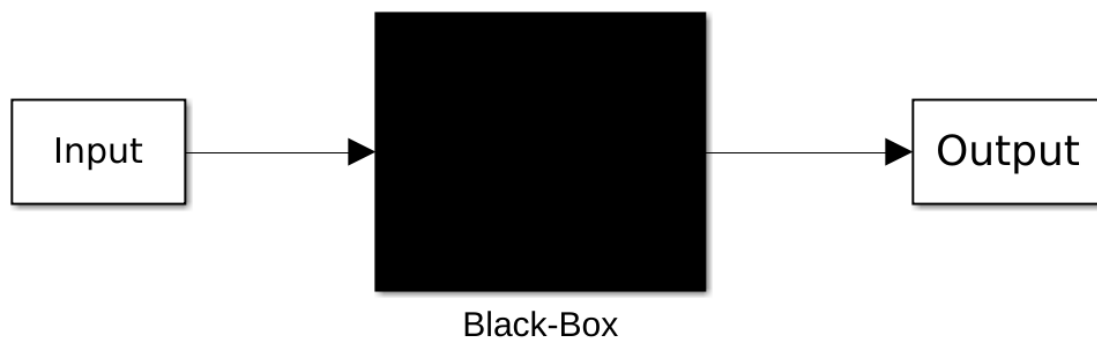
$$\begin{cases} \frac{dT_{im}}{dt} = \frac{RT_{im}}{p_{im}V_{im}c_v} [\dot{m}_{at}c_v(T_{bef,thr} - T_{im}) + R(T_{bef,thr}\dot{m}_{at} - T_{im}\dot{m}_{ac}) - \dot{Q}] \\ \frac{dp_{im}}{dt} = \frac{RT_{im}}{V_{im}}(\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac}) \end{cases} \quad (2.8)$$

2.3 Kamfasningsmodell (VVT)

Innan regulatorn för kamfasningen implementeras i testmotorn måste den testas i en simuleringsmiljö, både av säkerhetsskäl och för att antalet timmar i motorcellen är begränsade. För att utföra detta behövs en simuleringsmodell av VVT:n. Nedan presenteras tre olika alternativ hur man kan gå till väga vid modelleringen av VVT:n. Alternativ 1 baseras på en black-box som saknar fysikalisk modell, medan alternativ 2 och 3 är baserade på olika fysikaliska modeller.

2.3.1 Alternativ 1: Black-box

Denna modellering baseras inte på fysikaliska modeller utan bygger enbart på mätdata. Tester utförs för en konstant arbetspunkt där fasvinkeln för insuget varierar. Detta kommer resultera i olika massflöden vid olika fasvinklar och utifrån mätdata kommer en kurvanpassning att göras. Problematiken med denna modell är att det kan bli svårt att prediktera framtida händelser i MPC-regulatorn eftersom det inte bygger på någon fysikalisk modell och därmed svårt att få en bra reglering.



Figur 3: Modellen baseras på en Black-box som visas ovan.



Modellstrukturen som all mätdata ska anpassas efter kommer utgå från ekvation 2.9 och kan eventuellt ändras beroende på hur bra anpassningen blir.

$$\dot{m}_{air,IV} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \theta + \alpha_3 \cdot \theta^2 \quad (2.9)$$

2.3.2 Alternativ 2: Parametrisering

Nedan presenteras en fysikalisk modell för massflödet luft in i cylindern. Denna modell kommer endast att använda befintliga sensorer som mäter varvtalet, trycket i insugsröret och VVT-position. [3]

Vid konstant massflöde kan massan beräknas enligt ekvation (2.10), där Δt beskrivs i ekvation (2.11). n_r i ekvation (2.11) beskriver luften som förs in i cylindrarna varannan cykel i en fyrtakts-process.

$$m_{ac} = \dot{m}_{ac} \cdot \Delta t \quad (2.10)$$

$$\Delta t = \frac{n_r}{N_e \cdot n_{cyl}} \quad (2.11)$$

I ekvationen (2.12) beskrivs modellen för luftens massa som passerar insugsventilen. α_1, α_2 och α_3 är parametrar som beror på varvtalet och insugstrycket och tas fram med minsta kvadratmetoden. Under motortestet då all samling utav data sker, körs motorn i en stationär punkt. Detta ger att massflödessensornsvärde motsvarar massflödet frisk luft genom ventilerna, det vill säga $\dot{m}_{air,IV} = \dot{m}_{im}$.

$$m_{air,IV} = \alpha_1(N_e, p_{im})\rho_{im}V_{IVC} - \alpha_2(N_e, p_{im})\frac{OF}{N_e} - \alpha_3(N_e, p_{im})V_{EVC} \quad (2.12)$$

Ekvation (2.13) beskriver överlappet mellan IVO och EVC.

$$OF = \int_{IVO}^{IV=EV} A_{IV}d\theta + \int_{IV=EV}^{EVC} A_{EV}d\theta \quad (2.13)$$

Modellen kan då summeras på matrisform enligt ekvation (2.14).

$$Y = X\alpha \quad (2.14)$$

Där Y, α och X beskrivs i ekvationerna (2.15)-(2.17) och n är antalet mätpunkter.

$$Y = \begin{pmatrix} m_{ac}(1) \\ \dots \\ m_{ac}(n) \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$



$$X = \begin{pmatrix} \rho_{im}(1)V_{IVC}(1) & \frac{OF(1)}{N_e} & V_{EVC}(1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_{im}(n)V_{IVC}(n) & \frac{OF(n)}{N_e} & V_{EVC}(n) \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

För att sedan beräkna parametrarna i ekvation (2.16) används ekvation (2.18).

$$\alpha = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2.18)$$

2.3.3 Alternativ 3: Parametrisering

Nedan presenteras ytterligare en modell som bygger på fysikaliska ekvationer.

Vid IVC gäller följande ekvationer:

$$V_{IVC} = V_{air} + V_{res} \quad (2.19)$$

$$m_{air} = \frac{p_{IVC} V_{air}}{RT_{air}} \quad (2.20)$$

$$\dot{m}_{air} = m_{air} \frac{N n_{cyl}}{n_r} = \frac{p_{IVC} N n_{cyl}}{RT_{air} n_r} V_{air} \quad (2.21)$$

V_{res} kan bestämmas med följande formel:

$$V_{res} = V_b \left(\frac{p_{em}}{p_{im}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.22)$$

V_{res} är den partiella volymen residualgaser som beräknas efter expansion då p_{em} omvandlas till p_{IVC} .

$$V_{res} \propto V_{exp} \left(\frac{p_{em}}{p_{IVC}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.23)$$

V_{exp} är volymen av gaserna innan expansion och definieras enligt nedan:

$$V_{exp} = V_{IVO} + V_{bf} \quad (2.24)$$

där V_{IVO} är cylinder volymen vid IVO och V_{bf} är tillbaka flödet av avgaserna vid EVC.

$$\dot{V}_{bf} = Av \quad (2.25)$$

där A är den genomsnittliga flödes arean som definieras som följande:

$$A = \begin{cases} \frac{\pi V_d OF}{\theta_{ol}}, & \theta_{ol} > 0 \\ 0, & \text{i övriga fall} \end{cases} \quad (2.26)$$



Ekvation 2.27 beräknar överlappet mellan IVO och EVC.

$$OF = \frac{D_i \int_{IVO}^{IV=EV} L_i d\theta + D_e \int_{IV=EV}^{EVC} L_e d\theta}{V_d} \quad (2.27)$$

D_i och D_e är diametrarna för insug- och avgasventilerna, medan L_i och L_e är ventil lyften för insug respektive avgasventilerna. V_d är cylindervolymen och θ_{ol} är storleken på överlappet.

v är flödes hastigheten enligt Bernoulli's ekvation och är proportionerlig enligt ekvation 2.28,

$$v \propto \sqrt{\frac{p_{em} - p_{im}}{\rho_e}} \quad (2.28)$$

där ρ_e är densiteten av avgaserna. Trycket för insugsröret betecknas p_{im} och trycket för grenröret betecknas p_{em} . För en ideal cykel med konstant volym kan följande uttryck härledas:

$$T_6 = T_1 \left(\frac{p_e}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \left[1 + \frac{q}{c_v T_1 r_c^{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.29)$$

$$C = \left[1 + \frac{q}{c_v T_1 r_c^{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.30)$$

$$q = \frac{m_f}{m_{tot}} q_{LHV} \text{ (Stökiometrisk)} \quad (2.31)$$

Följande approximationer används, $T_6 = T_{em}$ och $T_1 = T_{im}$, vilket ger uttrycket för ekvation 2.32,

$$T_{em} = T_{im} \left(\frac{p_e}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} C \quad (2.32)$$

och nu kan flödes hastigheten skrivas om enligt nedan:

$$\begin{aligned} v &\propto \sqrt{\frac{RT_{em}}{p_{em}}} (p_{em} - p_{im}) = C^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \sqrt{\frac{RT_{im}}{p_{em}}} (p_{em} - p_{im}) = \\ &= C^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \sqrt{RT_{im} \left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}} \right)} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Antagandet att C och R är konstanta ger följande:

$$\therefore v \propto \left(\frac{p_{em}}{p_{im}} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \sqrt{T_{im} \left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}} \right)} \quad (2.34)$$

$$\therefore \dot{V}_{bf} \propto \left(\frac{p_{em}}{p_{im}} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \sqrt{T_{im} \left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}} \right)} \frac{OF}{\theta_{ol}} \quad (2.35)$$

$$V_{bf} = \int_{IVO}^{EVC} \dot{V}_{bf} dt \approx \dot{V}_{bf} \frac{\theta_{ol}}{N} \quad (2.36)$$

$$V_{bf} \propto \left(\frac{p_{em}}{p_{im}} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \sqrt{T_{im} \left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}} \right)} \frac{OF}{N} \quad (2.37)$$



Därmed kan ekvationerna nedan erhållas.

$$V_{exp} = V_{IVO} + \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \sqrt{T_{im}\left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}}\right) \frac{OF}{N}} \quad (2.38)$$

$$V_{res} \propto V_{exp} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = V_{IVO} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} + \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \sqrt{T_{im}\left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}}\right) \frac{OF}{N}} \quad (2.39)$$

Modellen kan nu skrivas som följande uttryck där inlopps luften till cylindern kan antas ha temperaturen T_{im} så att $T_{air} = T_{im}$, samt antagandet att $p_{IVC} = p_{im}$. Detta resulterar i följande ekvationer:

$$V_{air} = c_1 V_{IVC} - c_2 V_{IVO} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - c_3 \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \sqrt{T_{im}\left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}}\right) \frac{OF}{N}} \quad (2.40)$$

Vid insättning av V_{air} i ekvation 2.21 kan massflödet beräknas, vilket resulterar i ekvation 2.41.

$$\dot{m}_{air} = \frac{p_{im} N n_{cyl}}{RT_{im} n_r} \left[c_1 V_{IVC} - c_2 V_{IVO} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} - c_3 \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \sqrt{T_{im}\left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}}\right) \frac{OF}{N}} \right] \quad (2.41)$$

I modellen ovan är $\gamma = 1.35$, vilket är taget ur [4]. Ett alternativ till denna modell är att även sätta γ som okänd och då ser modellen ut som följande:

$$\dot{m}_{air} = \frac{p_{im} N n_{cyl}}{RT_{im} n_r} \left[c_1 V_{IVC} - c_2 V_{IVO} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{1}{c_4}} - c_3 \left(\frac{p_{em}}{p_{im}}\right)^{\frac{c_5+1}{2c_5}} \sqrt{T_{im}\left(1 - \frac{p_{im}}{p_{em}}\right) \frac{OF}{N}} \right] \quad (2.42)$$

2.3.4 Alternativ 4: Parametrisering

Nedan presenteras ytterligare en fysikalisk modell. Ekvation (2.43) beskriver hur luftmassflöde som flödar in i cylindern beror på residualgaser och bränslet som sprutas in. Vid testfall där VVT:n är fixt används ekvation (2.44) där den volumetriska effektiviteten (η_{vol}) sätts antingen till ett fast värde eller genom en mappning.

$$\dot{m}_{ac} = n_{cyl}(1 - x_{rg})m_{tot} \frac{N_e}{120} - \dot{m}_{fi} \quad (2.43)$$

$$\dot{m}_{ac} = \eta_{vol} \frac{V_{IVC} N_e p_{im}}{n_r RT_{im}} \quad (2.44)$$

Bränsleflödet och den totala massan i cylindern som används i de två föregående ekvationerna beskrivs i ekvation (2.45) respektive (2.46),

$$\dot{m}_{fi} = \frac{\dot{m}_{ac}}{\lambda(A/F)_s} \quad (2.45)$$

$$m_{tot} = \frac{p_{IVC} V_{IVC}}{RT_{IVC}} \quad (2.46)$$

Trycket i cylindrarna beskrivs i ekvation (2.47) där β_1 och β_2 är skattningsparametrar.

$$p_{IVC} = \beta_1 p_{im} + \beta_2 \quad (2.47)$$



Cylindervolymen V_{IVC} beskrivs i ekvation (2.48) som en funktion av vinkeln på vevaxeln.

$$V_{IVC} = V(\theta_{IVC}) = V_{tdc} + \frac{\pi B_{cyl}^2}{4} (l + a - a \cdot \cos(\theta_{IVC})) - \sqrt{l^2 - (a \cdot \sin(\theta_{IVC}))^2} \quad (2.48)$$

Ekvation (2.49) och (2.50) beskriver temperaturen i cylindern efter stängning av insugsventil respektive temperatur av ny luft in i cylindern. I ekvation har en modellförenkling gjorts då temperatur av ny luft in i cylindern T_{fc} approximeras till insugstemperaturen. Från insuget till cylindrarna passerar luften varma rör vilket har påverkan på luftens temperatur.

$$T_{IVC} = (1 - x_{rg})T_{fc} + x_{rg}T_{rg} \quad (2.49)$$

$$T_{fc} = T_{im} \quad (2.50)$$

Residualgasmängden beskrivs i ekvation (2.51) som

$$x_{rg} = a_1 \left(\frac{p_{em}}{p_{IVC}} \right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \frac{OF}{N_e} \sqrt{\frac{|p_{em} - p_{im}|}{\rho_{fc}}} + a_2 \cdot \frac{1}{r_c} \left(\frac{p_{em}}{p_{im}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.51)$$

Ekvation (2.52) beskriver luftens densitet med den ideala gaslagen och ekvation (2.53) är överlappningsfaktorn som beror på kamfasvinklarna. α_1 , α_2 och α_3 är skattningaparametrar.

$$\rho_{fc} = \frac{p_{IVC} V_{IVC}}{RT_{IVC}} \quad (2.52)$$

$$OF = \frac{L_{v,max} D_v}{B_{cyl}} (\alpha_1 \theta_0^2 + \alpha_2 \theta_0 + \alpha_3) \quad (2.53)$$

Ekvationen nedan beskriver överlappningsvinkeln, θ_0 . En förenkling som görs här är att kamfasningen av avgasventilen, θ_0 , sätts till noll.

$$\theta_0 = \theta_{EVC} - \theta_{IVO} \quad (2.54)$$

Denna modellen har använts i projektet de två senaste åren [5]. Svårigheten med den här modellen är bestämma andelen residualgaser i cylindern, då parametreringen av ekvation (2.51) kan vara problematisk. Detta eftersom andelen residualgaser påverkas av både varvtal som varierar och överlapp. Detta gäller även residualgastemperaturen, T_{rg} i ekvation (2.49), som kan bli svårt att beräkna eller approximera.

2.3.5 Modellering av kamfasning

Ekvation (2.53) beskriver överlappningsfaktorn och denna kan resultera i modelleringskomplikationer. Överlappningsfaktorn gör att den friska luften som kommer in i IVC kan strömma igenom EVC ut till grenröret direkt. Gaskonsistensen kan inte heller bestämmas vid EVC när man använder sig av överlapp.

Då överlapp inte används kan vissa antaganden göras. Grenröret och EVC cylinder tryck som är fylld av residualgaser kan antas vara samma. IVC trycket kan även approximeras till insugstrycket.

Modelleringen ska i första hand bara hantera insugskamfasningen, alltså kommer endast insugskamfasningen att regleras. Avgaskamfasningen kommer att sättas till en fix vinkel. Den kommer även bara testas för ett varvtal.



Modellering kommer till en början att utföras på alternativ 1 som innehåller en black-box, där man gör en kurvanpassning utifrån mätdata som sedan valideras. Om ett önskat resultat erhålls med denna modell så kommer arbetet att försätta med den modell och i mån av tid kommer även alternativ 2 ses över. Om alternativ 1 inte ger ett bra resultat så kommer alternativ 2 och 3 användas och modellering av dessa göras.



2.4 Modellbeteckningar

I tabellen nedan finns alla modellbeteckningar med enklare beskrivning och dess enheter.

Beteckning	Beskrivning	Enhet
\dot{m}_{at}	Luftmassflöde efter trottel	[kg/s]
\dot{m}_{ac}	Luftmassflöde före cylindern	[kg/s]
\dot{m}_{fi}	Injicerat bränsleflöde	[kg/s]
m_{tot}	Totala massan i cylindern	[kg]
$m_{air,IV}$	Luftmassa genom insugsventilen	[kg]

Tabell 1: Modellbeteckningar för olika massor och massflöden.

Beteckning	Beskrivning	Enhet
$p_{bef,thr}$	Tryck före trottel	[K]
p_{IVC}	Tryck i cylindern när insugsventilen är stängd	[Pa]
p_{IM}	Insugstryck	[Pa]
p_{EM}	Grenrörstryck	[Pa]

Tabell 2: Modellbeteckningar för tryck.

Beteckning	Beskrivning	Enhet
$T_{bef,thr}$	Temperatur före trottel	[K]
T_{IM}	Insugstemperatur	[K]
T_{IVC}	Temperatur i cylindern efter stängning av insugsventilen	[K]
T_{fc}	Temperatur av ny luft i cylindern	[K]
T_{rg}	Residualgastemperatur	[K]

Tabell 3: Modellbeteckningar för temperaturer.

Beteckning	Beskrivning	Enhet
V_{IVC}	Volymen i cylindern vid IVC	[m^3]
V_{EVC}	Volymen i cylindern vid EVC	[m^3]
V_{im}	Insugsvolym	[m^3]
A_{IV}	Insugsventilens effektivarea	[m^2]
A_{EV}	Avgasventilens effektivarea	[m^2]

Tabell 4: Modellbeteckningar för volymer och areor.



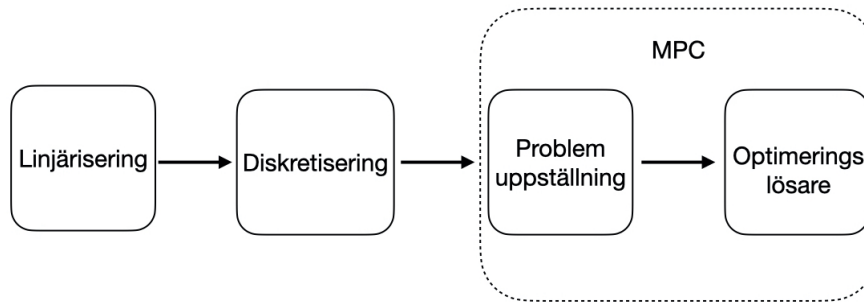
Beteckning	Beskrivning	Enhet
θ_0	Överlappningsvinkel	[$^{\circ}$]
θ	Kamfasvinkel	[$^{\circ}$]
OF	Överlappsfaktor	[$m^2 \cdot ^{\circ}$]
α_{th}	Trottelvinkel	[$^{\circ}$]
$\alpha_{th,ref}$	Referenstrottelvinkel	[$^{\circ}$]
ρ_{IM}	Luftens densitet i insugsröret	[Pa]
R	Allmänna gaskonstanten	[$J/(mol \cdot K)$]
N_e	Varvtal	[RPM]
n_{cyl}	Antal cylindrar	[st]
\dot{Q}	Värmeöverföring	[J]
x_{rg}	Residualgasmängd	[-]
Ψ	Tryckkvotens påverkan på flödes hastigheten	[-]
λ	Lambdavärde	[-]
Π	Tryckkvot	[-]

Tabell 5: Övriga modellbeteckningar



3 REGLERSYSTEM

Det huvudsakliga syftet med detta projekt är att studera hur en MPC-regulator kan användas i motorstyrningssammanhang. För att kunna styra både trotteln och VVT, vilket är ett MIMO-system, ska en flervariabel MPC-regulator konstrueras. En övergripande figur över reglersystemet visas i figur 4.



Figur 4: Sempel beskrivande bild av regleringssystemet

3.1 Linjärisering och diskretisering

Den regulator som utvecklas för reglering av trotteln och VVT måste hantera de olinjära modellerna för nämnda komponenter. Detta hanteras genom linjärisering och diskretisering av modellen inför implementering i MPC-regulatorn. För att hantera linjäriseringen av modeller finns ett flertal alternativa metoder. De linjäriseringsmetoder som valts för implementering och undersökning i detta projekt är Ny linjärisering vid varje iteration och Linjärisering kring tidigare beräknad trajektoria.

3.1.1 Ny linjärisering vid varje iteration

För ett olinjärt system med n_x tillstånd, n_u in-värden och n_o ut-värden, kan vektorerna $x \in R^{n_x}$, $u \in R^{n_u}$, $y \in R^{n_o}$ som beskriver systemet definieras. Systemet kan sedan beskrivas på tillståndsform enligt nedan. [6]

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.1)$$

$$y = z(x, u) \quad (3.2)$$

Detta olinjära system kan nu linjäriseras runt en, av optimeringsproblemet specificerad, punkt (x_0, u_0) genom att finna gradientmatriserna för den valda punkten. Detta görs genom beräkningar av de jacobianska submatriserna med ekvationerna (3.1) och (3.2).

$$A_{i,j} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{x_0, u_0} \quad (3.3)$$

$$B_{i,j} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right|_{x_0, u_0} \quad (3.4)$$



$$C_{i,j} = \left. \frac{\partial z_i}{\partial x_j} \right|_{x_0, u_0} \quad (3.5)$$

$$D_{i,j} = \left. \frac{\partial z_i}{\partial u_j} \right|_{x_0, u_0} \quad (3.6)$$

Den nya linjäriserade modellen utgörs av de sammanslagna jacobianska submatriserna $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, $C_{i,j}$ och $D_{i,j}$. Den önskade operationspunkten definieras av vektorerna x_0 , \dot{x}_0, u_0 , som summeras under konstanten K . De linjäriserade vektorerna beskrivs nu med beteckningarna x , y , u .

$$\dot{x} = Ax + Bu + K \quad (3.7)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.8)$$

3.1.2 Linjärisering kring tidigare beräknad trajektor

Linjäriseringen kring en tidigare beräknad trajektor genomförs med utgångspunkt i Johan Löfbergs rapport från 1999 [7]. Kort beskrivet görs linjäriseringen kring trajektorian genom att integrera från nuvarande punkt till nästkommande punkt.

3.2 MPC

Modellbaserad prediktionsregulator, även känd som MPC, optimerar nuvarande tidssteg och tar även hänsyn till framtida tidssteg. Fördelen med att använda en MPC-regulator är att den kan hantera referensföljning och integralverkan samtidigt som den kan avgränsa systemet med olika bivillkor. Regulatorn kan dessutom hantera flertalet in- och utsignaler. Anledningen till att dessa metoder inte använts tidigare i motorer är dess komplexitet vid användning av alltför små tidskonstanter. Då mjukvaran i fordon utvecklats allt mer är implementeringen av dessa regulatorer möjlig.

3.2.1 Intern modell

En MPC-regulator utgår från en intern modell av systemet för att modellera och förutsäga systemets beteende. Den interna modellen kan vara linjär, då ett konvext optimeringsproblem erhålls, eller icke-linjär, då ett icke-konvext optimeringsproblem erhålls. Av enkelhetsskäl kommer endast en linjär inre modell implementeras i MPC-regulatorn, eftersom en sådan innebär att MPC-regulatorns optimeringsproblem garanterat kan finna ett globalt minimum. Motormodellen är olinjär och måste linjäriseras för att kunna användas som intern modell i den linjära MPC-regulatorn. Hur detta görs beskrivs i kapitel 3.1.

3.2.2 Diskretisering

För att den linjäriserade modellen ska kunna konverteras till Simulink diskretiseras denna genom Eulers stegmetod. Nedan presenteras stegmetoden.

$$x_{k+1} = x_k + T_s f(x_k, u_k) \quad (3.9a)$$

$$f(x_k, u_k) = Ax_k + Bu_k \quad (3.9b)$$

$$x_{k+1} = [I + T_s A]x_k + T_s Bu_k + T_s K = Fx_k + Gu_k + K \quad (3.9c)$$



Från diskretiseringen ovan erhålls det rekursiva uttrycket för modellen:

$$x_{k+2} = Fx_{k+1} + Gu_{k+1} + K = F^2x_k + FG u_k + Gu_{k+1} + K(F + I) \quad (3.10)$$

Modellen kan därmed uttryckas som:

$$\mathcal{X} = \mathcal{F}x_k + \mathcal{G}\mathcal{U} + \mathcal{K} \quad (3.11)$$

Där $\mathcal{X}, \mathcal{U}, \mathcal{F}, \mathcal{G}, \mathcal{K}$ presenteras som

$$\mathcal{X} = \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k+2} \\ \vdots \\ x_{k+N-1} \end{bmatrix} \quad \mathcal{U} = \begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+2} \\ \vdots \\ u_{k+N-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{F} = \begin{bmatrix} I \\ F \\ \vdots \\ F^{N-1} \end{bmatrix} \quad \mathcal{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ G & 0 & 0 & \dots & 0 \\ FG & G & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ F^{N-2}G & \dots & FG & G & 0 \end{bmatrix} \quad \mathcal{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ F + I \\ F^2 + F + I \\ \vdots \\ F^{N-2} + \dots + F^2 + F + I \end{bmatrix} \cdot K$$

3.2.3 Optimeringsproblem

MPC regulatorm löser ett optimeringsproblem där en kostnadsfunktion J_N minimeras med hänsyn till bivillkor. Beteckningen N står för prediktionshorisont, hur många tidsenheter framåt i tiden problemet ska optimeras. Viktmatriserna Q_1 och Q_2 anger hur mycket tillstånden respektive insignaler straffas i kostnadsfunktionen. I ekvation (3.12) syns den generella kostnadsfunktionen.

För att utnyttja referensföljning hos tillstånden kan denna utökas med en referenssignal vilket då ger ekvation (3.13). Här straffas skillnaden mellan tillstånden och referenssignalen.

$$J_N(x(k)) = \sum_{j=0}^{N-1} \|z(k+j)\|_{Q_1}^2 + \|u(k+j)\|_{Q_2}^2 \quad (3.12)$$

$$J_N(x(k)) = \sum_{j=0}^{N-1} \|z(k+j) - r(k+j)\|_{Q_1}^2 + \|u(k+j)\|_{Q_2}^2 \quad (3.13)$$

MPC regulatorns optimeringsproblem löses genom ett kvadratisk programmeringsproblem (QP-problem) på formen i ekvation (3.14).

$$\min_U \frac{1}{2} w^T H w + f^T w \quad (3.14a)$$

$$\text{Bivillkor } A_u U \leq b_u \quad (3.14b)$$



Med matriserna från diskretiseringen 3.2.2 och referensföljning fås följande målfunktion i ekvation (3.15).

$$\min_U \frac{1}{2} U^T (\mathcal{G}^T \mathcal{M}^T Q_1 \mathcal{M} \mathcal{G} + Q_2) U + (\mathcal{G}^T \mathcal{M}^T Q_1 (\mathcal{M} \mathcal{F} x(k) - \mathcal{R}))^T U \quad (3.15a)$$

$$\text{Bivillkor } A_u U \leq b_u \quad (3.15b)$$

3.2.4 Kostnadsfunktion med referensföljning och integralverkan

En alternativ kostnadsfunktion med referensföljning och integralverkan som kan testas är att utnyttja [8] på sida 165, där ändringarna på insignalerna kan formuleras genom:

$$\begin{bmatrix} u(k) - u(k-1) \\ u(k+1) - u(k) \\ \vdots \\ u(k+N-1) - u(k+N-2) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} I & & & & \\ -I & I & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & & -I & I \end{bmatrix}}_{\Omega} U - \underbrace{\begin{bmatrix} u(k-1) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_{\delta}$$

Kvadratproblemet i ekvation (3.15) kan utvidgas för integralverkan genom matriserna Ω och δ vilket ger det nya utökade kvadratproblemet i (3.16). Kostnadsfunktionen blir då enligt ekvation (3.17).

$$\min_U \frac{1}{2} U^T (\mathcal{G}^T \mathcal{M}^T Q_1 \mathcal{M} \mathcal{G} + \Omega^T Q_2 \Omega) U + (\mathcal{G}^T \mathcal{M}^T Q_1 (\mathcal{M} \mathcal{F} x(k) - \mathcal{R}) - \Omega^T Q_2 \delta)^T U \quad (3.16a)$$

$$\text{Bivillkor } A_u U \leq b_u \quad (3.16b)$$

$$J_N(x(k)) = \sum_{j=0}^{N-1} \|z(k+j) - r(k+j)\|_{Q_1}^2 + \|u(k+j) - u(k+j-1)\|_{Q_2}^2 \quad (3.17)$$

3.3 Målfunktion

Två målfunktioner, en som minimerar bränsleförbrukning genom att bland annat minimera pumpförlusten och en målfunktion som maximerar momentet.

3.4 Bivillkor

Regleringen som sker i MPC tar hänsyn till definierade bivillkor. Dessa bivillkor definieras för att förebygga oförutsedda problem som kan tänkas uppstå i systemet. Bland dessa inkluderas fel i aktuatorer, begränsad styr- och utsignal till trottell och VVT. Trottell och VVT är begränsade till max och min läge som kan definieras på olika sätt, t.ex. vinkel eller procent. Ytterligare bivillkor kan tilläggas senare.

Bivillkor för VVT: $u_{min} \leq u \leq u_{max}$

Bivillkor för trottell: $u_{min} \leq u \leq u_{max}$



3.5 Tillstånd

De preliminära tillstånden är

$$x = \begin{bmatrix} p_{im} \\ \alpha_{th} \\ \theta_{ivo} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

där p_{im} är insugstryck, α_{th} trottelvinkel, θ_{ivo} kamfasningsvinkel och I_e integralverkan.

$$z = Mx = \begin{bmatrix} p_{im} \\ I_e \end{bmatrix} \Rightarrow z = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} p_{im} \\ \alpha_{th} \\ \theta_{ivo} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.6 Integralverkan

Ett sätt att ta med integralverkan för att minska det statiska felet är att ta med integralen av felet som ett tillstånd. Det statiska felet, e , beskrivs i ekvation (3.20).

$$e = Y - R = C\hat{x} - R \quad (3.20)$$

Från integrering av felet e införs ett nytt tillstånd I_e enligt:

$$I_e = \int e dt \quad (3.21)$$

$$\dot{I}_e = e \quad (3.22)$$

3.6.1 Algoritm

MPC-algoritmen genomför följande steg:

1. Mät $x(k)$ eller skatta med en observatör utifrån mätningar av $y(k)$
2. Räkna ut styrsekvensen $u(k+j)$, där $j = 0, 1, \dots, N-1$, genom att lösa minimeringsproblemet för MPC-regulatorn
3. Ställ ut första elementet $u(k)$ i styrsignalssekvensen
4. Uppdatera tiden: $k := k+1$
5. Upprepa från steg 1 igen



3.7 Observatör

För att förbättra skattningen av relevanta tillstånd kan en observatör behöva användas. Ekvationen för en observatör ges av:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K(y(k) - C\hat{x}(k)) \quad (3.23a)$$

$$(3.23b)$$

Ett sätt att välja observatörsförstärkningen K är att använda ett Kalmanfilter för linjära system eller Extended Kalman Filter (EKF) för olinjära system. K bestäms på olika sätt beroende på om det är kontinuerlig eller diskret tid. Nedan är kalmanfilter-algoritmen beskrivet på diskret tid:

1. Mätuppdatering

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + P_{k|k-1}H_k^T((H_kP_{k|k-1}H_k^T + R_k)^{-1})(y_k - H_k\hat{x}_{k|k-1}) \quad (3.24)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - P_{k|k-1}H_k^T((H_kP_{k|k-1}H_k^T + R_k)^{-1})H_kP_{k|k-1} \quad (3.25)$$

2. Tidsuppdatering

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k\hat{x}_{k|k} + G_{u,k}u_k \quad (3.26)$$

$$P_{k+1|k} = F_kP_{k|k}F_k^T + G_{v,k}Q_kG_{v,k}^T \quad (3.27)$$

där Kalmanförstärkningen är:

$$K_k = P_{k|k-1}H_k^T(H_kP_{k|k-1}H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3.28)$$

F är A-matrisen i diskret tid, G_u är B-matrisen i diskret tid, G_v är matrisen som beskriver störningarna (om nödvändigt). H är C-matrisen i diskret tid. Q_k är korsvarians-matrisen för störningarna och R_k är korsvarians-matrisen för mätbruset.

3.8 Hantering av fel i aktuatorer

Fel i aktuatorer behandlas med en *if* sats för att kolla ifall den trasig eller ej. Ifall den är trasig sätts positionen till fix genom bivillkor.

4 IMPLEMENTERING

De framtagna delarna för simuleringsmiljön och reglersystemet kommer att implementeras i matlab och simulink, och via dSpace kunna kopplas med motorcellen. Här beskrivs hur systemets delar ska införas och sammanföras.

4.1 Simuleringsmiljö

Grunden till en simuleringsmiljö i Simulink finns tillgänglig från tidigare års projekt. Vid behov kan miljön även komma att utökas av årets projektgrupp. I simuleringsmiljön kan de modeller som tagits fram simuleras och valideras mot data från labbtester på den verkliga motorn. För att resultat ska kunna återskapas i så hög utsträckning som möjligt dokumenteras vilka tester som lett till vilka resultat.

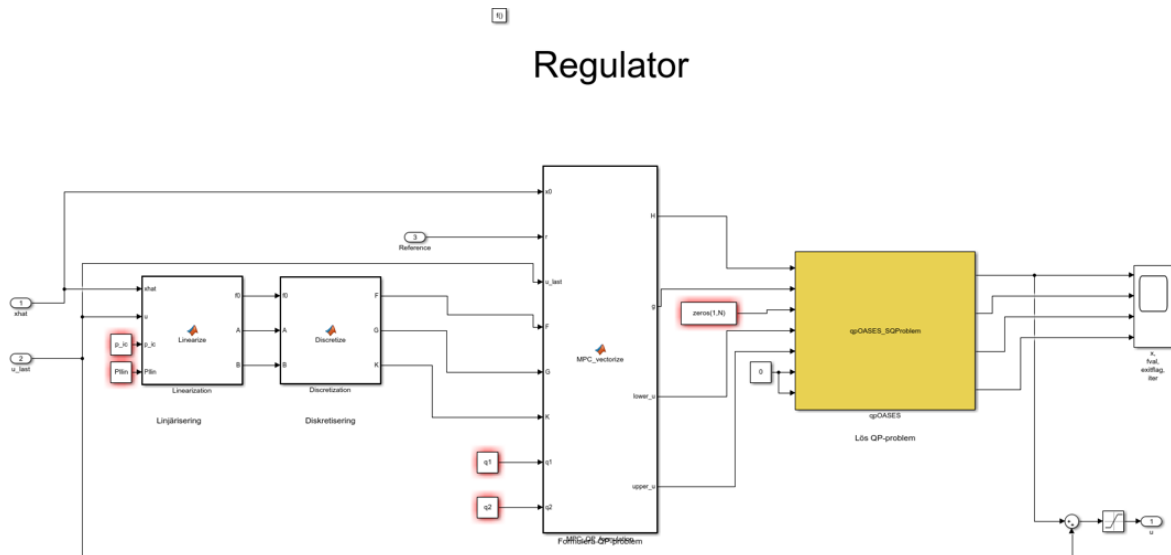
För att simuleringsmiljön ska vara så användarvänlig som möjligt dokumenteras instruktioner för hur modellerna i simulink används och vad respektive subsystem gör. Simuleringsmodellen ska även byggas modulärt - man ska enkelt kunna byta ut t.ex. en trottellmodell mot en ny version genom att byta ut ett block.

4.2 Modellbaserad prediktionsreglering

I det här kapitlet beskrivs hur MPC-regulatorn som ska tas fram under projektet kommer att se ut och fungera.

4.2.1 Reglersystem

Regulatorn kommer vara uppbyggd i simulink med olika block för varje delmoment. Nedan är ett exempel på hur regulatorn är tänkt att byggas i simulink:



Figur 5: Exempel på en regulatorstruktur.

Där blocken är kopplade till varsin Matlab-funktion, förutom QP-lösaren som fås som redan given kod. I Matlab kommer bland annat viktmatriser och tidshorisont definieras. Dessa parameterar justeras tills systemet regleras enligt kravspecifikation.



REFERENSER

- [1] R. Holmbom and L. Eriksson, "Analysis and development of compact models for mass flows through butterfly throttle valves," *SAE Technical Paper 2018-01-0876*, vol. 1, 2018.
- [2] L. Eriksson and L. Nielsen, *Modeling and Control of Engines and Drivelines*. John Wiley Sons, Ltd, 2014.
- [3] T. Leroy, G. Alix, J. Chauvin, A. Duparchy, and F. L. Berr, "Modeling fresh air charge and residual gas fraction on a dual independent variable valve timing si engine," *IFP, France*, 2008.
- [4] R. Holmbom, "Vvt modell idea," *SAE Technical Paper 2018-01-0876*, vol. 1, 2020.
- [5] J. Li, V. Julien, and Y. Hakan, "Parameterization and simulation for a turbocharged spark ignition direct injection engine with variable valve timing," *SAE World Congress Exhibition*, 2009.
- [6] Z. Altay, R. Bexultan, A. Olzhas, and V. Atakan, "Successive linearization based model predictive control of variable stiffness actuated robots," *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, vol. 1, pp. 1774–1779, 2017.
- [7] J. Löfberg, "Mpc for nonlinear systems using trajectory linearizations," *Linköping University Department of Electrical Engineering*, vol. 1, p. 1, 1999.
- [8] M. Enquist, T. Glad, S. Gunnarsson, P. Lindskog, L. Ljung, J. Löfberg, T. McKelvey, A. Stenman, and J.-E. Strömberg, *Industriell reglerteknik Kurskompendium*. Linköpings universitet, 2014.