Systemteknik/Processreglering

Laboration 1

Empirisk PID-reglering

Institutionen för reglerteknik
Lunds tekniska högskola
Senast uppdaterad januari 2011

Praktiska saker

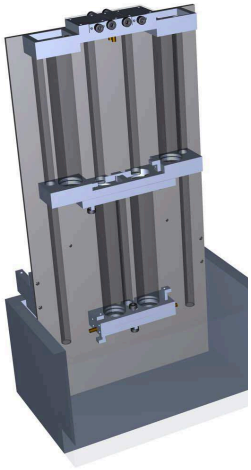
Ni loggar in med användarnamnet `lab_tanka`. Lämna lösenordsfältet blankt. Vid inloggning startar laborationens grafiska användargränssnitt i två fönster samt MATLAB, utan grafiskt användargränssnitt, i ett separat fönster. (Detta sker automatiskt.)

Skriv under laborationen ner dina resultat i handledningens därtill avsedda fält. Du kommer att behöva dessa under laboration 2.

1. Inledning

Syftet med denna laboration är att ge förståelse för grundläggande begrepp och principer inom reglertekniken. Vi skall också närmare bekanta oss med PID-regulatorn, den inom industrin vanligast förekommande regulatorn.

Laborationsprocessen består av en pump och två seriekopplade tankar. (I själva verket består processen av två pumpar och fyra tankar, men vi kommer endast att använda den vänstra halvan av uppsättningen, som visas i figur 1. I en PC finns en implementering av en PID-regulator med hjälp av vilken vi reglerar vattennivån i tankarna.



Figur 1 Laborationsuppställning (varav vänstra halvan används)

Förberedelser

För att få ut mesta möjliga av laborationen ska du känna till följande begrepp:

- öppet respektive slutet system
- blockschema
- börvärde (referensvärde), ärvärde (mätsignal) och styrsignal

Du skall också ha läst igenom denna laborationshandledning. **Studera appendix A, B om användargränssnittet innan du går vidare med laborationen.** Se särskilt till att reglagen på processen är inställda enligt vad som föreskrivs i appendix. Fråga din laborationshandledare om något är oklart.

2. Grundläggande begrepp

Detta avsnitt behandlar viktiga begrepp inom reglertekniken. Genom att manuellt styra vattennivån i tankarna ska vi också bekanta oss med processens egenskaper.

Vad är bra reglering?

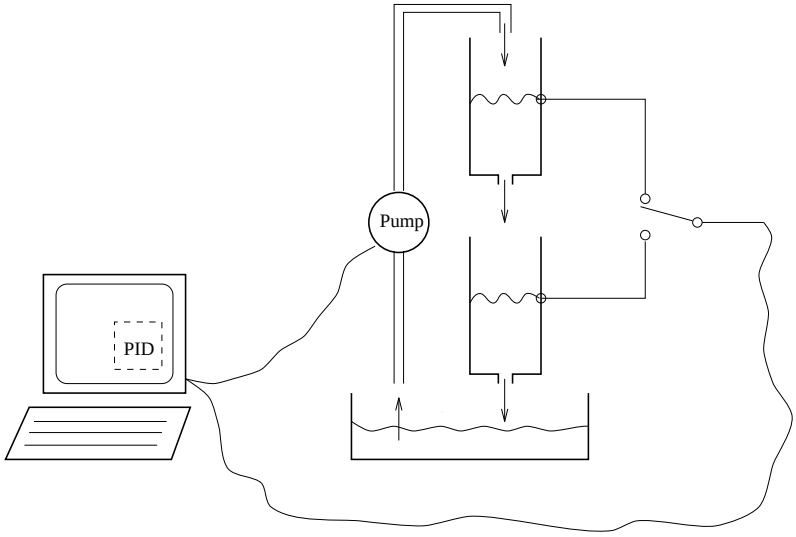
Anledningen till att man vill reglera en process är att man vill att den ska uppföra sig på ett önskat sätt. Det kan innebära att man vill att processen skall bli mer exakt, mer tillförlitlig eller mer ekonomisk. I vissa fall är processen instabil och bra reglering är nödvändig för att den inte ska gå sönder (vilket ibland kan ge stora skador). Bra reglering betyder alltså olika saker för olika tillämpningar. När det gäller tankprocessen i denna laboration så kan följande krav på regleringen vara lämpliga:

- Vi vill naturligtvis att den verkliga nivån i tanken sammanfaller med den önskade (så att ärvärde = börvärde).
- Om börvärdet ändras så vill vi att tanknivån snabbt skall ställa in sig på det nya värdet utan stora överslängar.
- Regleringen bör kunna hantera laststörningar i form av ett yttre flöde samt mätbrus, vilket är det samma som en störning av mätsignalen.
- Slutligen vill vi inte att styrsignalen till pumpen skall vara för “ryckig” eftersom detta medför onödigt slitage.

Dessa egenskaper brukar vara viktiga i de flesta tillämpningar. Kan ni komma på några andra krav man skulle kunna ställa på bra reglering?

Undersökning av processen

Uppgift 2.1 Bekanta dig med laborationsutrustningen, jämför appendix A. Hur kan vi introducera laststörningar? Finns det mätbrus i processen och kan vi påverka omfattningen av det? Markera process, regulator samt styr- och mätsignal i figur 2.



Figur 2 Laborationsuppställning

Blockschema-representation

För att beskriva ett reglersystem kan det ofta vara lämpligt att använda sig av ett blockschema (blockdiagram). Ett blockschema är en schematisk bild av ett system där man har abstraherat bort alla egenskaper hos de olika delsystemen utom de man är intresserad av. I det här fallet är vi intresserade av samband mellan börvärde (referens), ärvärde (mätsignal) och styrsignal.

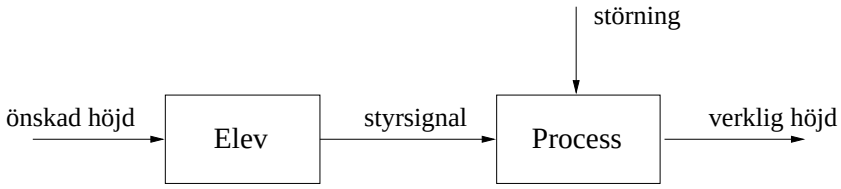
Med hjälp av blockschemat kan man lättare förstå och analysera processen. Det är mycket viktigt att ni förstår relationen mellan den verkliga processen och blockschemat.

Uppgift 2.2 Rita ett blockschema för laborationsuppställningen då en regulator styr nivån i någon av tankarna. Markera i detta process, regulator, styr- samt mätsignal.

Övertyga dig om att du har klart för dig sambandet mellan komponenterna i blockschemat och de olika delarna i den verkliga processen.

Öppen styrning

Man skiljer på öppen styrning (programstyrning, framkoppling) och sluten styrning (återkoppling). Vid öppen styrning, till skillnad från sluten styrning, beror styrsignalens värde ej på mätsignalen. Styrsignalen baseras istället på en modell eller på tabeller liknande den nedan. För tankprocessen innebär öppen styrning att vi reglerar tanknivån utan att känna till den aktuella nivån.



Figur 3 Öppet system

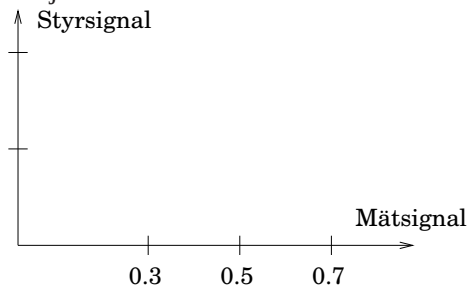
Innan vi experimenterar med öppen styrning måste vi konstruera en enkel modell för tankprocessen. Logga nu in enligt uppgifterna i början av denna handledning (om ni inte redan gjort detta). Regulatorn ska nu befinna sig i manuellt läge och ni kan direkt påverka styrsignalen (som är direkt proportionell mot spänningen över pumpen) och därigenom inflödet till den övre tanken.

Uppgift 2.3 Ställ in styrsignalen (reglaget märkt `um`) som motsvarar ett mätsignalvärde på ca 0.5. Använd plotten för att bekräfta att mätsignalen y nått statonäritet. Det viktiga är inte att ni erhåller *exakt* den föreskrivna mätsignalen, utan istället att ni antecknar den mätsignal (i *närheten* av den föreskrivna) som processen ställde in sig på samt värdet på motsvarande stationära styrsignal.

Kommentar: Såväl styr- som mätsignal kan avläsas i båda gränssnittsfönstren. Identifiera hur ni gör detta innan ni fortsätter laborationen. (Fråga gärna handledaren om ni är osäkra på gränssnittet.)

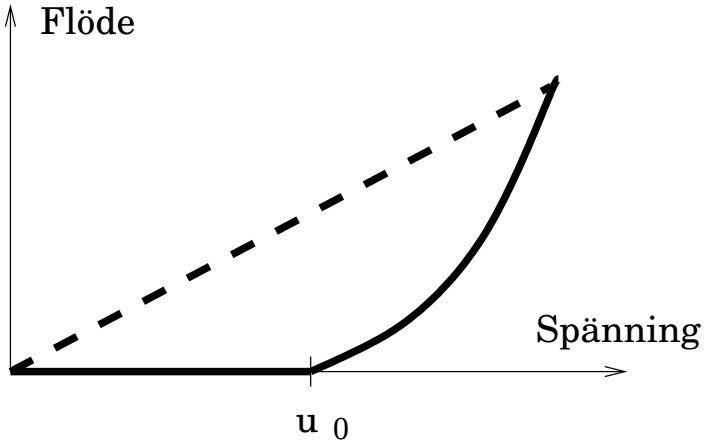
Gör om experimentet för mätsignalvärdena ca 0.3 respektive ca 0.7. Överför därpå era mätningar till diagrammet nedan, där styrsignalen avsätts som funktion av höjden. Glöm inte att kurvan ska gå genom origo. Varför? Kan ni förklara kurvans utseende? Vi kan här antaga att flödet genom pumpen är proportionellt mot pumpspänningen. (Vad kan en rimlig anledning vara om kurvans form ej överenssstämmer med er förväntning?)

Mätsignal	Styrsignal

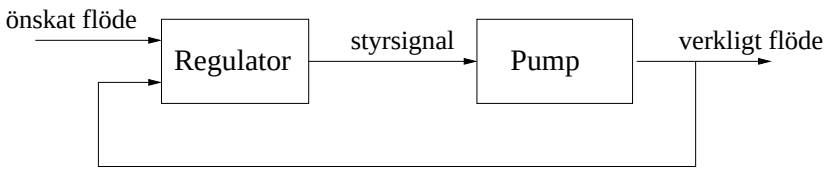


Kommentar: I själva verket uppvisar pumpen i sig inte något linjärt samband från spänning (styrsignal) till flöde (mätsignal), vilket antas i uppgift 2.3. En kvalitativ bild av den nominella pumpkarakteristiken illustreras i figur 4, heldragen linje.

För låga spänningar förekommer inget flöde alls. Spänningar över u_0 ger ett flöde som ökar approximativt kvadratiskt med spänningen. För att dölja denna obekväma olinjäritet utnyttjas en kaskadregulator i laborationen. Flödet genom pumpen mäts med en Venturi-mätare och en inre (för användaren dold) regulator, enligt figur 5 ser till att flödet följer den referens som ges av användaren, dvs dig. Med denna flödesregulator får vi karaketeristik motsvarande den streckade linjen i figur 4.



Figur 4 Pumpkarakteristik utan (heldragen) respektive med (streckad) inre regleringsloop av pumpflöde.

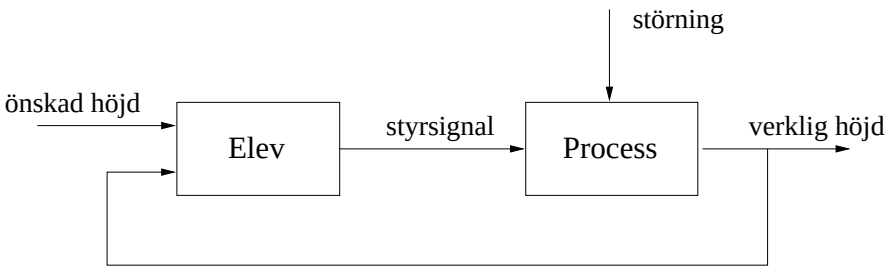


Figur 5 Inre loop för reglering av pumpflöde

Uppgift 2.4 Ställ in styrsignalen `um` så att mätsignalen `y` från övre tanken ställer in sig på 0.5. Försök, med ledning av din modell från föregående uppgiften att öka mätsignalen till 0.8 med hjälp av `um` medan din kamrat håller för den delen av skärmen där mätsignalen visas (och den fysiska processen). Vad händer om kamraten öppnar reglaget `BV1` i smyg?

Sluten styrning

Du har nu tillgång till en mätsignalen *y* och dina synintryck kan *återkopplas* för att styra nivån, jämför figur 6.



Figur 6 Slutet system

Uppgift 2.5 Försök återigen att öka mätsignalen från 0.5 till 0.8. Vad är det som begränsar hur snabbt du kan ändra nivån? Observera att du fortfarande ska reglera tanken manuellt, dvs med reglaget `um`.

Försök sedan att hålla nivån i tanken konstant då din kamrat genererar laststörningar med reglaget `BV1`. Vad är att föredra, öppen eller sluten styrning? Varför?

Jämförelse mellan övre och undre tanken

Vi ska nu titta på hur reglering av den övre tanken skiljer sig från reglering av den undre.

Uppgift 2.6 Byt till den undre tanken genom att ändra `Tank Selection` från `Upper` till `Lower` i användargränssnittet och upprepa experimenten från uppgift 2.5. Vad är det nu som begränsar snabbheten?

Vilken tank är lättast att reglera? Varför?

3. Reglering

Vi ska nu använda olika regulatorer för att styra nivåerna i tankarna. En regulatorn jämför ärvärde med börvärde och beräknar utifrån detta en "lämplig" styrsignal.

I fortsättningen av laborationen håller vi oss till sluten styrning.

P-reglering

Till att börja med kopplar vi in en proportionell regulator (P-regulator) genom att ändra `Control Mode` från `Manual` till `Automatic`. Om ni inte gjort ändringar tidigare kommer blocket `P` i blockschemat över PID-regulatorn vara aktivt (vitt) medan `I` och `D` blocken är inaktiva (ljusblå). (Klicka på ett block för att ändra dess status mellan aktivt och inaktivt.)

Styrsignalen u beräknas nu enligt följande samband

$$u(t) = K\,(r(t) - y(t))$$

där r är börvärdet och y är mätsignalen. I vårt fall betyder det att spänningen till pumpen är proportionell mot reglerfelet $e = r - y$. Konstanten K brukar kallas för regulatorns förstärkning.

Uppgift 3.1 Vi ska nu undersöka hur regulatorns egenskaper beror på förstärkningen K. Återgå till övre tanken och ställ in börvärdet `r`= 0.5 inför varje försök.

Undersök hur väl nivån följer med vid börvärdesändringar. Börja med `K`= 5. Öka börvärdet till `r`= 0.7. Vänta tills nivån är konstant och återställ sedan börvärdet till `r`= 0.5. Är det skillnad på beteendet för positiva respektive negativa börvärdesändringar?

Upprepa försöket för $K = 3$ och $K = 10$. Hur beror reglerfel och snabbhet av förstärkningen K?

Öka nu K till 20 och gör om börvärdesändringen ovan. Skiljer sig resultatet från det vi fick för $K = 10$? Förklara.

Studera hur systemet beter sig vid laststörningar. Generera stegstörningar med hjälp av reglaget `BV1` och eventuellt impulsstörningar genom att hälla lite vatten direkt i övre tanken. Hur ändras beteendet då K varieras?

Hur påverkas systemet av mätbrus? Variera förstärkningen K och studera särskilt styrsignalens utseende. Ange ett rimligt värde på K.

Uppgift 3.2 Experimentera nu med P-reglering av undre tanken genom att ändra `Tank Selection` från `Upper` till `Lower`. Upprepa experimenten i uppgift 3.1. Prova t ex med $K = 1,\ 3,\ 10$.

Uppgift 3.3 Diskutera skillnader mellan P-reglering av övre respektive undre tanken. Är resultaten tillfredsställande? Några problem med regleringen? Ange rimliga värden på K i de båda fallen. Vad begränsar det största K som kan användas i respektive fall?

Att fundera på Hur skulle man göra en uppskattning av ett rimligt startvärde på K om detta inte var givet?

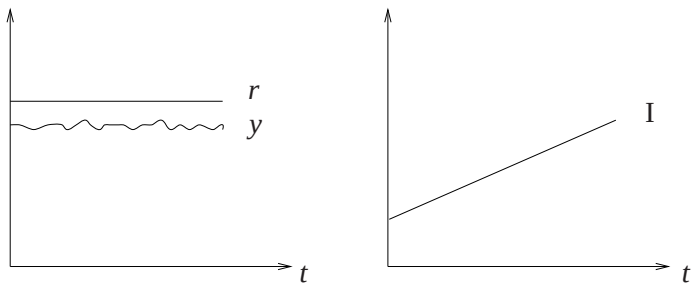
Hur skulle man kunna ändra P-regulatorns styrlag så att det stationära felet försvinner?

PI-reglering

Ett problem med P-regulatorn är, som vi har sett, att man kan få ett kvarstående reglerfel. För att motverka detta är det naturligt att öka styrsignalen så länge ärvärdet är lägre än börvärdet. Ett sätt att göra detta är att låta styrsignalen bero även på integralen av reglerfelet. I en PI-regulator beräknas styrsignalen u enligt sambandet

$$u(t) = K\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau\right)$$

där e är reglerfelet, d.v.s. $e = r - y$. Spänningen till pumpen ges nu av summan av två termer. Den första består av en konstant K gånger reglerfelet och denna term brukar kallas för regulatorns P-del (jämför P-regulator). Den andra termen ges av en konstant K/T_i gånger integralen av reglerfelet. Denna del av summan kallas således för regulatorns I-del (integraldel) och ändras så länge ärvärdet skiljer sig från börvärdet, se figur 7. T_i kallas för integraltid eftersom den har dimensionen tid. Observera att T_i *inte* påverkar integrationsgränserna.



Figur 7 I-delen ändras så länge det finns ett reglerfel.

Om styrsignalen u mättar, d.v.s. når sitt max- eller min-värde, och man har ett kvarstående reglerfel e så kan man få problem med integraldelen. Denna fortsätter då växa och vill "ta i mer" fastän full styrsignal redan ges. När reglerfelet försvunnit och det är dags att dra ner på styrsignalen så ligger denna kvar på fullt pådrag eftersom integraldelen växt till ett för stort värde. Detta fenomen, som kan ge upphov till stora överslängar eller instabilitet, kallas integratoruppvridning eller "wind-up". I laborationsprogrammet finns dock ett så kallat antiwindup-skydd inbyggt mot detta.

Uppgift 3.4 Experimentera med PI-reglering av den övre tanken. Variera integraltiden T_i och studera hur svaret på börvärdesändringar och laststörningar påverkas. Ställ in $K = 5$ och ändra T_i från 20 ner till 1.

Uppgift 3.5 Experimentera med olika värden på K och T_i. Ange en lämplig inställning för PI-reglering av övre tanken. Vilka är för-/nackdelarna jämfört med P-reglering?

Uppgift 3.6 Prova med PI-reglering av undre tanken. Kan du hitta lämpliga värden på K och T_i?

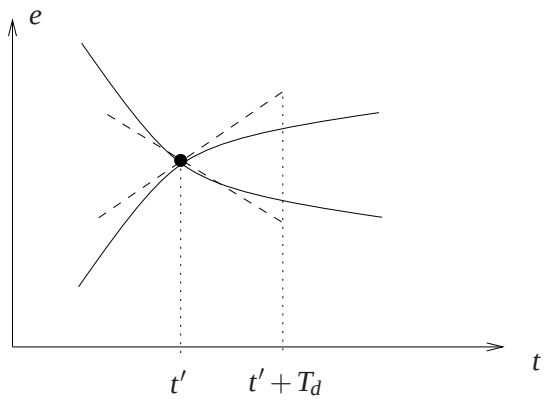
PID-reglering

För att få bra reglering krävs ibland tillgång till ytterligare information om processen. Till exempel ger reglerfelets derivata en uppskattning av felets kommande värde, se figur 8. Genom att låta styrsignalen bero även på felderivatan kan man få styrsignalen att bli större då felet ökar, och mindre då felet minskar. På så sätt kan man snabbare motverka ett ökande reglerfel, samt även få en "mjukare" reglering då man närmar sig börvärdet. Om vi utökar PI-regulatorn med derivataverkan så får vi en PID-regulator där styrsignalen u ges av

$$u(t) = K\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{de(t)}{dt}\right)$$

Regulatorns utsignal betår nu av en P-del, en I-del och en D-del $(KT_d\frac{de}{dt})$. T_d kallas för regulatorns derivatatid. Denna kan tolkas som prediktionshorisonten vid skattningen av felets framtida värde, se figur 8.

Uppgift 3.7 Pröva först att reglera den övre tanken med en PID-regulator. Utgå från de bästa värden du hittade på K och T_i vid PI-reglering av övre tanken. Blir regleringen bättre eller sämre med D-delen inkopplad? Förklaring?



Figur 8 Med hjälp av derivatadelen försöker man att skatta felets framtida värde.

Uppgift 3.8 Försök att hitta en bra PID-inställning för nivåreglering av den undre tanken. Utgå från de bästa värden du hittade på K och T_i vid PI-reglering av undre tanken. Undersök D-delens inverkan genom att variera T_d från 5 till 50. Slutsats?

4. Inställningsmetoder

Vi har nu sett hur ändringar i P-, I- och D-delarna påverkar reglersystemets beteende. Detta är naturligtvis till stor hjälp, men när man ska ställa in en regulator vill man också veta vilka startvärden på K, T_i och T_d som är rimliga för att inte inställningsförfarandet skall bli alltför tidsödande. Om man har en långsam process kan man behöva vänta i timmar, eller dagar, för att avgöra om regleringen fungerar bra.

Modellbaserad regulatordesign Om vi har tillgång till en matematisk modell för processen i fråga kan vi utnyttja denna för att beräkna regulatorparametrar. Detta brukar kallas modellbaserad regulatordesign och kommer att behandlas i laboration 2.

Experimentella metoder Ett annat sätt att ta fram regulatorparametrar är att utföra enkla experiment för att få kunskap om processens dynamik (uppförande). Sedan använder man kända tumregler för att ställa in regulatorn. De experimentella metoderna garanterar inte en bra regulatorinställning men ger ofta rimliga utgångsvärden på regulatorparametrarna. Det finns idag ett stort antal olika experimentella metoder för inställning av PID-parametrar. De kanske mest använda, men inte nödvändigtvis bästa, är Ziegler-Nichols metoder.

Autotuning Vissa kommersiella PID-regulatorer har idag inbyggda funktioner för automatisk regulatorinställning. Dessa funktioner baseras ofta på någon experimentell metod enligt ovan.

Uppgift 4.1 Demonstration Laborationshandledaren visar (i mån av tid) hur en industriell regulator kan användas för tankreglering. Speciellt demonstreras automatisk regulatorinställning.

5. Sammanfattning

Uppgift 5.1 Sammanfatta de viktigaste skillnaderna mellan öppen styrning (programstyrning, framkoppling) och sluten styrning (återkoppling).

Uppgift 5.2 Diskutera för- och nackdelar med P-, PI- och PID-reglering av den övre respektive den undre tanken. Svara speciellt på följande frågor samt fyll i tabellen nedan.

Hur blir regleringen om regulatorförstärkningen K är liten/stor? (Hur påverkas svaret vid börvärdesändringar och laststörningar? Hur påverkas styrsignalen? Hur påverkas det stationära felet?)

Hur blir regleringen om integraltiden T_i är liten/stor?

Hur blir regleringen om derivatatiden T_d är liten/stor? Skillnad mellan övre och undre tanken?

Tabell över lämpliga regulatorinställningar (ta med denna till laboration 2!)

	övre tank	undre tank
P	K =	K =
PI	K = T_i =	K = T_i =
PID	K = T_i = T_d =	K= T_i = T_d =

Vi har under denna laboration ägnat oss åt nivåreglering i vattentankar. Nämn några industriellt relevanta processer som uppvisar liknande dynamik.

_____

_____

_____

6. Extra - automatisk inställning av PID-regulatorn

I samband med utvecklingen av de datorbaserade regulatorerna på 80-talet kom också möjligheten att hjälpa användaren att ställa in regulatorer. Dessa metoder är för det mesta helt automatiska och tekniken kallas därför automatinställning eller autotuning.

När man ska ställa in en regulator går man normalt igenom följade tre faser:

1. För att kunna bestämma processens dynamik börjar man med att störa processen.
2. Genom att studera hur processen reagerar på störningen bildar man sedan en modell av processen.
3. Baserat på modellen beräknas slutligen regulatorparametrarna.

Automatisk inställning av regulatorer innebär helt enkelt att ovanstående förfarande automatiseras, så att störningen, modellberäkningen och valet av regulatorparametrar sker innuti regulatorn.

Utan att gå in på detaljer ska vi nu utvärdera en sådan automatisk inställningsmetod: relä- eller självsvängningsmetoden. Nedan följer en skiss av metoden:

1. Användaren anger en stationär styrsignal u_0 som motsvarar den stationära mätsignalen y_0 i närheten av vilken man vill ha en väl fungerande regulator. (Detta kan vara en iterativ process om processens stationära egenskaper ej är kända.)
2. För att bestämma brusnivån i processen observeras sedan variationer i mätsignalen under en kort period.
3. När brusnivån är bestämd kopplas en On/Off-regulator in.
4. Efer några perioders svängning bestäms periodtiden och mätsignalens amplitud.
5. Utifrån periodtiden och mätsignalamplituden beräknas lämpliga PI- eller PID parametrar.

Denna metod finns implementerad i flera komersiella produkter, men här ska vi använda oss av en modell i Simulink.

Gör såhär för att prova metoden:

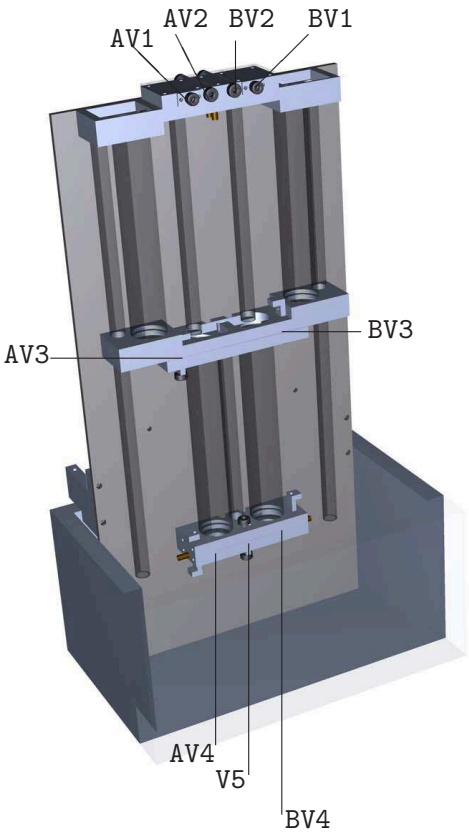
1. Stäng alla öppna fönster (särskilt gränssnittet till laborationen).
2. Öppna ett terminalfönster och skriv `tune`.
3. Följ de interaktiva instruktionerna.

Uppgift 6.1

Prova PI- och PID reglering av undre respektive övre tanken. $u_0 = 0.5$ är ett bra värde att börja med för såväl övre som undre tanken.

Hur står sig regulatorerna jämfört med dem du själv tagit fram tidigare under laborationen?

I verkliga applikationer användns ofta automatiska inställningsmetoder för att ta fram en 'acceptabel' regulator. Denna kan därefter finjusteras manuellt.



Figur 9 Laborationsprocessens reglage

A. Fysiskt användargränssnitt till laboration 1 och 2

Detta appendix hanterar hård- och mjukvarugränssnitten, i nämnd ordning, som används under laboration 1 och 2.

Reglage

Figur 9 visar en bild av laborationsprocessen. Under laborationerna i denna kurs kommer vi att använda oss av reglagen `BV1`, `AV3`, `AV4`, som skall vara in- respektive nedtrycka vid laborationens början. **Reglagen `AV1`, `AV2`, `BV2` skall vid alla tillfällen vara intryckta, medan reglagen `BV3`, `V5`, `BV4` skall vara nedtryckta.** Detta är viktigt för att numeriska värden i laborationshandledningarna ska överensstämma med verkligheten.

B. Grafiskt användargränssnitt till laboration 1 och 2

Här följer en kort beskrivning av användargränssnittet till programvaran som används vid tanklaborationerna. Gränssnittet består av två fönster: “Process-fönstret” och “Controller-fönstret”.

Process-fönstret

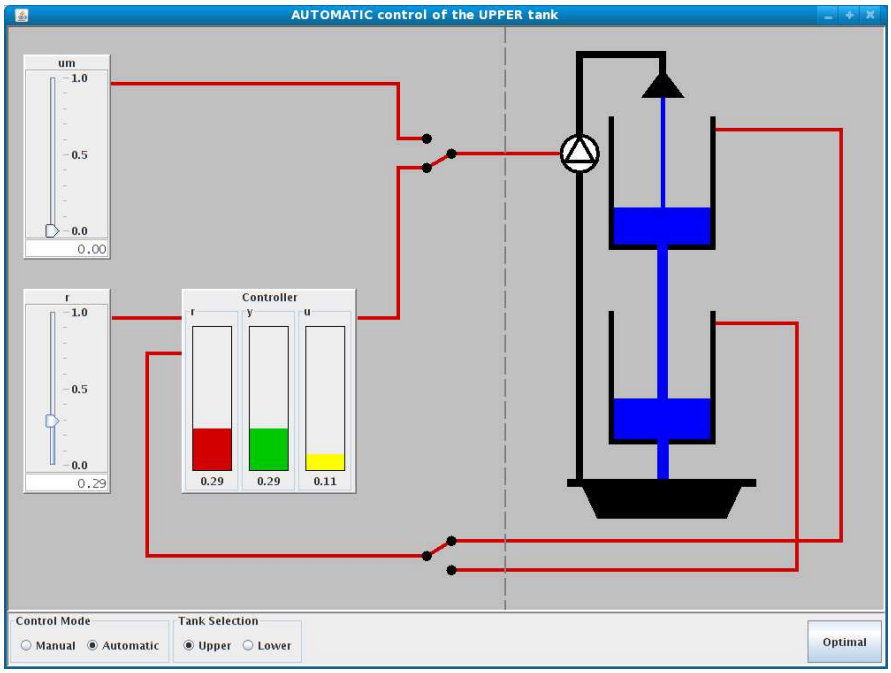
Detta fönster ger en översikt över laborationsuppställningen och visar hur de olika processobjekten är kopplade till varandra, se figur 10. Till höger om mittlinjen visas de objekt som finns i verkligheten. Vi hittar till exempel en bild av pumpen och animationer av vattentankarna. Vänster om mittlinjen finns de objekt som är implementerade i datorn. Viktigast är PID-regulatorn men här finns också olika reglage och omkopplare.

Genom att använda mus och tangentbord kan man utföra följande operationer:

Manuell/PID. Genom att klicka på den övre omkopplaren väljer man mellan manuell respektive PID-styrning av pumpen. Aktuell styrning framgår av fönstrets titelrad och sträckningen av fönstrets virtuella ledningar.

Övre/undre tank. Genom att klicka på undre omkopplaren kan man välja om regulatorn skall styra övre eller undre tanken, d.v.s. om mätvärdet till regulatorn skall tas från övre eller undre tanken. Även aktuell mätning framgår av fönstrets titelrad och sträckning av virtuella ledningar.

Manuell styrsignal. Reglaget märkt `um` används för att styra pumpen då denna körs manuellt. Värdet ändras genom att dra trekanten till önskat läge med musen. Alternativt kan man klicka med musen i rutan där aktuellt värde visas och skriva in ett nytt värde.



Figur 10 Process View.

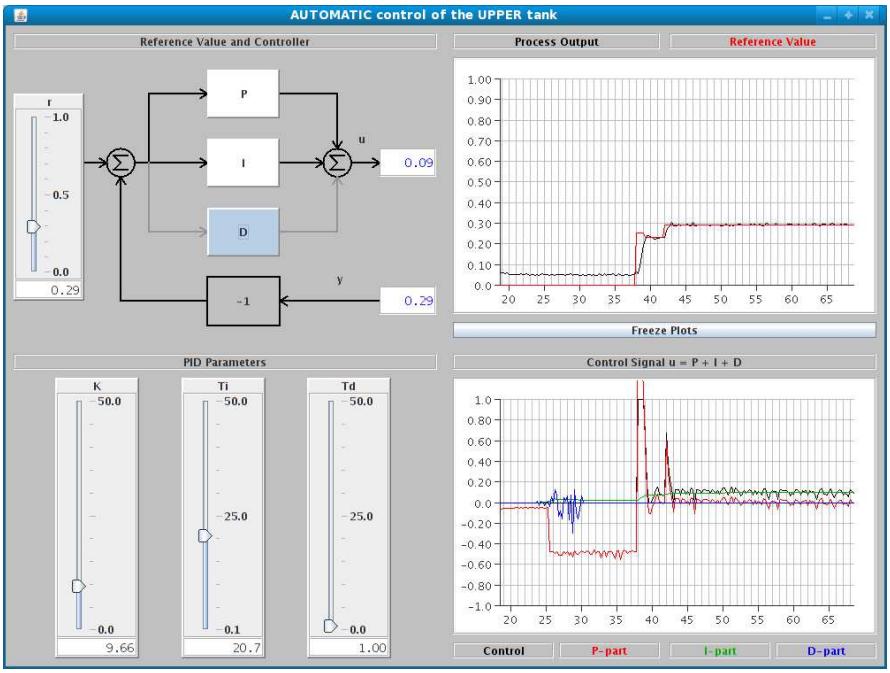
Börvärde. Reglaget märkt `r` används för att ställa in regulatorns börvärde (mellan 0 och 1). Värdet ändras på samma sätt som börvärdet enligt ovan.

Optimal. Denna funktion är endast aktiverbar i `Control Mode - Automatic` vid `Tank Selection - Lower` (sluten styrning av undre tanken. En tidsoptimal regulator används för att ta nivån i undre tanken till börvärdet `r` så snabbt som möjligt och nivån i övre tanken till motsvarande jämviktsläge. Väl framme lämnar regulatorn automatiskt över till PID-regulatorn. Det går att avbryta den tidsoptimala regleringen genom att trycka på `Optimal`-knappen ännu en gång. Funktionen kan användas för att snabbt ”återställa” processen mellan två experiment vid reglering av undre tanken.

Controller-fönstret

Detta fönster visar hur regulatorn är uppbyggd och dessutom visas börvärde, ärvärde och styrsignal i två diagram. Uppe till vänster visas ett blockdiagram för regulatorn. Genom att klicka på de olika blocken kan man aktivera P-, I- och D-delarna oberoende av varandra. I figur 11 är P- och I-delarna aktiva och vi har således en PI-regulator. Reglaget märkt `r` används som tidigare för att ställa in börvärdet. Nere till vänster finns tre reglage för att ändra regulatorns parametrar `K`, `Ti` och `Td`. Även detta fönsters titelrad indikerar om övre eller undre tanken är vald samt om pumpen styrs manuellt eller med regulatorn.

Till höger i vyn visas två plot-fönster. I det övre visas börvärdet `r` och ärvärdet `y` medan det undre visar styrsignalen `u` med delkomponenter `P I` och `D`. Tidsaxlarna är graderade i sekunder. Plottarna kan frysas med knappen “Freeze Plot”.



Figur 11 Controller View.