

*FAKULTETA ZA
ELEKTROTEHNIKO*

Vodenje sistemov praktikum

*ZALOŽBA FE
in FRI*

GREGOR KLANČAR

Kazalo

1. vaja: Krmiljenje procesa z mikrokrmilnikom Arduino Uno	1
1.1 Opis tiskanine Arduino Uno	1
1.2 Prilagoditveno vezje	2
1.3 Digitalno vodenje	4
1.3.1 Izvedba regulatorja v programskem okolju Arduino	4
1.3.2 Vezalni načrt	7
1.4 Naloge	8
2. vaja: Uporaba okolja Matlab in Simulink pri analizi sistemov	12
2.1 Opis sistema	12
2.2 Naloge	13
3. vaja: Simulacija v okolju Matlab - Simulink	15
3.1 Opis sistema	15
3.2 Naloge	16
4. vaja: Načrtovanje vodenja sistemov	18
4.1 Opis sistema	18
4.2 Naloge	19
5. vaja: Načrtovanje vodenja laboratorijskih modelnih naprav	21
5.1 Naloge	21
6. vaja: Vodenje procesov z mikrokrmilnikom Arduino Uno	26
6.1 PID-regulator	26

6.1.1	Diskretna izvedba zveznega PID regulatorja	26
6.1.2	Diskretizacija PID regulatorja	27
6.2	Naloge	28
7.	vaja: Načrtovanje vodenja s pomočjo Bodejevega diagrama	29
7.1	Naloge	30
8.	Dodatek A - Teoretični in praktični napotki	32
8.1	Statična karakteristika	32
8.2	Linearizacija sistema v delovni točki	33
8.2.1	Linearizacija nelinearnega modela procesa	33
8.2.2	Ocena linearne prenosne funkcije v delovni točki	34
8.2.3	Vrednotenje linearnega modela	37
8.3	Uglješevanje PID-regulatorjev	38
8.3.1	Nastavitvena pravila za proporcionalne procese 1. reda	38
8.3.2	Nastavitvena pravila za proporcionalne procese 1. reda z mrtvim časom	39
8.3.3	Nastavitvena pravila za P-procese višjega reda (Ziegler-Nichols)	40
8.3.4	Nastavitvena pravila za P-procese višjega reda (Chien-Hrones-Reswick)	41
8.3.5	Nastavitvena pravila z uporabo nihajnega preizkusa (Ziegler-Nichols)	42
8.3.6	Nastavitvena pravila za integrirne procese	43
8.3.7	Nastavitev polinoma zaprtozančnega sistema (Graham-Lathrop)	44
8.3.8	Nastavitvena pravila za P-procese višjega reda s pomočjo Bodejevega diagrama	45
8.3.9	Določitev PID-regulatorja s pomočjo optimizacije	46
8.3.10	Regulacijska shema s kompenzacijo delovne točke	47
9.	Dodatek B - Opis laboratorijskih modelnih naprav	48
9.1	Motor-Generator (Amira DR 300)	48
9.2	Hidravlični sistem (ELWE)	50

9.3	Proces navijanja (TQ CE 108)	52
9.4	Elektromotor z obročem (TQ CE 9)	54
9.5	Helikopter	56
9.6	Klima naprava	58
9.7	Motor-generator s pogonom PWM	60
10.Dodatek C - Zajem in obdelava podatkov v realnem času v okolju Matlab-Simulink		62
11.Dodatek D - Primer določitve PI regulatorja s pomočjo računalniške optimizacije		64

1. vaja: Krmiljenje procesa z mikrokrmilnikom Arduino Uno

Pri vaji se boste spoznali z okoljem Matlab Simulink in mikrokrmilniško tiskanino Arduino Uno, ki vsebuje mikrokrmilnik ATmega328. Mikrokrmilniki Arduino so trenutno zelo popularni, na spletu je moč najti veliko informacij, programskih knjižnic in tudi strojne opreme za različne razširitve.

Mikrokrmilnik bomo v prihodnjih vajah uporabili tudi za izvedbo zaprtot-zančnega vodenja procesnih laboratorijskih naprav. V nadaljevanju je najprej podano nekaj osnovnih informacij in programskih primerov, ki vam bodo v pomoč pri izvedbi nalog.

1.1 Opis tiskanine Arduino Uno

Za namen laboratorijski vaj bomo uporabili tiskanino Arduino Uno, ki je prikazana na sliki 1.1. Na domači strani www.arduino.cc je moč najti veliko dodatnih informacij, primerov programov, knjižnic in razširitvenih vezij. Arduino Uno mikrokrmilniška tiskanina vsebuje mikrokrmilnik ATmega328 (<http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>) in ima 6 analognih vhodov ter 14 digitalnih vhodno/izhodnih pinov od katerih jih lahko 6 uporabimo za PWM izhode. Deluje s 16MHz taktom in ima USB konektor preko katerega jo lahko programiramo, napajamo in komuniciramo z osebnim računalnikom.

Ostali podatki tiskanine so:



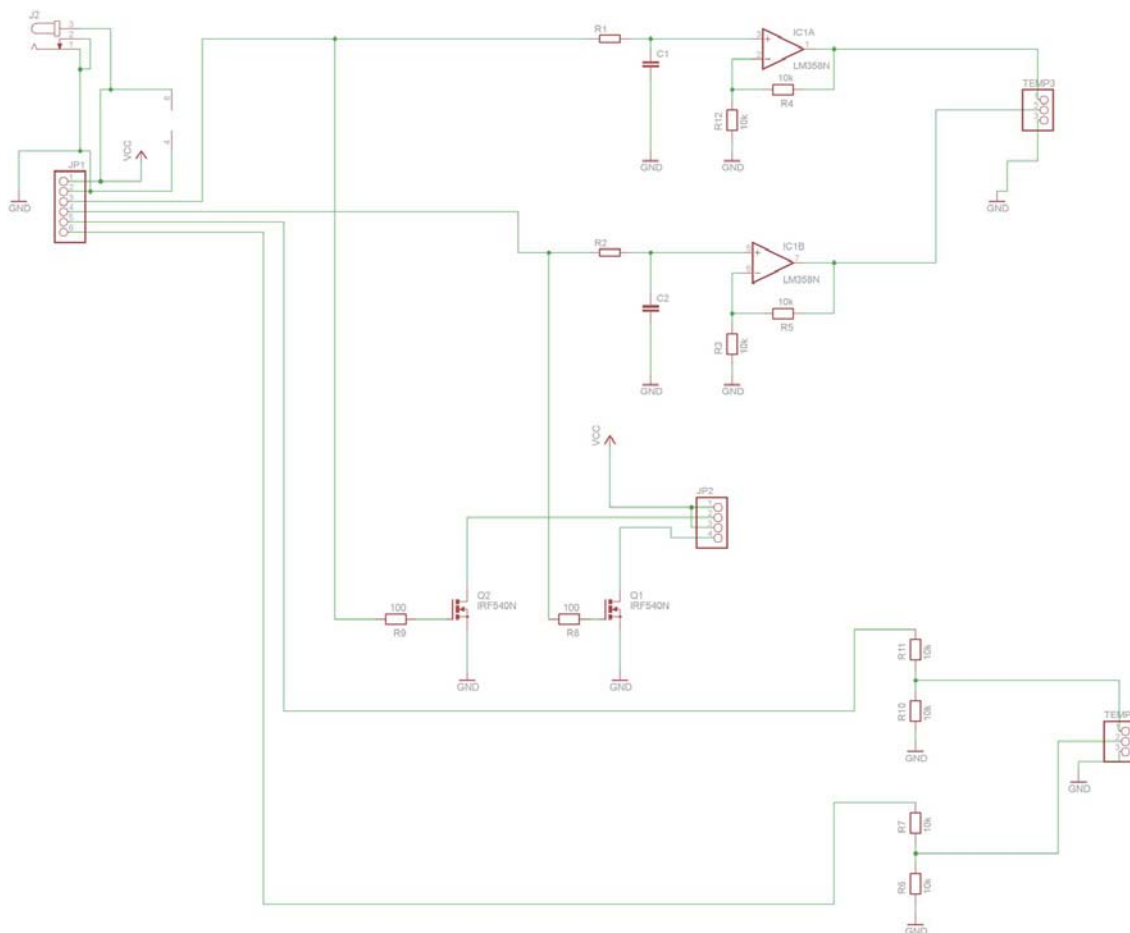
Slika 1.1: Tiskanina Arduino Uno

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage(recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16MHz

1.2 Prilagoditveno vezje

Z mikrokrmilnikom Arduino Uno (v nadaljevanju Arduino) bomo izvedli regulacijo različnih laboratorijskih naprav. Laboratorijske naprave so opremljene z močnostno elektroniko, ki ima standardizirane napetostne vhode 0-10 V (aktuatorji) in napetostne izhode 0-10 V (senzorji). Arduino pa ima 10 bitne analogne vhode (A/D), na katere lahko priključimo signale v območju 0-5 V. Za analogne izhode pa uporabimo PWM (pulzno širinska modulacija) izhode. Določene procese lahko krmilimo neposredno z PWM signalom, če je frekvenca PWM-ja veliko večja od dinamike procesa. Proces (elektromotor) v tem primeru sam povpreči PWM signal in tako iz njega dobi le nizkofrekvenčni signal, s katerim smo mo-

dulirali nosilno frekvenco PWM-ja. V primeru, da potrebujemo čisti analogni izhod, pa moramo narediti ustrezen filter z elektronskimi elementi (upor, kondenzator, operacijski ojačevalnik). Prilagoditveno vezje, preko katerega lahko Arduino priklopimo na laboratorijske naprave prikazuje slika 1.2. Za analogne



Slika 1.2: Prilagoditveno vezje

vhode uporabimo uporovni delilnik, ki vhodno napetost 0-10 V pretvori v 0-5 V. Mikrokontroler ATmega328 ima 10 bitno analogni digitalni pretvorbo (A/D) za analogne vhodne signale, kar pomeni, da se vhodno območje napetosti 0-5 V diskretizira v $2^{10} = 1024$ digitalnih vrednosti.

Analogne izhode pa lahko posredujemo preko PWM izhodov. Lahko uporabimo MOS FET tranzistor, v kolikor želimo močnejši PWM izhod oziroma filter prvega reda in operacijski ojačevalnik z ojačenjem 2, če želimo analogni (filtriran PWM signal) izhod 0-10V.

Za namen laboratorijskih vaj izberemo frekvenco PWM signalov $f_{PWM} = 33$

kHz, kjer predpostavimo, da je f_{PWM} precej višja od maksimalne koristne frekvence signala f_S s katero moduliramo PWM signal $f_{PWM} \geq 20f_S$. Pri motor-nih pogonih je dostikrat pomembno tudi, da je f_{PWM} izven slušnega območja ($f_{PWM} > 18$ kHz), da se izognemo motečega piskanju motornega pogona. Izbira f_{PWM} je navzgor omejena z stikalnimi elementi (hitrosti MOS FET tranzistorjev), navzdol pa je omejena z uporabljenim procesom (njegovim frekvenčnim pasom), ki mora PWM signal gladiti (povprečiti).

Da iz PWM signala izluščimo modulirano frekvenco signala f_S uporabimo filter prvega reda (RC člen) z lomno frekvenco $f_{FILT} = \frac{1}{2\pi RC}$. Pri lomni frekvenci f_{FILT} je ojačenje filtra -3 dB oziroma $\frac{1}{\sqrt{2}}$, kar pomeni, da se amplituda signala pri lomni frekvenci zniža na 70% prvotne. Pri nižjih frekvencah pa filter slabi manj pri večjih pa več (recimo pri $f = 10f_{FILT}$ se amplituda signala zmanjša na 10% prvotne). Iz povedanega sledi, da lomno frekvenco filtra prvega reda lahko določimo kot

$$f_{FILT} \simeq f_S$$

1.3 Digitalno vodenje

Arduino je v osnovi digitalni računalnik, zato najbolj naravna implementacija regulatorja v diskretni obliki (po času in amplitudi). Najprej je potrebno določiti potrebno frekvenco vzorčenja f_{VZ} (oz. čas vzorčenja T_{VZ}), s katero bomo zajemali podatke iz senzorjev preko A/D pretvorbe in posredovali izhode regulatorja na PWM izhod. Glede na Shannonov teorem mora biti frekvenca vzorčenja vsaj dvakrat večja (v praksi pa več 5-10 krat) od koristne frekvence signala f_S (da lahko rekonstruiramo sinusni signal).

$$f_{VZ} > 2f_S$$

Koristno frekvenco f_S procesnega signala definira najmanjša časovna konstanta procesa T_{min} z izrazom

$$f_S = \frac{1}{2\pi T_{min}}$$

1.3.1 Izvedba regulatorja v programskem okolju Arduino

Programiranje Arduino Uno tiskanine poteka v okolju Arduino (slika 1.3) v jeziku C. Podrobna navodila za namestitev okolja in gonilnikov za tiskanino Arduino Uno najdete na <http://arduino.cc/en/Guide/HomePage>.

V nadaljevanju je prikazan pristop k načrtovanju proporcionalnega regulatorja (zgolj za namen demonstracije). Recimo, da imamo proces, katerega zanimivo



```

Blink
/*
  Blink
  Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

  This example code is in the public domain.
  */

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);             // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW);  // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);             // wait for a second
}

```

Slika 1.3: Programsko okolje Arduino

frekvenčno območje procesa sega do $f_S = 160$ Hz. Uporabimo PWM signale s frekvenco $f_{PWM} = 33$ kHz za vhode v proces. Določimo časovno konstanto filtra $RC = \frac{1}{2\pi f_{FILT}} = 1,6$ ms, s katerim bomo filtrirali PWM signal, tako da dobimo na vhodu procesa zvezni signal. Želeno konstanto dosežemo z izbiro $R = 10$ k Ω in $C = 100$ nF. Določimo še frekvenco vzorčenja $f_{VZ} = 6f_S \simeq 1000$ Hz.

Periodično vzorčenje procesnih signalov najlažje dosežemo s prekinitveno rutino (timer interrupt). Za izvedbo časovnika lahko uporabimo obstoječo knjižnico *FlexiTimer2* (lahko tudi katero drugo ali pa sprogramiramo sami), ki uporabi drugi časovnik v mikrokrmilniku. Za izvedbo PWM izhodnih signalov pa uporabimo knjižnico *Timer1*, ki uporablja prvi časovnik. Analogne vrednosti beremo preko A/D pretvorbe z ukazom *analogRead()*. Celotno okolje nadgradimo še s serijsko komunikacijo, preko katere spremljamo procesne vrednosti in posredujemo ukaze za referenco. Sledi celoten izpis programa.

```

// example how to do a simple P controller for some proces
#include "FlexiTimer2.h"
#include "TimerOne.h"
#define SERIALc

int refPercent = 0; // for incoming serial data
int stevcPrint=0;
bool Flag_Control;
float voltage=0.0;
float reference=6.3;
float input=0;

////////////////////////////////////
void setup() {
  Flag_Control=false;
  pinMode(13, OUTPUT);
  FlexiTimer2::set(2, 1.0/2000, timerISR); // unit=2, resolution 1/2000, t=unit*resolution=1ms
  FlexiTimer2::start();

  Timer1.initialize(500000); // initialize timer1, and set a 1/2 second period
  Timer1.pwm(9, 0, 30); // setup pwm on pin 9, 0% duty cycle, period=30us (33,3kHz) % možen je pin9 ali pin10

  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  #if defined(SERIALc)
    Serial.begin(9600);
  #endif
}
////////////////////////////////////

void loop() {
  if (Flag_Control){
  }
  else{
    #if defined(SERIALc)
      if(stevcPrint>500) { // do communication only each 0.5 second when we have time
        stevcPrint=0;
        Serial.print("R= "); // print out the reference
        Serial.println(reference);
        Serial.print("Y= ");
        Serial.println(voltage); // print out the last value you read
        Serial.print("U= "); // print out the outpur of the controller
        Serial.println(input);
      }
      // receive data for the reference
      if (Serial.available() > 0) {
        // read the incoming byte:
        refPercent = Serial.parseInt();
        if(refPercent>0&&refPercent<101){ // you can input reference in percentage
          if (refPercent==1) refPercent=0;
          reference=(float)refPercent/10;
        }
      }
    #endif
  }
}
////////////////////////////////////
void timerISR(){
  Flag_Control=true;
  control();
}
////////////////////////////////////
void control() {
  static boolean output = HIGH;
  static int duty=0;

  // read analog input A0
  int sensorValue = analogRead(A0); // read the input on analog pin 0
  voltage = sensorValue * (10.0 / 1023.0); // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 10V):

  // calculate error and controller output
  float err=reference-voltage;
  float U_DT=2.1; // input voltage for the process in the working point
  float Kp=0.4; // controller gain

  float Uout=err*Kp+U_DT;
  if (Uout>10)
    Uout=10;
  input= Uout;

  // write PWM on pin9 for the Uout in range 0-10V
  duty=1023*Uout/10;
  Timer1.setPwmDuty(9, duty); // pin 9 duty 50%

  stevcPrint++;
  Flag_Control=false;
}

```

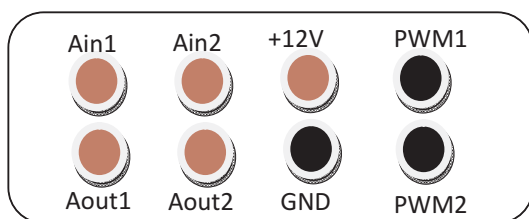
1.3.2 Vezalni načrt

Mikrokrmilnik Arduino Uno in prilagoditveno vezje sta zapakirana v škatli, ki je prikazana na sliki 1.4. Na čelni plošči škatle priključimo procesne signale, na zadnji strani pa konektor za USB komunikacijo in dodatno napajanje. V kolikor uporabljamo prilagoditveno vezje, ki nam da na izhodu 0-10 V signale, moramo priključiti še napajanje 12 V (plus je notranji kontakt). Če uporabljamo le mikrokrmilnik Arduino Uno, se le ta napaja preko USB kabla in dodatno napajanje +12 V ni potrebno.



Slika 1.4: Mikrokrmilnik Arduino Uno s prilagoditvenim vezjem

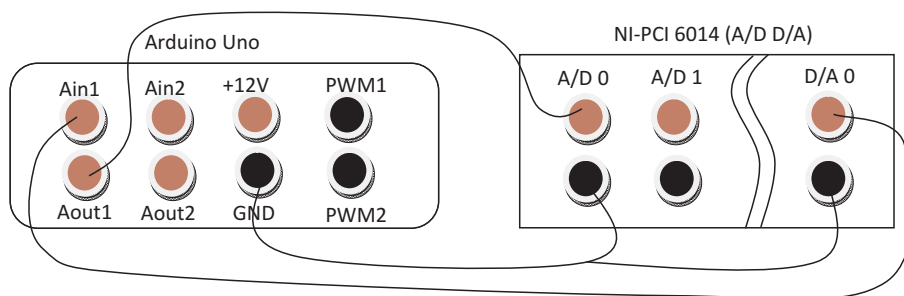
Oznake vhodov in izhodov na škatli so prikazane na sliki 1.5. Na analogne vhode škatle (Ain1 in Ain2) priljučimo analogne signale (iz senzorjev) v območju 0-10 V. Na analogne izhode škatle (Aout1 in Aout2) pa priključimo vhode v proces (signali so šibkotokovni!). Analogni izhodi in vhodi imajo skupno maso - sponka GND. Lahko uporabimo tudi PWM močnostne analogne izhode, kjer porabnik oz. aktuator (motor) priključimo med sponko +12 V in na PWM (PWM1 ali PWM2) sponko.



Slika 1.5: Vhodi in izhodi

Vodenje simuliranega procesa v okolju Matlab-Simulink

Če želimo voditi simuliran proces v okolju Simulink lahko uporabimo NI-PCI 6014 (A/D in D/A) vmesnik. Analogne izhode (filtriran PWM signal) prilagoditvenega vezja Arduino priključimo na zelene analogne vhode (A/D) NI-PCI 6014 vmesnika. Analogne vhode (A/D) prilagoditvenega vezja Arduino pa priključimo na analogne izhode (D/A) NI-PCI 6014 vmesnika. Primer vezave za en analogni izhod in en analogni izhod prikazuje slika 1.6.



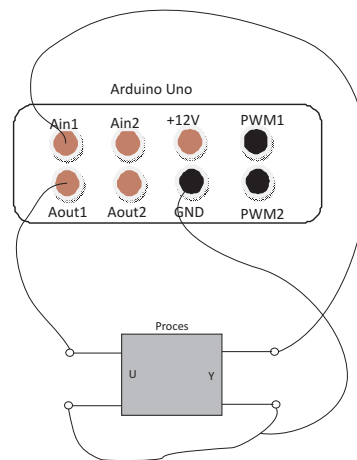
Slika 1.6: Priklop Arduino Uno vmesnika na NI-PCI 6014 za vodenje simuliranega procesa v okolju Simulink

Vežalna shema za vodenje procesa

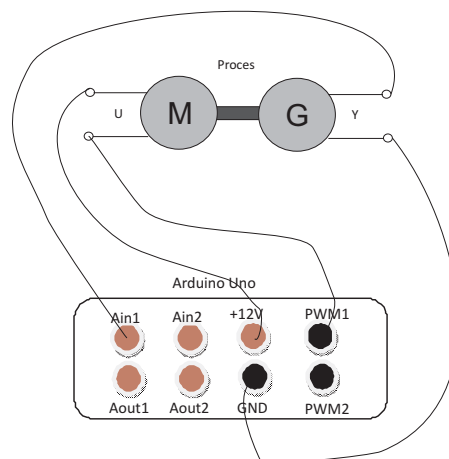
Vežalno shemo prikazujeta slika 1.7 za procese, ki zahtevajo analogni vhod in imajo na vhodu močnostni ojačevalnik (večina procesov v laboratoriju) in 1.8 za procese, ki jih lahko vzbujamo z močnostnim PWM signalom na vhodu.

1.4 Naloge

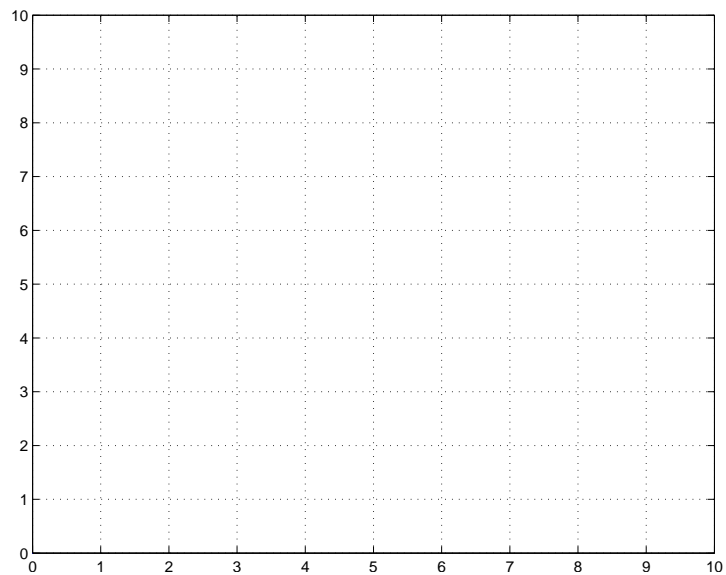
1. S pomočjo okolja Matlab Simulink izmerite statično karakteristiko izbrane procesne naprave (podpoglavje 8.1).



Slika 1.7: Vežalna shema za procese, ki zahtevajo analogni vhod in imajo na vhodu močnostni ojačevalnik.



Slika 1.8: Vežalna shema za procese, ki jih lahko vzbujamo z močnostnim PWM signalom na vhodu.



2. S pomočjo okolja Matlab Simulink ocenite prenosno funkcijo $G(s)$ med izhodom in vhomom procesne naprave za izbrano delovno točko. Delavna točka naj bo izbrana približno v sredini področja delovanja naprave. Prenosno funkcijo ocenite s pomočjo odziva na stopnico v delovni točki. Veljavnost modela preverite s simulacijo.

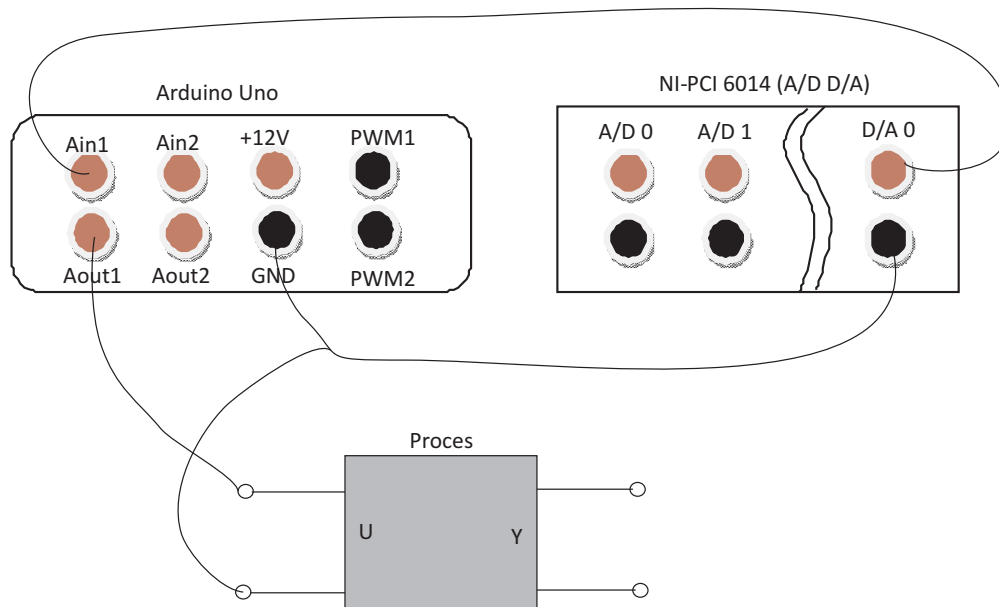
$U_{DT} =$	
$Y_{DT} =$	
$G(s) =$	

3. Za Arduino Uno napišite program za utripanje led diode (vgrajena led dioda na pinu 13) s taktom 0,1 s (0,1 s gori in 0,1 s ugasnjena). Program naj vsebuje časovnik implementiran s prekinitveno rutino.

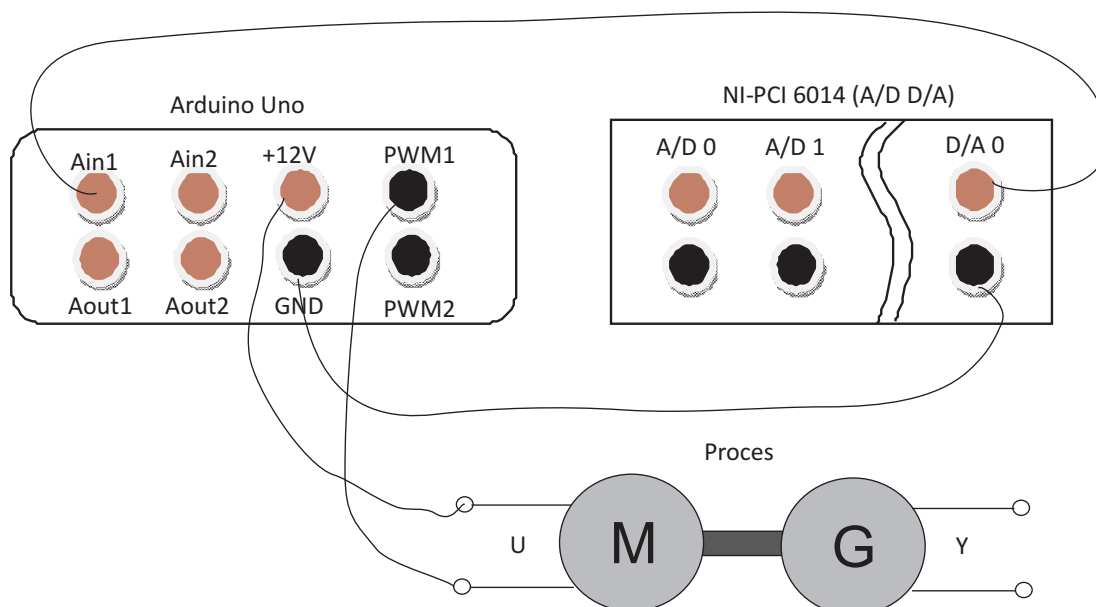
S pomočjo pulznoširinske modulacije PWM ob vsakem taktu časovnika na pinu 9 (ki naj bo PWM izhod) spreminjajte napetost od 0 do 10 V po korakih 0,1 V in nato v obratno smer. Dobljeni izhod Aout1 si lahko ogledate v Simulinku preko bloka NI-PCI 6014.

V pomoč vam je lahko program v poglavju 1.3.

4. S pomočjo Arduino Uno vezja izvedite krmiljenje (odprtozančno) naprave, tako da za zeleno ustaljeno vrednost izhoda procesa izračunate potrebno vzbujanje procesa. Vrednost vhoda spreminjate s pomočjo PWM signala na pinu 9 (Aout1 na sliki 1.5). Ukaz za zeleno vrednost izhoda procesa naj bo napetost na vhodu Ain1 (slika 1.5). Ena od možnosti generiranja analognega signala, ki je vhod na A/D mikrokrmilnika, je uporaba bloka NI-PCI 6014 (glej sliko 1.9 oz. 1.10).



Slika 1.9: Vežalna shema za proces z analognim vhodom (proces mora imeti močnostni ojačevalnik na vhodu).



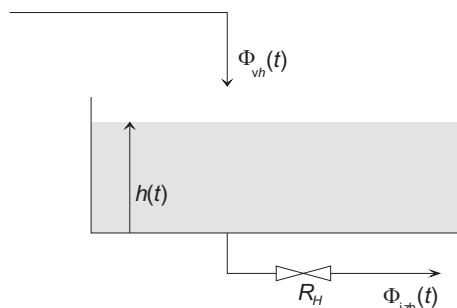
Slika 1.10: Vežalna shema za proces s PWM vhodom v proces.

2. vaja: Uporaba okolja Matlab in Simulink pri analizi sistemov

Osnovni namen vaje je spoznavanje osnovnih funkcij paketa Matlab in simulacija sistemov v okolju Simulink.

2.1 Opis sistema

1. Spremljamo nivo vode v shranjevalniku na sliki, kjer so h nivo vode v shranjevalniku, Φ_{vh} vhodni volumski prtok vode in Φ_{izh} izhodni volumski odtok vode.



Prikazani proces je nelinearen, saj ima ventil nelinearno karakteristiko (opisano s hidravlično upornostjo R_H). Odvisnost izhodnega pretoka Φ_{izh} skozi ventil je namreč odvisna od korena nivoja vode h v shranjevalniku. Postopek modeliranja pokaže, da lahko v nekem ožjem področju delovanja (okolica nekega nivoja oz. delovne točke h_{DT}) proces zadovoljivo opišemo z linearno diferencialno enačbo prvega reda. Dobljeni linearni model torej opisuje le spremembe iz delovne točke u_{DT} , h_{DT} (za več informacij glej podglavje Linearizacija sistema v delovni točki, ki je del poglavja 8.).

Torej obnašanje sistema v neki okolici delovne točke opisuje enačba $\tau \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = K_s \Phi_{vh}(t)$, kjer sta τ časovna konstanta in K_s ojačenje procesa. Časovna konstanta je podana v sekundah, nivo v metrih in pretok v kubičnih metrih na sekundo.

2.2 Naloge

- a) Realizirajte simulacijsko shemo (bločni diagram) v okolju Matlab/Simulink. Simulirajte odziv na stopničasto vzbujanje $\Phi_{vh}(t) = 1(t)$, shranjevalnik je pred vzbujanjem prazen. Odziv prikažite s pomočjo bloka *Scope*.
- b) Analizirajte vpliv časovne konstante τ na odziv procesa pri stopničastem vzbujanju. Določite čas umiritve t_s (čas v katerem sistem doseže 95% končne vrednosti). Simulacijsko shemo kličite iz *.m datoteke (skript datoteke), kjer definirajte vrednosti τ in K_s ter kličite simulacijsko shemo s funkcijo *sim*. V shemi z blokom *out* označite izhod sistema. Izpolnite tabelo

$K_s = 10$	$t_s[5\%]$	$\frac{t_s}{\tau}$
$\tau = 1$		
$\tau = 5$		
$\tau = 20$		

Ugotovitve:

- c) Analizirajte vpliv ojačenja procesa K_s na njegov odziv. Izpolnite tabelo.

$\tau = 20$	$t_s[5\%]$	$\frac{t_s}{\tau}$
$K_s = 1$		
$K_s = 5$		
$K_s = 20$		

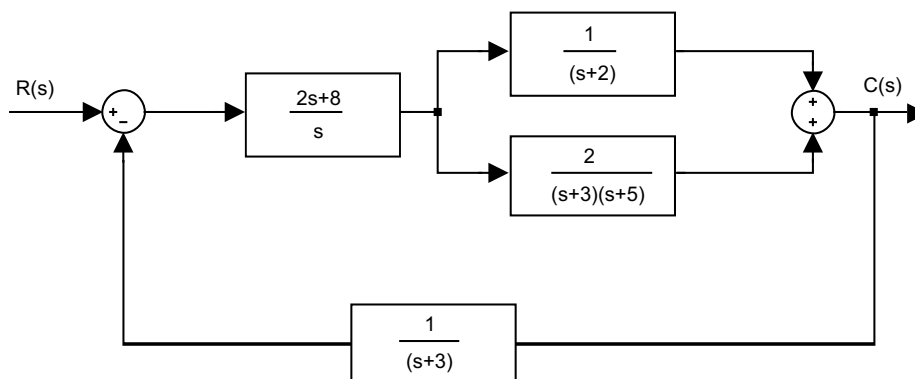
Ugotovitve:

2. Prenosno funkcijo

$$G(s) = \frac{3(s+1)(s+7)}{(s+2)(s+3)(s+5)}$$

podajte v okolju Matlab s funkcijo *zpk*. Pretvorite jo v polinomsko obliko (funkcija *tf*) in prostor stanj (funkcija *ss*). Narišite odzive na stopničasto vzbujanje (funkcija *step*) vseh treh zapisov sistema. Čas opazovanja je $6s$. Iz polinomske oblike zapisa določite pole in ničle procesa (funkcije: *pole*, *zero* ali *roots*).

3. Iz bločnega diagrama na sliki določite prenosno funkcijo $\frac{C(s)}{R(s)}$ z uporabo Matlaba (funkcije: *parallel*, *series*, *feedback*) in narišite odziv na enotino stopnico.



4. V en diagram narišite vhodni sinusni signal amplitude 2 in frekvence 0.5 Hz ter odziva sistemov iz naloge 2 in 3. Čas opazovanja je 15 s, čas vzorčenja pa $T_s = 0.1$ s. (funkcije: *lsim* in *plot*)
5. Simbolično s pomočjo inverzne Laplace-ove transformacije (*syms*, *ilaplace*) izračunajte in narišite (*ezplot*) odziv na stopničasto vzbujanje sistema $G(s) = \frac{3}{(s+2)(s+3)(s+5)}$ ($0 \leq t \leq 6$, nični začetni pogoji).

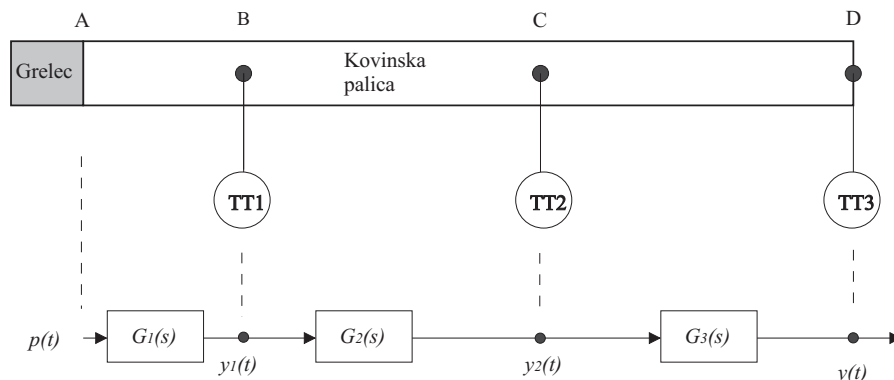
Za isti sistem določite in narišite odziv na stopnico še preko diferencialne enačbe (ročna pretvorba iz prenosne funkcije in vhoda) in uporabite funkcijo za reševanje diferencialnih enačb (*dsolve*), kjer za vhod uporabite enotino stopnico (*heaviside*).

3. vaja: Simulacija v okolju Matlab - Simulink

Osnovni namen vaje je spoznavanje osnovnih funkcij okolja Matlab-Simulink in simulacija sistemov predstavljenih s prenosno funkcijo in diferencialno enačbo.

3.1 Opis sistema

Proučujemo ogrevanje kovinske palice v štirih točkah (glej sliko). Postopek modeliranja pokaže, da je možno v nekem ožjem področju (okoli $0^{\circ}C$) uporabiti linearni model, ki ga prikazuje slika. V tem področju velja, da je časovna konstanta ogrevanja približno enaka časovni konstanti ohlajanja. Lahko si predstavljamo, da eksperimente dejansko delamo okoli temperature $0^{\circ}C$ ali pa, da smo pri modeliranju izvedli linearizacijo okoli neke delovne točke in izvajamo eksperimente okoli te delovne točke.



$$G_1(s) = \frac{Y_1(s)}{P(s)} = \frac{10}{10s + 1} \quad G_2(s) = \frac{Y_2(s)}{Y_1(s)} = \frac{0.5}{20s + 1} \quad G_3(s) = \frac{Y(s)}{Y_2(s)} = \frac{0.5}{20s + 1}$$

Kjer je $p(t)$ moč v $[kW]$ in so $y(t)$, $y_1(t)$ in $y_2(t)$ temperature v $[^{\circ}C]$.

Časovne konstante so podane v sekundah. Predpostavimo, da je v začetku temperatura palice enaka temperaturi okolice $0^{\circ}C$. Nato pa v točki A izvedemo vzbujanje s toplotnim virom konstantne vrednosti $p(t) = 1kW$.

3.2 Naloge

1. Določite prenosno funkcijo celotnega procesa $G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$. Pretvorite jo v polinomsko obliko in nato iz polinomske v faktorizirano obliko (funkcije: *tf*, *tf2zp*). Določite ojačanje in časovne konstante procesa. Kakšne so ničle in poli procesa?

$G(s) =$	$G(s) =$	$G(s) =$
----------	----------	----------

$K =$	$T_1 =$	$T_2 =$	$T_3 =$
-------	---------	---------	---------

ničle:	poli:
--------	-------

2. Simulirajte temperaturni proces v okolju Matlab-simulink s pomočjo elementarnih gradnikov (seštevalnik, integrator, ojačevalni blok,...). Vhodni signal (v točki A) izvedemo s konstantnim toplotnim virom vrednosti $p(t) = 1kW$. Po 200s, ko se temperatura ustali, izključimo grelec in opazujemo prehodni pojav še 200s. Opazujte poteke temperatur $y_1(t)$, $y_2(t)$ in $y(t)$.
3. Za primerjavo v isti simulacijski shemi simulirajte temperaturni proces še po dveh od podanih metod:

- Metodi zaporedne razčlenitve. V modelu morajo biti dostopne vse tri temperature.
- Vgnezdene metodi. Dostopna je le temperatura v točki D.
- Delitvene metodi. Dostopna je le temperatura v točki D.

Simulacijsko shemo simulirajte iz *.m datoteke s funkcijo *sim*. Rezultate simulacije prenesite iz simulinka v Matlab s pomočjo bloka *To Workspace*. Rezultate narišite v Matlabu.

4. Z dopolnitvijo ene od prej narejenih simulacijskih shem simulirajte zaprt-zančni sistem z
 - ON/OFF regulatorjem brez histereze (stopenjsko krmiljenje 0/1kW),
 - ON/OFF regulatorjem s histerezo 0, 4°C (blok *Relay*) in
 - P regulatorjem z ojačenjem $K_P = 1, 8$.

Referenca je stopničaste oblike $y_r(t) = 1$. V vseh primerih opazujte vhod in izhod procesa ter komentirajte opažanja. Pri ON/OFF regulaciji ocenite periodo nihanja T_P in amplitudo (razpon) nihanja Δy . Pri P regulaciji ocenite maksimalno moč grelca P_{max} , maksimalni prevzpon izhoda y_{max} in pogrešek v ustaljenem stanju e_{ss} .

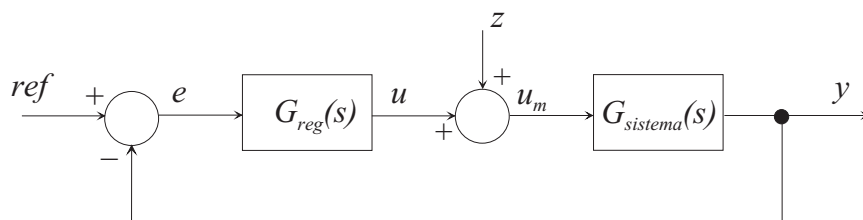
ON/OFF brez hist.	$T_P =$	$\Delta y =$	
ON/OFF z hist.	$T_P =$	$\Delta y =$	
P regulator	$P_{max} =$	$y_{max} =$	$e_{ss} =$

4. vaja: Načrtovanje vodenja sistemov

Osnovni namen vaje je načrtovanje vodenja sistemov z uporabo različnih pristopov kot so: nastavitvena pravila za proporcionalne procese prvega in višjega reda ter optimizacija.

4.1 Opis sistema

Pri vaji bomo s pomočjo okolja Matlab-Simulink določili različne regulatorje (P, PI ali PID) za različne procese. V vseh primerih je zaprtozančni sistem podan, kot prikazuje slika.



Dodatni vhod v sistem je motnja z (recimo stopničaste oblike), s katero lahko preverite regulacijsko delovanje sistema (odpravljanje motenj). Splošna prenosna funkcija PID regulatorja z realnim D členom je

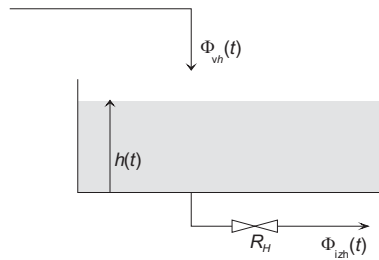
$$G_R(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T' s + 1} \right) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{T' s + 1}$$

kjer je D člen še dodatno filtriran s prenosno funkcijo 1. reda s časovno konstanto $T' = (0, 1 \text{ do } 0, 3)T_D$. Postopki načrtovanja regulatorjev so podani v podpoglavju Uglasovanje PID-regulatorjev, ki je del poglavja 8.

Vse bistvene korake postopka načrtovanja pri vsaki nalogi prikažite v *.m datoteki. Preverite sledilno in regulacijsko delovanje dobljenih zaprtozančnih sistemov.

4.2 Naloge

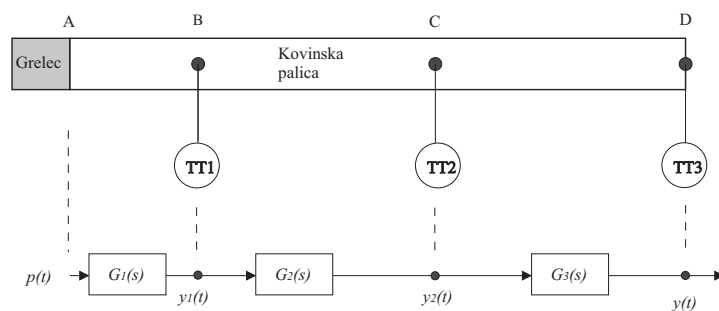
1. Regulirati želimo nivo vode v shranjevalniku na sliki.



Obnašanje procesa v okolici delovne točke opisuje prenosna funkcija $G(s) = \frac{4}{5s+1}$. Določite PI regulator, tako da bo odziv zaprtozančnega sistema 3 krat hitrejši od odprtozančnega.

$K_P =$	$K_I =$	$T_I =$
---------	---------	---------

2. Za proces gretja na sliki določite PID regulator z realnim D členom z uporabo nastavitvenih pravil Ziegler-Nichols s pomočjo odziva na stopnico.



Prenosna funkcija procesa je podana z

$$G(s) = G_1 G_2 G_3 = \frac{2.5}{4000s^3 + 800s^2 + 50s + 1}$$

Regulator določite eksperimentalno s pomočjo odziva procesa na stopničasto spremembo vvida.

$K_s =$	$T_{za} =$	$T_{iz} =$
---------	------------	------------

$K_P =$	$T_I =$	$T_D =$	$T' =$
---------	---------	---------	--------

3. Za proces gretja iz točke 2. ($G(s) = \frac{2.5}{4000s^3 + 800s^2 + 50s + 1}$) določite PID regulator s pomočjo nastavitvenih pravil Ziegler-Nichols na osnovi nihajnega preizkusa. Regulator določite eksperimentalno.

$K_{kr} =$	$T_{kr} =$		
$K_P =$	$T_I =$	$T_D =$	$T' =$

4. Za proces gretja iz točke 2.

$$G(s) = \frac{2.5}{4000s^3 + 800s^2 + 50s + 1}$$

določite PI regulator pomočjo računalniške optimizacije s funkcije *fminsearch*. Program za izvedbo optimizacije (glej poglavje 11.) je dosegljiv na: http://m.sc.fe.uni-lj.si/Download/Klancar/TR/TR_Lab_Vaja3.zip.

Glavna datoteka *SkriptOptim.m* kliče funkcijo za optimizacijo *fminsearch*, ta pa kliče funkcijo za izračun kriterijske funkcije *kriterij.m*. Funkcija *kriterij.m*, za vsako iteracijo (trenutno vrednost parametrov PI regulatorja) izvede simulacijo in izračuna vrednost kriterijske funkcije $J_{IAE} = \int_0^{200} |e(t)| dt$. Glede na vrednost kriterijske funkcije funkcija *fminsearch* določi nove vrednosti parametrov, tako da se vrednost kriterijske funkcije zmanjšuje. Po končani optimizaciji (ko najdemo optimum oz. dosežemo maksimalno število korakov) dobite optimalne vrednosti parametrov PI regulatorja in vrednost kriterijske funkcije.

$K_P =$	$K_I =$	$J_{IAE} =$
---------	---------	-------------

V simulacijski shemi *Proces.mdl* spremenite kriterijsko funkcijo v

$$J_{ITAE} = \int_0^{200} t |e(t)| dt$$

Kakšen PI regulator dobite?

$K_P =$	$K_I =$	$J_{ITAE} =$
---------	---------	--------------

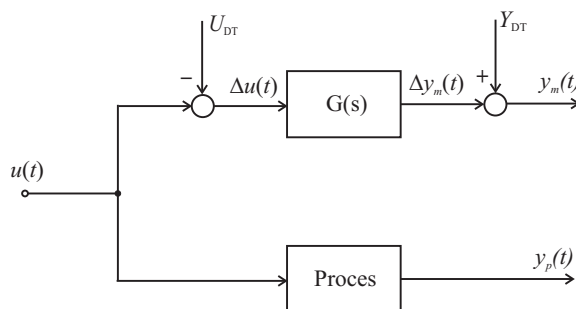
Rezultatov optimizacij s kriterijskima funkcijama J_{IAE} in J_{ITAE} ne gre primerjati. Strukturi kriterijskih funkcij sta namreč različni, kar pomeni, da je različno tudi želeno optimalno delovanje obeh zaprtozančnih sistemov (dobljena PI regulatorja sta različna).

5. vaja: Načrtovanje vodenja laboratorijskih modelnih naprav

Pri vaji bomo v okolju Matlab-Simulink obravnavali različne modelne naprave (elektromotorje, hidravlične sisteme in proces navijanja) in za njih določili zaprtozančno vodenje. Opisi naprav so podani v poglavju 9.

5.1 Naloge

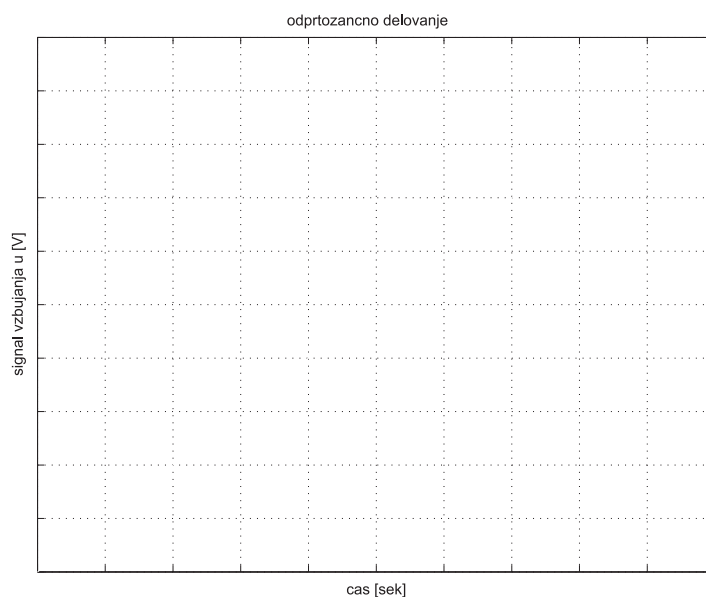
1. Izvedite simulacijo modela procesa v okolici izbrane delovne točke DT tako, da boste dobljene rezultate lahko direktno primerjali z rezultati meritev na procesu (vhod je $u = U_{DT} + \Delta U \cdot 1(t)$). Pri tem upoštevajte, da je linearni model ustrezna aproksimacija le v okolici izbrane delovne točke. To pomeni, da je odzivu linearnega modela potrebno prišteti še vrednost signala v delovni točki, da bi lahko primerjali odziv realnega procesa z odzivom modela, kot je ilustrirano na sliki.



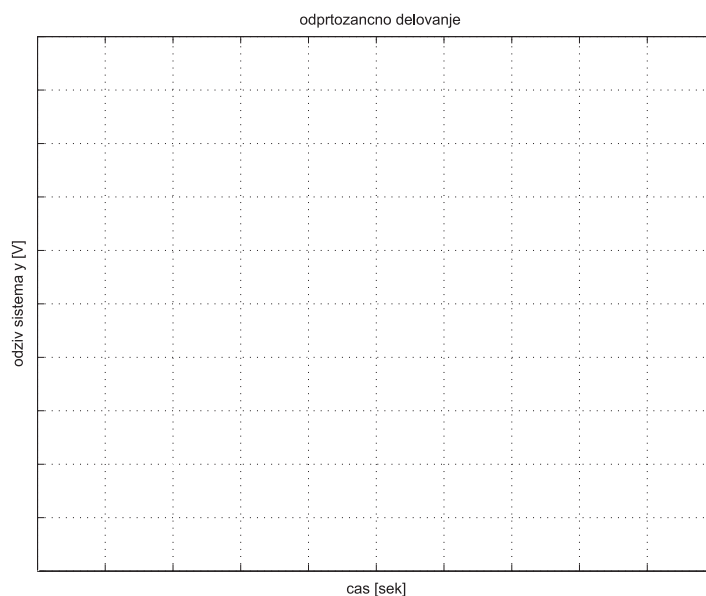
Shema za vrednotenje linearnega modela procesa, kjer je vključena informacija o delovni točki (U_{DT} , Y_{DT}).

Rezultate simulacije in meritev primerjalno narišite na sliki 5.1 in 5.2. V kolikor z odzivi zgrajenega modela niste zadovoljni, predlagajte ustrezne spremembe.

Opis prilagoditvenih sprememb pri izbiri signalov, pri določanju razmer v delovni točki ter pri prilagajanju modela:



Slika 5.1: Vzbujujanje sistema pri odprtozančnem delovanju.



Slika 5.2: Odziv sistema in modela pri odprtozančnem delovanju.

2. Na osnovi ocenjenega modela procesa določite PI regulator, ki bo zagotavljal sledilno delovanje brez pogreška v ustaljenem stanju in N -kratno pohitritev sistema (glej podpoglavje 8.3.1). Določite zaprtozančno prenosno funkcijo linearne sistema, njene pole, časovne konstante, ničle in ojačenje. Ali je dobljeni zaprtozančni sistem stabilen? Če ni, popravite parametra regulatorja

tako, da bo zadoščeno pogoju stabilnosti in napišite za kakšni vrednosti ste se odločili.

Rešitve:

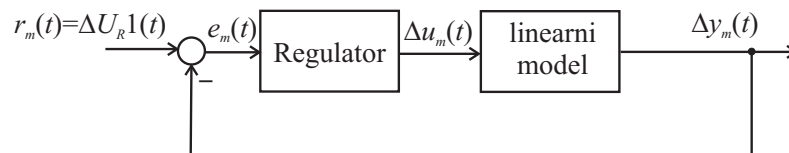
- Parametri uporabljenega regulatorja:

$K_P =$	$T_I =$	$K_I =$
---------	---------	---------

- Zaprtzoančna prenosna funkcija linearnega sistema:
- Poli zaprtzoančnega sistema:
- Časovne konstante zaprtzoančnega sistema:
- Ničle zaprtzoančnega sistema:
- Ojačenje zaprtzoančnega sistema:
- Stabilnost zaprtzoančnega sistema:

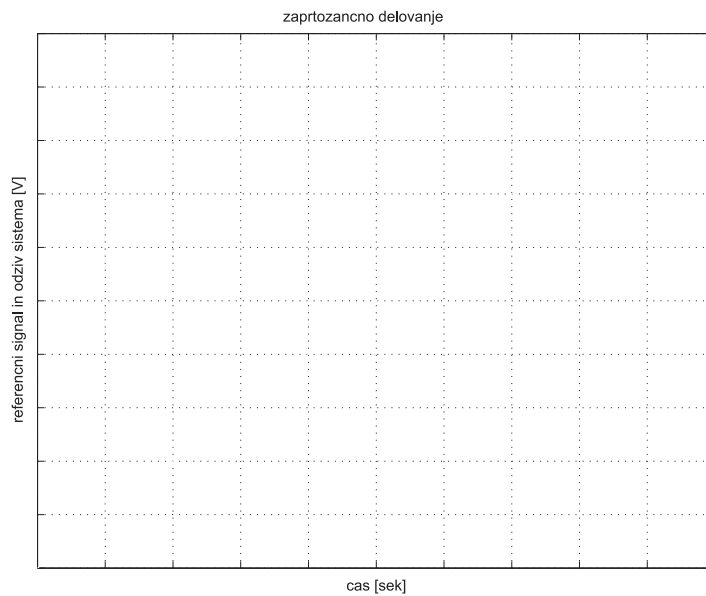
3. Delovanje zaprtzoančnega sistema preverite najprej simulacijsko, pri čemer posvetite pozornost območju regulirnega signala, ki je pri realnem procesu omejen na $\pm U_{max}$.

Za zaprtzoančni sistem želimo, da bi čim boljše sledil referenčnemu signalu stopničaste oblike in amplitude ΔU_R , kot prikazuje slika.

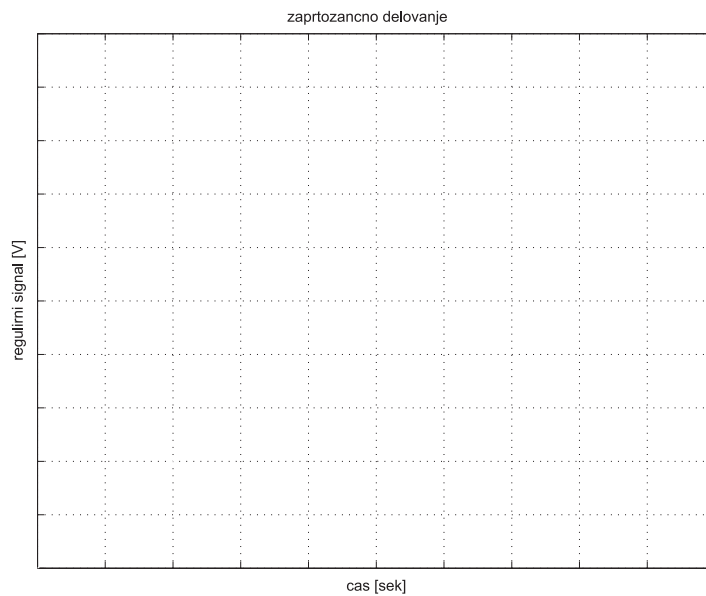


Shema zaprtzoančne simulacije modela procesa.

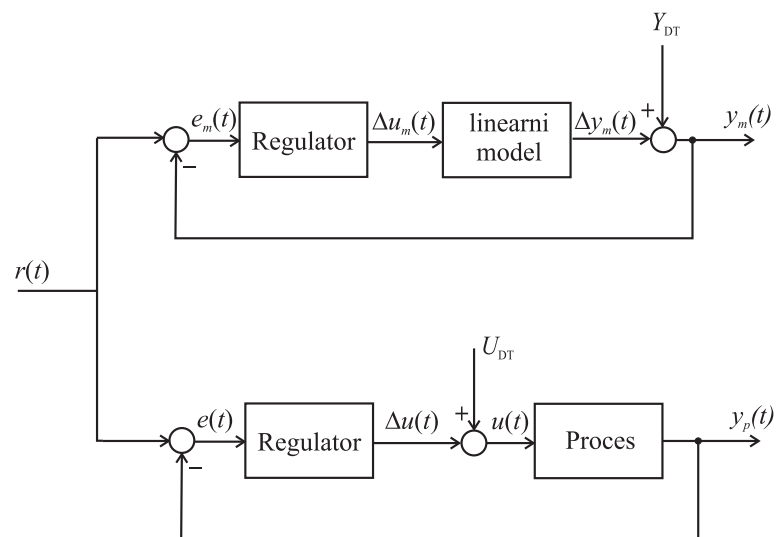
4. V kolikor je delovanje modela sprejemljivo, izvedite eksperiment pri uporabi istega regulatorja in ob enaki referenci tudi na napravi (referenca je $r = Y_{DT} + \Delta U_R \cdot 1(t)$) in rezultate meritev ter simulacije prikažite primerjalno na slikah 5.3 in 5.4. Na enem grafu prikažite referenčni signal, odziv modela in odziv procesa, na drugem pa regulirni signal procesa in modela. Pri realizaciji zaprtzoančnega delovanja bodite pozorni na pravilno uporabo regulatorja, ki je bil načrtan za linearni model. Razmere so ilustrirane na sliki 5.5.



Slika 5.3: Referenčni signal in odziv sistema.



Slika 5.4: Regulirni signal.



Slika 5.5: Bločni diagram primerjave linearnega reguliranega sistema in realnega reguliranega sistema.

6. vaja: Vodenje procesov z mikrokrmilnikom Arduino Uno

Vodenje izbranega procesa, za katerega ste v prejšnji vaji že določili zvezni in diskretni model, bomo izvedli s pomočjo diskretnega PID regulatorja implementiranega na mikrokrmilniškem vezju Arduino Uno.

6.1 PID-regulator

Prenosno funkcija idealnega PID-regulatorja podaja enačba

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

kjer so K_P proporcionalno ojačenje, T_I integrirna časovna konstanta in T_D časovna konstanta diferenciatorja.

Pri izvedbi PID-regulatorja v praksi se uporablja zakasneni D člen, kar dosežemo z uvedbo filtra prvega reda na odvodu

$$G_{PID_{real}}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T^* s + 1} \right)$$

kjer je T^* filtrska konstanta D člena in jo lahko določimo z $T^* = 0, 2T_D$.

6.1.1 Diskretna izvedba zveznega PID regulatorja

Pri implementaciji PID regulatorja moramo oceniti integral pogreška in odvod pogreška $e(k)$, podanega v diskretnih časih vzorčenja $t = kT_s$, $k = 0, \dots, n$. Integral pogreška aproksimiramo z

$$I = \int_0^{kT_s} e(t) dt \doteq \sum_{i=1}^k e(i) T_s$$

odvod pogreška pa z

$$D = \frac{de(t)}{dt} \doteq \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s}$$

Končni regulator potem je

$$u(k) = K_P \left(e(k) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_D}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right)$$

6.1.2 Diskretizacija PID regulatorja

Če izvedemo diskretizacijo idealnega PID regulatorja $G_{PID}(s)$ pri času vzorčenja z uporabo metode zadnjih diferenc pri operaciji odvajanja in integracije. Pri izpeljavi vstavimo v $G_{PID}(s)$ izraz $s = \frac{1}{T_s} \frac{z-1}{z}$, kjer je T_s čas vzorčenja. Po izpeljavi dobimo diskretni PID-regulator v rekurzivni obliki

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2)$$

kjer so parametri

$$\begin{aligned} q_0 &= K_P \left(1 + \frac{T_s}{T_I} + \frac{T_D}{T_s} \right) \\ q_1 &= -K_P \left(1 + 2 \frac{T_D}{T_s} \right) \\ q_2 &= K_P \frac{T_D}{T_s} \end{aligned}$$

Izpeljavo lahko izvedemo v okolju Matlab s sledečo kodo

```
\verbatim{ syms z Kp Ti Td Ts
s=1/Ts*(z-1)/z
Gpid=Kp*(1+1/(Ti*s)+Td*s) % zvezna prenosna funkcija PID-a
[n,d]=numden(Gpid)
Gpid_z=(collect(n,z)/collect(d,z))
pretty(Gpid_z) }
```

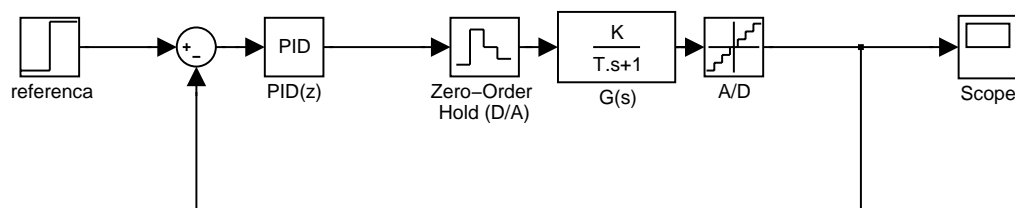
ki nam določi diskretno prenosno funkcijo regulatorja

$$G_{PID}(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_P (T_s^2 + T_D T_I + T_I T_s) z^2 - K_P (2 T_D T_I + T_I T_s) z + K_P T_D T_I}{T_I T_s z^2 - T_I T_s z}$$

od koder lahko določimo gornjo rekurzivno obliko regulatorja v časovnem prostoru.

6.2 Naloge

1. Za ocenjeni model procesa (iz 1. vaje) v izbrani delovni točki in za ocenjeni regulator PID (iz 5. vaje) določite parametre diskretnega regulatorja PID. Delovanje regulatorja preverite s simulacijsko shemo, ki vsebuje zvezni model procesa in diskretni regulator, kot prikazuje slika 6.1.



Slika 6.1: Izgled simulacijske sheme z zveznim modelom procesa in diskretnim regulatorjem.

Regulator realizirajte z diskretno prenosno funkcijo $G(z) = \frac{q_0 z^2 + q_1 z + q_2}{z^2 - z}$ (blok *Discrete Transfer Fcn*). Pretvorbo D/A simulira zadrževalnik ničtega reda (blok *Zero-Order Hold*). Pretvorbo A/D pa realizirajte z blokom *Quantizer*, kjer upoštevajte 10 bitno pretvorbo A/D.

Če z odzivom niste zadovoljni popravite parametre regulatorja.

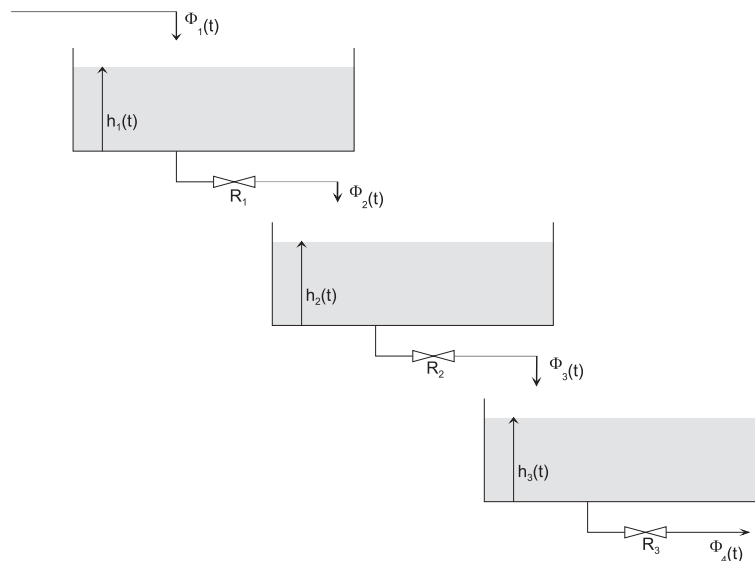
2. Dobljeni diskretni regulator preverite tudi na procesu, tako da v Simulink shemo namesto modela vstavite blok NI-PCI 6014. Pri izvedbi regulacije upoštevajte delovno točko procesa (slika 8.8).
3. Implementirajte dobljeni regulator na mikrokrmilniškem vezju Arduino Uno in preverite njegovo delovanje. Uporabite prvi A/D kanal (Ain1) za branje signala iz sensorja, izhod regulatorja pa naj bo PWM signal na pinu 9 (Aout1). Najprej preverite regulacijsko delovanje, kjer je referenca nastavljena na delovno točko, regulator pa odpravlja motnje, ki se zgodijo med delovanjem procesa. Motnje lahko simulirate z vplivanjem na proces (npr. previdno z roko nekoliko zadržite vrtenje motorja).
4. Izvedite regulator še za sledilno delovanje, kjer referenca ne bo konstantno nastavljena na delovno točko, ampak jo bo možno spreminjati med delovanjem. Za nastavljanje reference lahko uporabite serijsko komunikacijo - v pomoč vam je lahko program v poglavju 1.3. Referenco lahko nastavljate tudi preko dodatnega analognega vhoda (Ain2) na Arduino.

7. vaja: Načrtovanje vodenja s pomočjo Bodejevega diagrama

Osnovni namen vaje je frekvenčna analiza sistema s pomočjo Bodejevega diagrama in določitev regulatorja s pomočjo nastavitvenih pravil z Bodejim diagramom.

Opis sistema

Obravnavajmo sistem treh povezanih shranjevalnikov, kot so prikazani na sliki.



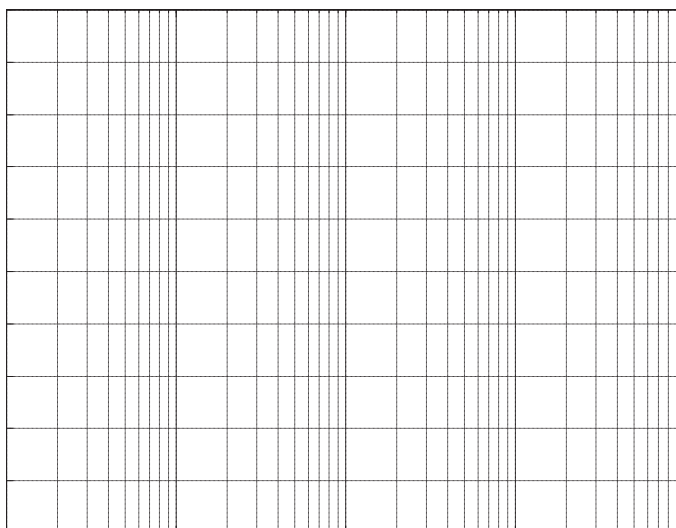
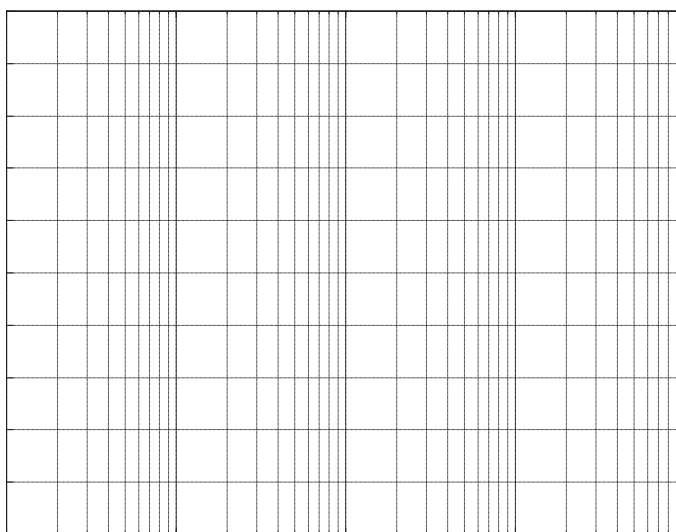
Obnašanje sistema lahko modeliramo s tremi diferencialnimi enačbami: $10 \frac{dh_1(t)}{dt} + h_1(t) = \Phi_1(t)$, $10 \frac{dh_2(t)}{dt} + h_2(t) = 2h_1(t)$ in $20 \frac{dh_3(t)}{dt} + h_3(t) = 2h_2(t)$. Od tod lahko določimo tri prenosne funkcije, ki opisujejo posamezen shranjevalnik:

$G_1(s) = \frac{H_1(s)}{\Phi_1(s)} = \frac{1}{10s+1}$, $G_2(s) = \frac{H_2(s)}{H_1(s)} = \frac{2}{10s+1}$ in $G_3(s) = \frac{H_3(s)}{H_2(s)} = \frac{2}{20s+1}$. Od koder dobimo skupno prenosno funkcijo procesa

$$G(s) = \frac{H_3(s)}{\Phi_1(s)} = G_1 G_2 G_3 = \frac{4}{(10s+1)(10s+1)(20s+1)}$$

7.1 Naloge

1. Narišite frekvenčno karakteristiko sistema treh povezanih tankov $G(s)$ z uporabo z Bodejevega diagrama (ukaz *bode*). Narišite še asimptotični potek Bodejevega diagrama.



2. Iz narisane Bodejevega diagrama odčitajte pasovno širino ω_b fazni razložek ϕ_m in amplitudni razložek K_m . Rezultat preverite z ukazom *margin*.

$\omega_b =$	$K_m =$	$\phi_m =$
--------------	---------	------------

3. S pomočjo nastavitvenih pravil na osnovi Bodejevega diagrama za sistem določite P in PI regulator. Nastavitvena pravila so opisana v podpoglavju Nastavitvena pravila za P-procese višjega reda s pomočjo Bodejevega diagrama, ki je del poglavja 8.

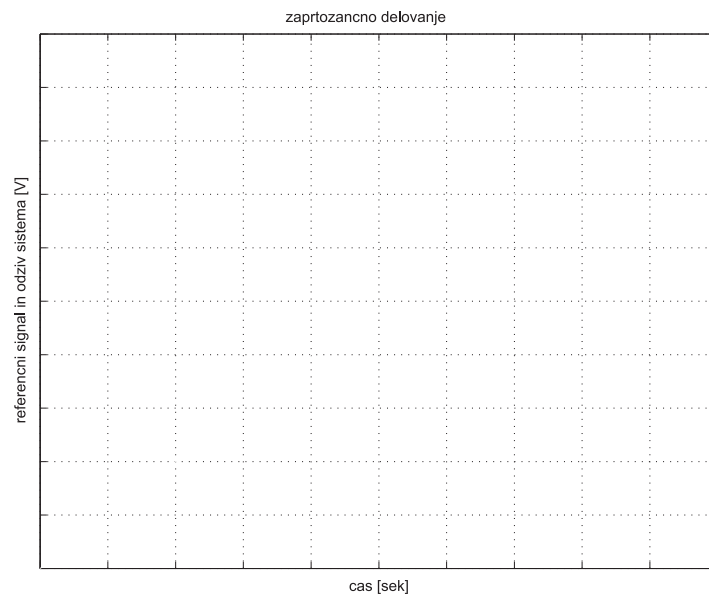
$K_P =$

$K_P =$	$T_I =$
---------	---------

4. Narišite Bodejev diagram dobljenega kompenziranega sistema (produkt prenosne funkcije regulatorja $G_{reg}(s)$ in procesa $G(s)$). Določite fazni razložek ϕ_m in amplitudni razložek K_m za sistem s PI regulatorjem.

$K_m =$	$\phi_m =$
---------	------------

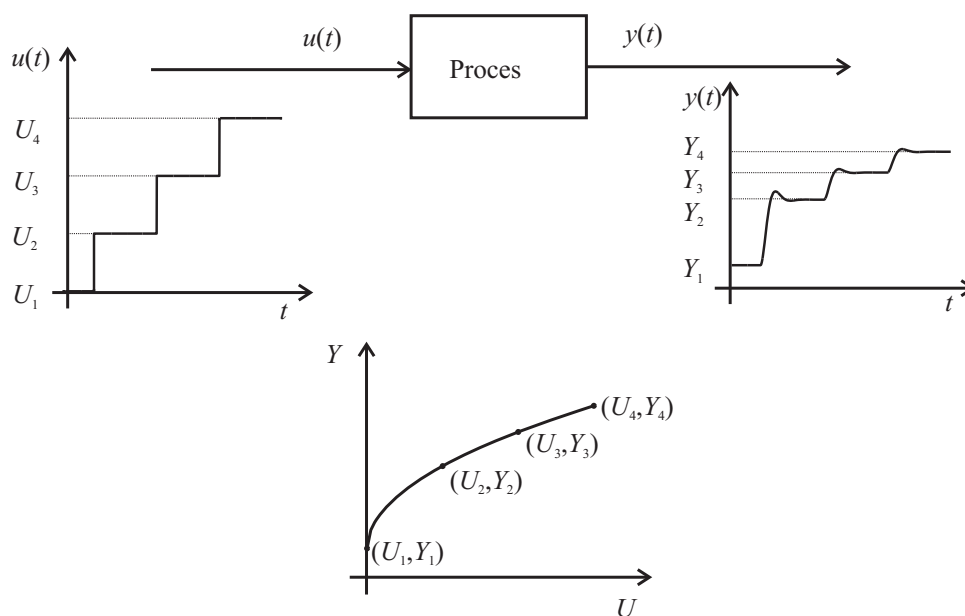
5. Delovanje dobljenih dveh regulatorjev (P in PI) preverite s pomočjo simulacije, kjer naj bo referenca enotina stopnica. Na skupni graf narišite potek izhoda procesa (h_3) za oba regulatorja.



8. Dodatek A - Teoretični in praktični napotki

8.1 Statična karakteristika

Statična karakteristika podaja odvisnost izhoda sistema glede na vhod sistema v ustaljenih razmerah (stacionarno stanje). Pri postopku določanja statične karakteristike proporcionalnih procesov moramo torej pri vsaki meritvi počakati, da prehodni pojav izzveni. Točko statične karakteristike izmerimo tako, da pri neki konstantni vrednosti vhoda pomerimo ustaljeno vrednost izhoda sistema. Več teh točk nato narišemo v skupni graf - statično karakteristiko $Y = f(U)$, kar ponazarja slika 8.1.



Slika 8.1: Statična karakteristika procesa, ocenjena iz štirih izmerjenih točk (U_i, Y_i) in aproksimirana s krivuljo.

Iz statične karakteristike lahko ocenimo področje delovanja procesa, njegovo nelinearnost in želeno področje delovanja oz. delovno točko procesa. Ojačenje

procesa v delovni točki je podano z naklonom tangente v izbrani delovni točki.

8.2 Linearizacija sistema v delovni točki

Večinoma sistemi v naravi oz. praksi izkazujejo nelinearne lastnosti. Za analizo sistemov (frekvenčno ali časovno) in za načrtovanje vodenja (ugotavljanje stabilnosti sistema) pa je linearni model procesa prikladnejši. Obravnava in teorija linearnih sistemov je dobro znana in vpeljana, kar ne velja za nelinearne sisteme. Pomembna lastnost, ki velja za linearne sisteme $y = f(x)$, je teorem natovarjanja ali superpozicije $f(a \cdot u_1 + b \cdot u_2) = a \cdot f(u_1) + b \cdot f(u_2)$, ki združuje dve lastnosti linearnih sistemov: aditivnost $f(u_1 + u_2) = f(u_1) + f(u_2)$ in homogenost $f(a \cdot u) = a \cdot f(u)$.

Pri obravnavi nelinearnih sistemov torej želimo oceniti linearizirani model, ki dobro opiše delovanje sistema v okolici izbrane delovne točke. Postopek določitve lineariziranega modela oz. linearnega modela podajamo v podpoglavjih 8.2.1 in 8.2.2. V podpoglavju 8.2.3 pa je pokazana shema za primerjavo odzivov linearnega modela in nelinearnega sistema.

8.2.1 Linearizacija nelinearnega modela procesa

Linearizacija je postopek, kjer nelinearno relacijo oz. model (statično ali dinamično) sistema aproksimiramo s prvima dvema členoma Taylorjeve vrste. Če imamo nelinearno statično relacijo v obliki

$$y = f(u)$$

kjer je f nelinearna preslikava vhoda u v izhod sistema y , lahko za okolico delovne točke U_{DT} , $Y_{DT} = f(U_{DT})$ izpeljemo linearni model

$$y \approx f(U_{DT}) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{u=U_{DT}} \cdot (u - U_{DT}) = n + K \cdot (u - U_{DT})$$

ki predstavlja enačbo premice z odmikom $n = f(U_{DT})$ in ojačenjem v delovni točki $K = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{u=U_{DT}}$ (nagib tangente v delovni točki), kjer je parcialni odvod ovrednoten v delovni točki.

Podobno je v primeru nelinearne dinamične relacije

$$\dot{y}(t) = f(y(t), u(t))$$

kjer z linearizacijo v okolici delovne točke U_{DT} , Y_{DT} določimo linearni model

$$\dot{y} \approx f(Y_{DT}, U_{DT}) + \left. \frac{\partial f(y, u)}{\partial y} \right|_{\substack{y=Y_{DT} \\ u=U_{DT}}} \cdot (y - Y_{DT}) + \left. \frac{\partial f(y, u)}{\partial u} \right|_{\substack{y=Y_{DT} \\ u=U_{DT}}} \cdot (u - U_{DT})$$

Dobljeni linearni model je deviacijski model, ki dobro opisuje sistem le v okolici delovne točke. Z vpeljavo spremenljivk $\Delta y = (y - Y_{DT})$, $\Delta u = (u - U_{DT})$ in $\dot{\Delta y} = (\dot{y} - f(Y_{DT}, U_{DT}))$, ki opisujejo le spremembe iz delovne točke, zapišemo linearni model kot

$$\dot{\Delta y} \approx \left. \frac{\partial f(y, u)}{\partial y} \right|_{\substack{y=Y_{DT} \\ u=U_{DT}}} \cdot \Delta y + \left. \frac{\partial f(y, u)}{\partial u} \right|_{\substack{y=Y_{DT} \\ u=U_{DT}}} \cdot \Delta u$$

kjer za ustaljeno stanje v delovni točki velja $\dot{Y}_{DT} = f(Y_{DT}, U_{DT}) = 0$. Linearni model je torej vedno podan v lineariziranem koordinatnem sistemu $(\Delta y, \Delta u)$, zaradi česar je potrebno pri uporabi lineariziranega modela v absolutnih koordinatah (y, u) vedno upoštevati še razliko med izhodiščem obeh koordinatnih sistemov - delovno točko Y_{DT}, U_{DT} . Velja torej

$$y = \Delta y + Y_{DT}$$

$$u = \Delta u + U_{DT}$$

Podrobneje je pravilna uporaba linearnega modela ilustrirana v podpoglavju 8.2.3.

8.2.2 Ocena linearne prenosne funkcije v delovni točki

Gre za praktičen pristop, kjer ocenimo linearni model procesa v neki delovni točki s pomočjo eksperimenta. Večinoma je to odziv procesa na stopničast signal iz delovne točke na vhodu procesa. Amplituda stopnice mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearnega področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Postopek določitve lineariziranega modela prvega reda z zakasnitvijo ponazarja slika 8.2. Preden naredimo stopničasto spremembo vhoda, moramo počakati, da se proces ustali v delovni točki. Iz dobljenega odziva v delovni točki določimo časovno konstanto T , mrtvi čas procesa T_m in ojačenje $K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$.

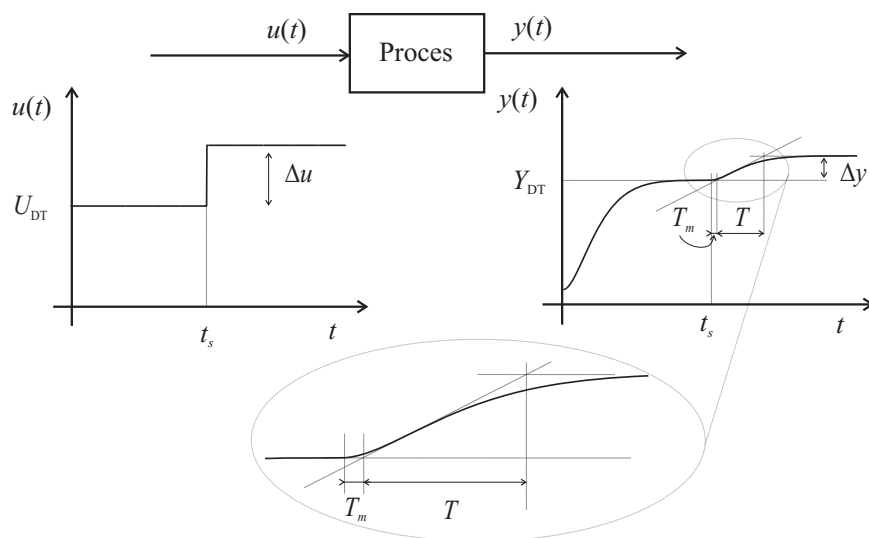
V večini primerov lahko dobljeni odziv opišemo s prenosno funkcijo 1. reda brez zakasnitve ($T_m = 0$)

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

kar je dober približek za procese 1. reda oz. procese z eno dominantno časovno konstanto.

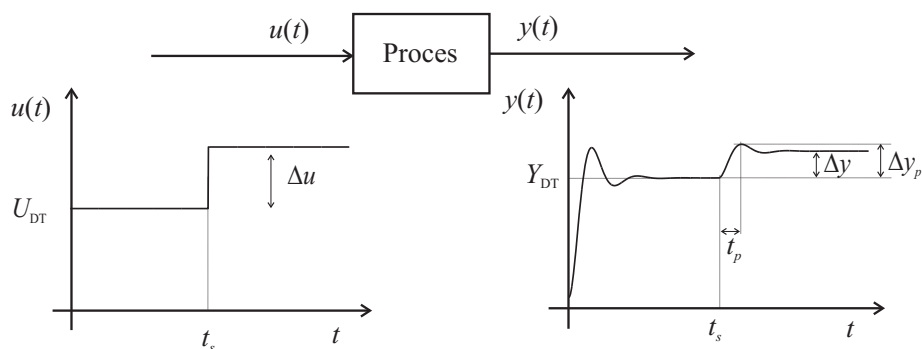
Procese z zakasnitvijo in procese višjega reda z eno dominantno časovno konstanto in nadkritično dušenim odzivom ($\zeta \geq 1$) lahko aproksimiramo z modelom 1. reda z zakasnitvijo

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-sT_m}$$



Slika 8.2: Določitev linearnega modela 1. reda z zakasnitvijo v delovni točki U_{DT} , Y_{DT} , s pomočjo odziva na stopnico.

Procese s podkritično dušenim odzivom ($0 \leq \zeta < 1$) na stopničasto vzbujanje lahko aproksimiramo z 2. redom. Odziv nelinearnega procesa 2. reda ponazarja slika 8.3. Model procesa v delovni točki (U_{DT}, Y_{DT}) zapišemo v obliki



Slika 8.3: Določitev linearnega modela 2. reda z ($0 \leq \zeta < 1$) v delovni točki U_{DT} , Y_{DT} , s pomočjo odziva na stopnico.

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

kjer je K ojačenje, ω_n lastna frekvenca in ζ koeficient dušenja. Pola tega procesa sta konjugirano kompleksna $s_{1,2} = \zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$. S pomočjo odziva iz

delovne točke na sliki 8.3 in upoštevanjem relacij

$$M_p = \frac{\Delta y_p - \Delta y}{\Delta y} = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

lahko določimo parametre modela 8.2.2 kot

$$\zeta = \sqrt{\frac{(\ln(M_p))^2}{\pi^2 + (\ln(M_p))^2}}$$

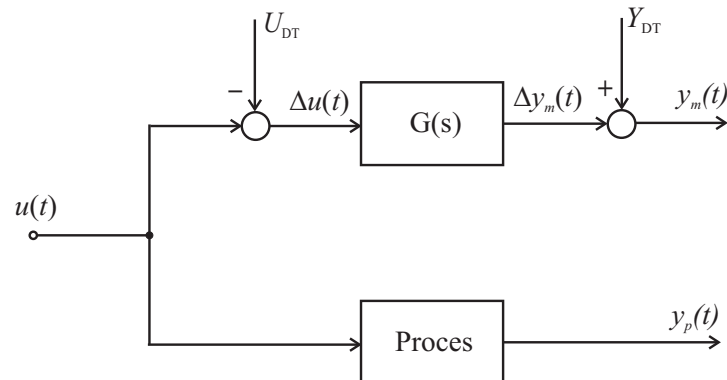
$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

Tako ocenjeni modeli procesa veljajo le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

8.2.3 Vrednotenje linearnega modela

V okolici delovne točke dobljeni linearni model procesa (teoretično z linearizacijo ali eksperimentalno) želimo primerjati s procesom, da ugotovimo njegovo ustreznost. Pravilna shema za vrednotenje, ki upošteva delovno točko je prikazana na sliki 8.4.



Slika 8.4: Shema za vrednotenje modela procesa, kjer je vključena informacija o delovni točki (U_{DT} , Y_{DT}).

Ker linearni model velja le za spremembe iz delovne točke (deviacijski model), moramo torej vходу v linearni model odšteti delovno točko vhoda U_{DT} , dobljenemu izhodu modela pa prišteti vrednost izhoda v delovni točki Y_{DT} .

8.3 Uglaševanje PID-regulatorjev

V tem podpoglavju so podana nastavitvena pravila za načrtovanje PID-regulatorjev in sicer za vodenje procesov prvega reda, prvega reda z mrtvim časom, procesov višjega reda in integrirnih procesov. Obravnavana je tudi optimalna nastavitvev koeficientov karakterističnega polinoma zaprtozančnega sistema in optimalna nastavitvev PID-regulatorja s pomočjo optimizacije cenilke. Na koncu je prikazana regulacijska shema, ki omogoča kompenzacijo delovne točke.

8.3.1 Nastavitvena pravila za proporcionalne procese 1. reda

Za vodenje proporcionalnega (ali P-procesa) prvega reda (P1) lahko uporabimo P-regulator (v tem primeru moramo predpisati želeno ojačenje zaprtozančnega sistema K_{zel} ali želeno časovno konstanto zaprtozančnega sistema T_{zel}) ali PI-regulator (predpisati moramo T_{zel} , ojačenje zaprtozančnega sistema je namreč vedno enako 1 – zakaj?), medtem ko je T časovna konstanta procesa 1. reda, K pa njegovo ojačenje.

regulator	K_P	T_I	T_D
P	$\frac{T - T_{zel}}{KT_{zel}}$ ali $\frac{K_{zel}}{K(1 - K_{zel})}$	/	/
PI	$\frac{T}{T_{zel}K}$	T	/

Gornja nastavitvena pravila za P-regulator v tabeli lahko izpeljemo, če primerjamo želeno zaprtozančno prenosno funkcijo $G_{zel} = \frac{K_{zel}}{T_{zel}s+1}$ z izračunano zaprtozančno prenosno funkcijo $G_z = \frac{K_P G}{1+K_P G}$, kjer je K_P proporcionalno ojačenje regulatorja in $G = \frac{K}{Ts+1}$ prenosna funkcija procesa. Iskano ojačenje K_P lahko dobimo s primerjavo časovnih konstant G_{zel} in G_z ali s primerjavo ojačenj G_{zel} in G_z . Ker ima P-regulator na P-procesu prvega reda vedno pogrešek v ustaljenem stanju, je smiselna izbira $0 < K_{zel} < 1$.

Nastavitvena pravila za PI-regulator izpeljemo tako, da izberemo želeno zaprtozančno prenosno funkcijo $G_{zel} = \frac{1}{T_{zel}s+1}$ (I-del regulatorja kompenzira pogrešek v ustaljenem stanju, torej $K_{zel} = 1$). Iz zaprtozančne prenosne funkcije $G_z = \frac{G_{PI}G}{1+G_{PI}G}$ izrazimo $G_{PI} = \frac{G_z}{G - G_z G}$, kjer za G_z vstavimo G_{zel} , in dobimo $G_{PI} = \frac{T}{T_{zel}K} \left(1 + \frac{1}{Ts}\right)$.

8.3.2 Nastavitvena pravila za proporcionalne procese 1. reda z mrtvim časom

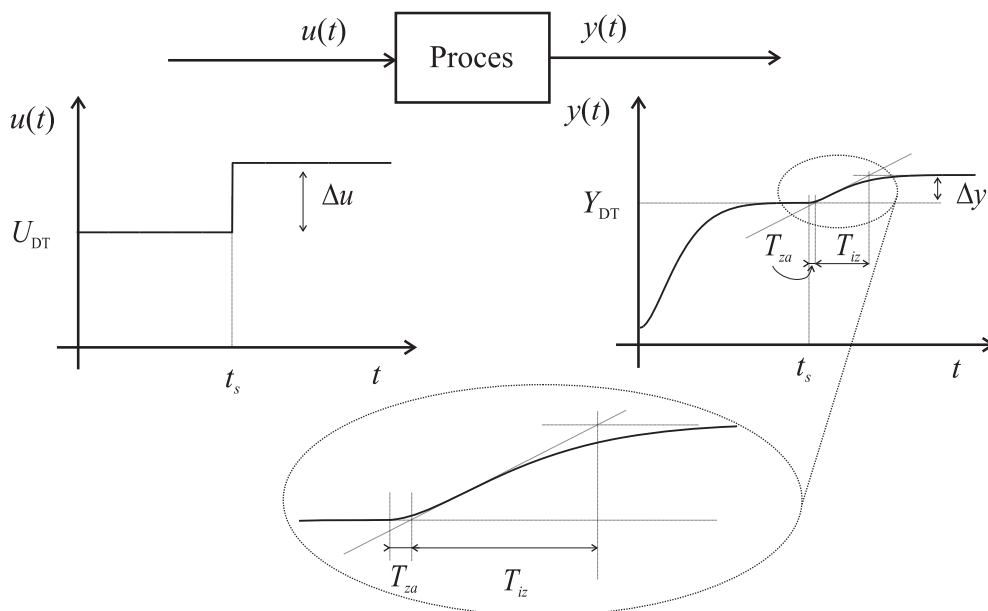
Potrebujemo ojačenje procesa K , časovno konstanto T in mrtvi čas T_m . Iz nastavitvenih pravil Ziegler-Nichols določimo regulator.

regulator	K_P	T_I	T_D
P	$\frac{T}{KT_m}$	/	/
PI	$0,9 \frac{T}{KT_m}$	$3,3 T_m$	/
PID	$1,2 \frac{T}{KT_m}$	$2 T_m$	$0,5 T_m$

8.3.3 Nastavitvena pravila za P-procese višjega reda (Ziegler-Nichols)

Podobno kot pri naslednji skupini nastavitvenih pravil (Chien-Hrones-Reswick), tudi ta pravila temeljijo na odprtozančnem preizkusu s stopničastim vhodnim signalom. V prevojni točki (za P-procese višjega reda) odziva narišemo tangento in ocenimo čas zakasnitve T_{za} in čas izravnave T_{iz} ter ojačenje procesa K (glej sliko 8.5). Iz nastavitvenih pravil Ziegler-Nichols določimo regulator.

regulator	K_P	T_I	T_D
P	$\frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	/	/
PI	$0,9 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$3,3 T_{za}$	/
PID	$1,2 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$2 T_{za}$	$0,5 T_{za}$



Slika 8.5: Odprtozančni odziv procesa na stopničasto vzbujanje in ocena parametrov T_{za} , T_{iz} in $K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$.

8.3.4 Nastavitvena pravila za P-procese višjega reda (Chien-Hrones-Reswick)

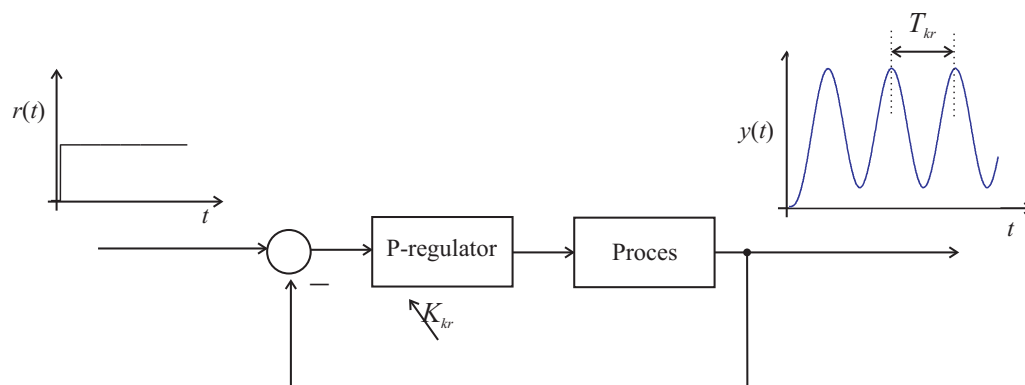
Podobno kot pri prejšnji skupini nastavitvenih pravil (Ziegler-Nichols), tudi ta pravila temeljijo na odprtozančnem preizkusu s stopničastim vhodnim signalom in se uporabljajo za vodenje proporcionalnih procesov višjega reda. V prevojni točki odziva narišemo tangento in ocenimo čas zakasnitve T_{za} in čas izravnave T_{iz} ter ojačenje procesa K (za ilustracijo glejte sliko 8.5).

regulator		aperiodični odziv z najkrajšim umiritvenim časom		najkrajši umiritveni čas z 20% prenehajem	
		regulacijsko delovanje	sledilno delovanje	regulacijsko delovanje	sledilno delovanje
P	K_P	$0,3 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,3 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,7 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,7 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$
PI	K_P	$0,6 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,35 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,7 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,6 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$
	T_I	$4 T_{za}$	$1,2 T_{iz}$	$2,3 T_{za}$	T_{iz}
PID	K_P	$0,95 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,6 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$1,2 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$	$0,95 \frac{T_{iz}}{KT_{za}}$
	T_I	$2,4 T_{za}$	T_{iz}	$2 T_{za}$	$1,35 T_{iz}$
	T_D	$0,42 T_{za}$	$0,5 T_{za}$	$0,42 T_{za}$	$0,47 T_{za}$

8.3.5 Nastavitvena pravila z uporabo nihajnega preizkusa (Ziegler-Nichols)

Nihajni preizkus izvedemo tako, da proces in proporcionalni regulator sklenemo z negativno povratno zanko in povečujemo ojačenje toliko časa, da proces postane mejno stabilen in nedušeno oscilira. Ojačenje v tistem trenutku imenujemo kritično ojačenje K_{kr} , T_{kr} pa je perioda nihanja (glej sliko 8.6).

regulator	K_P	T_I	T_D
P	$0,5 K_{kr}$	/	/
PI	$0,45 K_{kr}$	$0,83 T_{kr}$	/
PID	$0,6 K_{kr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,125 T_{kr}$

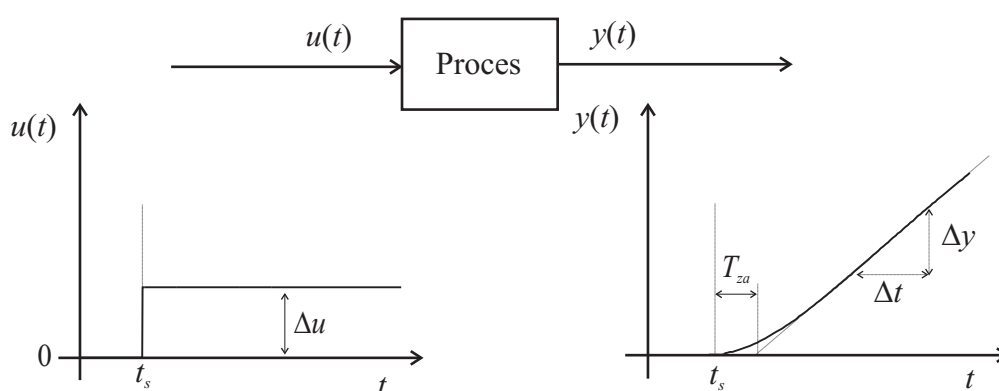


Slika 8.6: Zaprtozančni odziv sistema na spremembo reference. Pri kritičnem ojačenju P-regulatorja K_{kr} izhod $y(t)$ nedušeno zaniha s periodo T_{kr} .

8.3.6 Nastavitvena pravila za integrirne procese

Načrtovanje regulatorja temelji na odprtozančnem odzivu na stopničasti vhodni signal kot prikazuje slika 8.7. Iz odziva ocenimo K_I ("integrirno ojačenje" sistema), ki ga dobimo, če delimo naklon odziva sistema v ustaljenem stanju z amplitudo vhodne stopnice ($K_I = \frac{\Delta y}{\Delta t} \frac{1}{\Delta u}$). Čas zakasnitve T_{za} dobimo, če narišemo tangento na odziv v ustaljenem stanju in odčitamo, kje seka nivo izhodnega signala pred nastopom stopničaste spremembe na vходу procesa. (Opomba: Ker je proces integrirnega značaja, je potrebno izvesti stopničasto spremembo iz $u = 0$ na $u = \Delta u$, sicer proces pred nastopom spremembe ne bi bil v ustaljenem stanju).

regulator	K_P	T_I	T_D
P	$\frac{0,5}{K_I T_{za}}$	/	/
PD	$\frac{0,5}{K_I T_{za}}$	/	$0,5 T_{za}$
PI	$\frac{0,42}{K_I T_{za}}$	$5,8 T_{za}$	/
PID	$\frac{0,4}{K_I T_{za}}$	$3,2 T_{za}$	$0,8 T_{za}$



Slika 8.7: Odprtozančni odziv I-procesa na stopničasto vzbujanje in ocena parametrov T_{za} in $K_I = \frac{\Delta y}{\Delta t} \frac{1}{\Delta u}$.

8.3.7 Nastavitev polinoma zaprtozančnega sistema (Graham-Lathrop)

Pri tej metodi gre za izenačitev karakterističnega polinoma zaprtozančnega sistema in polinoma v tabeli, ki je dobljen z optimizacijo kriterijske funkcije ITAE ($\int_0^\infty t|e|dt$). Parameter ω_n je lastna frekvenca zaprtozančnega sistema.

	imenovalec zaprtozančne prenosne funkcije
1. red	$s + \omega_n$
2. red	$s^2 + 1,4\omega_n s + \omega_n^2$
3. red	$s^3 + 1,75\omega_n s^2 + 2,15\omega_n^2 s + \omega_n^3$
4. red	$s^4 + 2,1\omega_n s^3 + 3,4\omega_n^2 s^2 + 2,7\omega_n^3 s + \omega_n^4$
5. red	$s^5 + 2,8\omega_n s^4 + 5\omega_n^2 s^3 + 5,5\omega_n^3 s^2 + 3,4\omega_n^4 s + \omega_n^5$
6. red	$s^6 + 3,25\omega_n s^5 + 6,6\omega_n^2 s^4 + 8,6\omega_n^3 s^3 + 7,45\omega_n^4 s^2 + 3,95\omega_n^5 s + \omega_n^6$

Pravila veljajo za sistem, katerega zaprtozančna prenosna funkcija ima obliko $G(s) = \frac{a_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}$. V kolikor ima zaprtozančna prenosna funkcija ničlo, moramo zagotoviti (z izbiro prostega parametra), da je le-ta zanemarljiva glede na pole sistema.

8.3.8 Nastavitvena pravila za P-procese višjega reda s pomočjo Bodejevega diagrama

Pravila temeljijo na Bodejevem diagramu odprtozančne prenosne funkcije $G(s)H(s)$, ki mora biti vsaj drugega reda. Pravila predpišejo potrebni fazni razložek ($\phi_m = 18^\circ$), ki ga dosežemo s primerno izbiro ojačenj regulatorja.

Iz Bodejevega diagrama moramo odčitati frekvenco ω_a pri faznem kotu $\angle G(j\omega_a)H(j\omega_a) = -162^\circ$ in frekvenco ω_b pri faznem kotu $\angle G(j\omega_b)H(j\omega_b) = -144^\circ$. Nadalje odčitamo še absolutne vrednosti $L(j\omega_a) = 20\log(|G(j\omega_a)H(j\omega_a)|)$ in $L(j\omega_b) = 20\log(|G(j\omega_b)H(j\omega_b)|)$. S pomočjo teh podatkov iz tabele odčitamo regulator.

regulator	K_P	T_I	T_D
P	$\frac{1}{ G(j\omega_a)H(j\omega_a) }$	/	/
PI	$\frac{1}{ G(j\omega_b)H(j\omega_b) }$	$\frac{2\pi}{\omega_a}$	/
PID	$\frac{1}{ G(j\omega_b)H(j\omega_b) }$	$\frac{2\pi}{\omega_a}$	$0, 1 \frac{2\pi}{\omega_a}$

Kot vidimo iz tabele je ojačenje $K_P = \frac{1}{|G(j\omega_a)H(j\omega_a)|}$ kar pomeni, da je ojačenje kompenziranega sistema pri frekvenci ω_a enako 1 oz 0 dB in fazni razložek $\phi_m = 18^\circ$. Pri PI in PID regulatorju vnese I del še dodatno zaostajanje, zato K_P določimo pri faznem kotu -144° .

8.3.9 Določitev PID-regulatorja s pomočjo optimizacije

Optimizacija je postopek, kjer s pomočjo poskušanja iščemo optimalno rešitev za dani problem. V našem primeru iščemo parametre PID-regulatorja, ki minimizirajo ali maksimizirajo (odvisno od situacije) določeno cenilko (kriterijsko funkcijo) pri nekem prehodnem pojavu (sprememba reference ali motnje).

Cenilka je torej merilo kvalitete obravnavanega zaprtozančnega sistema. Odvisna je lahko od pogreška in regulirne veličine. Nekaj primerov cenilk (glej knjigo [2]) je podanih v nadaljevanju. Primera cenilk, ki upoštevata časovni potek pogreška:

$$C_{ISE} = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$$

$$C_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

Primera cenilke, ki utežita časovni potek pogreška s časom:

$$C_{ITSE} = \int_0^{\infty} te(t)^2 dt$$

$$C_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

in primer možnih cenilk, kjer razen pogreška upoštevamo tudi regulirno veličino (varčne cenilke)

$$C = \int_0^{\infty} (e(t)^2 + R(u(t) - u(\infty))^2) dt$$

$$C = \int_0^{\infty} (t |e(t)| + R(u(t) - u(\infty))^2) dt$$

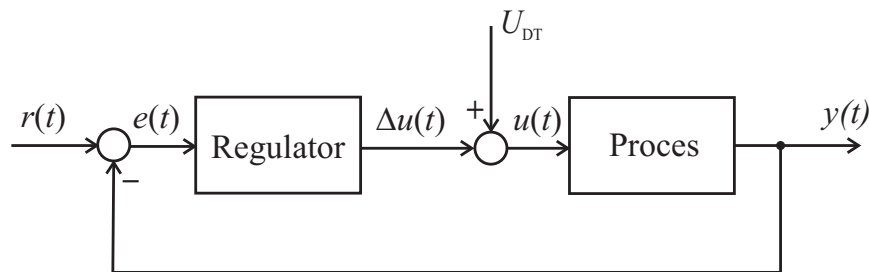
kjer je R utežni faktor regulirne veličine.

V okolju Matlab-Simulink lahko za optimizacijo uporabimo temu namenjeno funkcijo "fminsearch" (oz. "fminunc"). Ključni vhodni parameter funkcije "fminsearch" je m-funkcija, ki za dane vrednosti parametrov PID-regulatorja izračuna vrednost kriterijske funkcije.

8.3.10 Regulacijska shema s kompenzacijo delovne točke

Proces želimo regulirati v okolici delovne točke (U_{DT} , Y_{DT}). Z enim od predstavljenih načinov (podpoglavje 8.3) smo določili ustrezeni regulator, ki zagotavlja sledilno ali regulacijsko delovanje zaprte zanke.

Najenostavnejši linearni regulator je P-regulator, kjer regulirno veličino dobimo tako, da regulacijski pogrešek množimo s konstanto. Glavna pomanjkljivost P-regulatorja je pogrešek v ustaljenem stanju pri konstantni referenci oz. konstantni motnji. To pomanjkljivost lahko vsaj v delovni točki odpravimo, če uporabimo regulacijsko shemo iz slike 8.8. Ko je referenca $r(t) = Y_{DT}$, se proces ustali



Slika 8.8: Kompenzacija delovne točke v regulacijski zanki.

v delovni točki, zaradi česar je regulacijski pogrešek $e(t) = 0$, $\Delta u = Ke(t) = 0$ in je zato vhod v proces $u(t) = U_{DT}$.

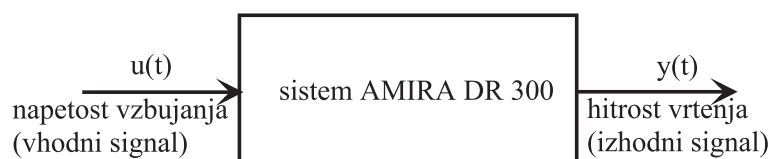
V kolikor uporabimo PI-regulator, I del poskrbi za izničenje pogreška v ustaljenem stanju saj integrira pogrešek, dokler regulirna veličina ne zagotovi ničnega pogreška. Čas, ki je potreben, da I del regulatorja odpravi regulacijski pogrešek, je odvisen od integracijske časovne konstante I-regulatorja (T_I). V kolikor uporabimo regulacijsko shemo iz slike 8.8, lahko v okolici delovne točke ta integracijski čas bistveno skrajšamo, s čemer dosežemo hitrejši odziv regulacijske zanke.

9. Dodatek B - Opis laboratorijskih modelnih naprav

9.1 Motor-Generator (Amira DR 300)

Opis sistema

Modelna naprava AMIRA DR 300, kot jo shematično prikazuje slika, je namenjena študiju regulacije hitrosti vrtenja električnega motorja.



Glavna sestavna dela modelne naprave sta komandna postaja in mehanski sistem. S komandno postajo upravljamo preko komandne plošče. Mehanski del sestavljajo motor, generator, lamelna sklopka, taho generator in inkrementalni dajalnik. Tipali modelne naprave sta taho-generator za hitrost in inkrementalni dajalnik za zasuk. Prosti konec motorne gredi je preko sklopke priključen na gred generatorja. Na komandni plošči je dostop do izhodnega toka motorja in generatorja. Drugi konec gredi generatorja omogoča priključitev dodatne mase. Motor in generator sta pritrjena na aluminijast nosilec. Mehanski del je priključen na krmilno elektroniko z enim konektorjem. Vsi mehanski deli so zaščiteni s prosojnim pleksi steklom, z možnostjo odpiranja.

Obravnavani proces je nelinearen, zato pri njegovi obravnavi izberemo delovno točko DT (U_{DT} , Y_{DT}), v okolici katere ga želimo uporabljati.

V okolici delovne točke DT izvedemo stopničasto vzbujanje na vhodu procesa. Amplituda stopnice ΔU mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearnega področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Iz odziva procesa ocenimo linearni model procesa v obliki

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1}$$

Tako ocenjeni model procesa velja le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

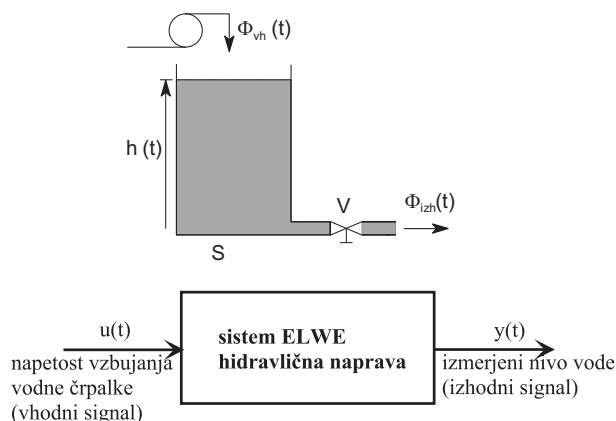
Podatki:

- območje aktuatorja: $\pm U_{max} = \pm 10$
- čas vzorčenja: $T_S = 0.01s$

9.2 Hidravlični sistem (ELWE)

Opis sistema

Obravnavani sistem sestoji iz vodne črpalke, s pomočjo katere črpamo vodo v shranjevalnik z volumskim pretokom Φ_{vh} . Nivo vode h lahko spremljamo s senzorjem, ki je nameščen na napravi. Dovoljeno napetostno območje vzbujanja vodne črpalke je v območju od 0 do 10 V, v istem napetostnem območju pa pričakujemo tudi meritev nivoja vode v shranjevalniku, katerega presek ima ploščino S in izhodni volumski pretok Φ_{izh} . Shematično lahko torej obravnavani sistem predstavimo z bločnim diagramom na sliki.



Obravnavani proces je nelinearen, zato pri njegovi obravnavi izberemo delovno točko DT (U_{DT} , Y_{DT}), v okolici katere ga želimo uporabljati.

V okolici delovne točke DT izvedemo stopničasto vzbujanje na vходу procesa. Amplituda stopnice ΔU mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearnega področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Iz odziva procesa ocenimo linearni model procesa v obliki

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1}$$

Tako ocenjeni model procesa velja le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

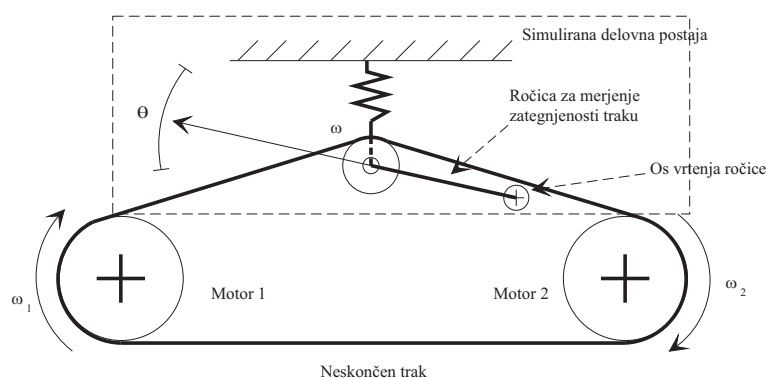
Podatki:

- območje aktuatorja: $\pm U_{max} = \pm 10V$
- čas vzorčenja: $T_S = 0.1s$

9.3 Proces navijanja (TQ CE 108)

Opis sistema

Modelna naprava TQ CE 108, ki jo shematično prikazuje slika, ponazarja problem nadzora napetosti v materialu in hitrosti obdelovanega materiala. Praktične primere takih procesov srečamo v tekstilni industriji, pri obdelavi in predelavi papirja in podobnih primerih, kjer se material navija z ene osi na drugo, vmes pa je obdelovalno mesto.



Naprava je sestavljena iz treh jermenic, nameščenih na pokončni plošči tako, da oblikujejo trikotnik, ki leži na osnovnici. Spodnji jermenici sta neposredno pritrjeni na osi dveh nominalno identičnih servomotorjev, ki poganjata neskončen elastičen trak. Navora obeh motorjev je mogoče nadzorovati s priključenima napetostima in imata možnost obojestranskega neodvisnega vrtenja.

Gnana jermenica skupaj z ročico, na kateri je nameščena, predstavlja delovno postajo obdelovalnega stroja. Na njej merimo zategnjenost in hitrost pomika traku. Hitrost ω merimo s pulzno-števnim tahogeneratorjem in se spreminja v območju od 0 do 3000 vrtljajev na minuto. Zategnjenost traku merimo posredno preko kotnega pomika ročice Θ , na kateri je nameščena gnana jermenica. Pomik zaznavamo z natančnim servo potenciometrom, nameščenim v osi vrtenja ročice, ki se giblje v območju $\pm 10^\circ$.

Delovanje obravnavanega procesa je mogoče nekoliko poenostaviti. V ta namen pritrdite vijak na zadnji strani naprave, s čimer onemogočite nihanje jermenice. Vzbujanji obeh pogonskih motorjev zvežite paralelno. Tako smo dobili proces, ki ga je mogoče opisati kot sistem z enim vhodnim signalom, tj. napetostjo vzbujanja pogonskih motorjev in enim izhodom, tj. izmerjeno napetostjo tahogeneratorja jermenice, ki govori o hitrosti vrtenja jermenice.

Obravnavani proces je nelinearen, zato pri njegovi obravnavi izberemo delovno točko DT (U_{DT} , Y_{DT}), v okolici katere ga želimo uporabljati.

V okolici delovne točke DT izvedemo stopničasto vzbujanje na vходу procesa. Amplituda stopnice ΔU mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearnega področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Iz odziva procesa ocenimo linearni model procesa v obliki

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1}$$

Tako ocenjeni model procesa velja le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

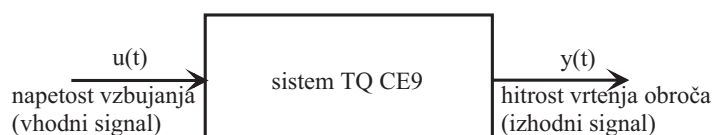
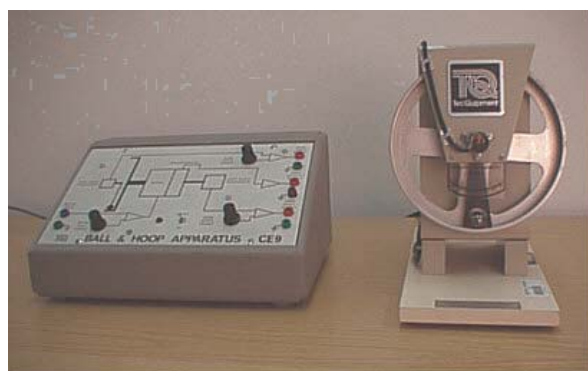
Podatki:

- območje aktuatorja: $\pm U_{max} = \pm 5V$
- čas vzorčenja: $T_S = 0.01s$

9.4 Elektromotor z obročem (TQ CE 9)

Opis sistema

Modelna naprava TQ CE9 je ilustrirana na sliki. V celoti gledano sestoji iz obroča, ki ga lahko preko napetostnega vzbujanja motorja vrtimo v obe smeri in kroglice, ki jo namestimo v utor obroča. Pri rokovanju s sistemom pa uporabljamo tudi pripadajočo instrumentacijsko škatlo. Pilotna naprava je namenjena študiju modeliranja in načrtovanja vodenja oscilatornih sistemov. V našem primeru se bomo posvetili le opazovanju dinamičnih lastnosti in načrtovanju vodenja dela sistema. Opazovali bomo hitrost vrtenja obroča od napetosti vzbujanja elektromotorja. To pomeni, da bomo kroglico iz obroča pred pričetkom izvajanja eksperimentov odstranili.



Glavna sestavna dela modelne naprave sta komandna postaja in mehanski sistem. S komandno postajo upravljamo preko komandne plošče. Komandna postaja vsebuje servo ojačevalnike za motor in generator, enoto za prilagajanje signalov, napajalno enoto in modul z izhodi.

Obravnavani proces je nelinearen, zato pri njegovi obravnavi izberemo delovno točko DT (U_{DT} , Y_{DT}), v okolici katere ga želimo uporabljati.

V okolici delovne točke DT izvedemo stopničasto vzbujanje na vходу procesa. Amplituda stopnice ΔU mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearnega področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Iz odziva procesa ocenimo linearni model procesa v obliki

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1}$$

Tako ocenjeni model procesa velja le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

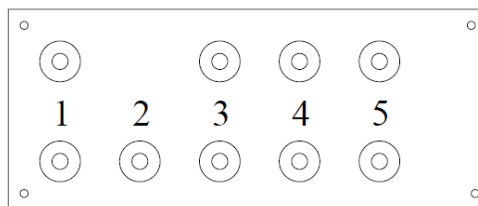
Podatki:

- območje aktuatorja: $-10 - 10V$
- čas vzorčenja: $T_S = 0.01s$

9.5 Helikopter

Opis sistema

Modelna naprava helikopter je prikazana na sliki. Naprava je, dinamično gledano, nihalo, ki ga iz ravnovesne lege lahko premaknemo s pomočjo propelerja. S pomočjo namestitve dveh protiuteži lahko spreminjamo dinamiko sistema. Naprava ima izrazito nelinearno dinamiko. Trenje v ležajih je majhno in ne vpliva bistveno na ponovljivost poskusov.



Elektronika naprave je zaprta v škatlo PC računalnika. Na škatli se nahajajo priključne puše (glej sliko). Napravo priključimo tako, da debelejšo rdečo in črno žico z oznakama 5 povežemo na puši z oznakama 5 in to tako, da barve puš ustrezajo barvam priključkov. Na enak način povežemo žici z oznakama 3 in 2. Na priključno mesto 4 priključimo krmilni signal za hitrost vrtenja motorja, na mesto 1 pa merilnik napetosti senzorja.

Prenosno funkcijo naprave ocenimo eksperimentalno. V okolici delovne točke DT izvedemo stopničasto vzbujanje na vhodu procesa. Amplituda stopnice ΔU mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearnega področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Iz odziva procesa ocenimo linearni model procesa v obliki

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Tako ocenjeni model procesa velja le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

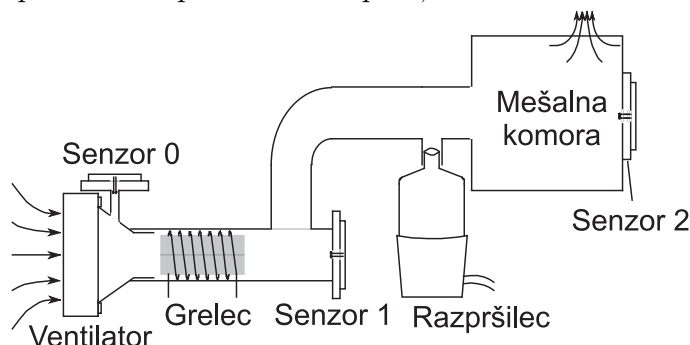
Podatki:

- območje aktuatorja: $0 - 10V$
- čas vzorčenja: $T_S = 0.01s$

9.6 Klima naprava

Opis sistema

Modelna naprava ima dve izhodni veličini: temperaturo zraka in relativno vlažnost. Obe spremenljivki sta navzkrižno povezani, kar pomeni, da zvišanje temperature povzroči tudi zmanjšanje relativne vlažnosti in obratno, zvečanje relativne vlage povzroči zmanjšanje temperature izhodnega zraka. Naprava zato predstavlja tipični multivariabilni sistem z dvema vhodoma in dvema izhodoma. Lahko zagotovimo tudi čisto univariabilno obnašanje sistema, če opazujemo le eno spremenljivko, druge pa pri tem ne spreminjamo. Opazovani proces je nelinearen. Prvič zaradi kvadratične odvisnosti moči na grelcu od vhodne napetosti, in drugič zaradi nelinearne odvisnosti tlaka nasičenja (od katerega je odvisna relativna vlažnost) od temperature. Na napravi so nameščeni trije pari senzorjev. V vsakem sta tipalo za temperaturo in tipalo, ki zaznava relativno vlažnost.



Proces se odvija v stekleni cevi notranjega premera 2 cm in dolžine 30 cm, ki je dvakrat kolenasto zavita. Konstanten pretok zraka skozi cev zagotavlja majhen ventilator, ki je nameščen na začetku cevi. Napetost na ventilatorju, in s tem masni pretok zraka skozi cev, je možno nastavljati ročno s pomočjo potenciometra ali avtomatsko. Med ročnim in avtomatskim načinom preklapljamo s stikalom, ki se nahaja na čelni plošči. Spreminjanje masnega toka zraka predstavlja le spremembo parametrov našega sistema in ga ne obravnavamo kot regulirno veličino. Zaradi tega boste pri vseh meritvah nastavili napetost ventilatorja na srednjo vrednost in je med meritvijo ne boste spreminjali. Za ventilatorjem je v cevi nameščen grelec. Gre za enostavno navitje iz cekas žice na križno postavljena sljudna lističa. Sam grelec ne predstavlja znatnega mehanskega upora zraku pri prehodu skozi cev. Moč na grelcu je možno (podobno kot napetost na ventilatorju) spreminjati ročno ali avtomatsko. Mešanje zraka se odvija na koncu cevi v mešalni komori. Izdelana je iz pleksi stekla in z notranje strani obdana s stiroporjem zaradi toplotne izolacije. Čeprav so zunanje mere mešalne komore sorazmerno velike, je notranji volumen zelo majhen. Segret in/ali ovlažen zrak izstopa iz procesa skozi luknjico na zgornji strani komore. Tik pred mešalno komoro je nameščen razpršilec vodnih kapljic s katerim vlažimo zrak.

Obravnavali bomo le prvi del naprave, ki predstavlja proces gretja. Vhod v napravo je napetost na grelcu, izhod pa temperatura zraka v sredini naprave (za grelcem). Obravnavani proces je nelinearen, zato pri njegovi obravnavi izberemo delovno točko DT (U_{DT} , Y_{DT}), v okolici katere ga želimo uporabljati.

Prenosno funkcijo naprave ocenimo eksperimentalno. V okolici delovne točke DT izvedemo stopničasto vzbujanje na vhodu procesa. Amplituda stopnice ΔU mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearne področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Iz odziva procesa ocenimo linearni model procesa v obliki

$$G(s) = \frac{K}{T_s s + 1}$$

Tako ocenjeni model procesa velja le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

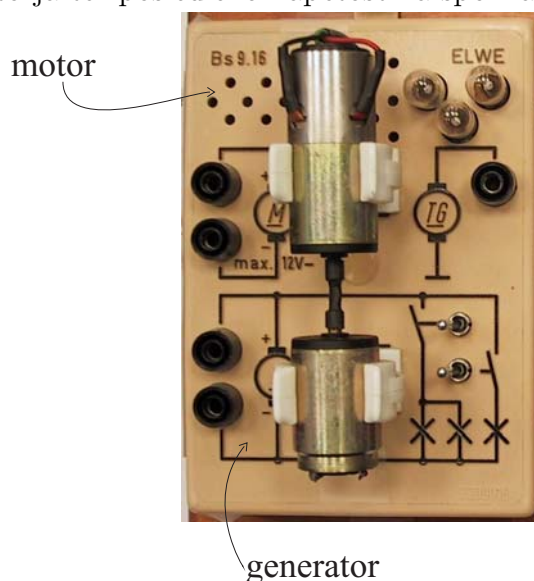
Podatki:

- območje aktuatorja: $0 - 10V$
- čas vzorčenja: $T_S = 0.01s$

9.7 Motor-generator s pogonom PWM

Opis sistema

Modelna naprava predstavlja mehanski sklop elektromotorja in generatorja. Z napetostjo na elektromotorju lahko uravnavamo vrtenje gredi elektromotorja, ki je povezana z gredjo generatorja. S preklopitvijo različnih električnih porabnikov (žarnice) na izhodne sponke generatorja spreminjamo obremenitev motorja in s tem tudi obrate motorja ter posledično napetost na sponkah generatorja.



Vhodni signal, ki predstavlja vzbujanje elektromotorja, je priključen direktno na sponke elektromotorja. Vhodni signal je lahko tudi pulznoširinsko modeliran (PWM), v kolikor je frekvenca PWM signala bistveno večja od pasovne širine procesa.

Obraunavani proces je nelinearen, zato pri njegovi obravnavi izberemo delovno točko DT (U_{DT} , Y_{DT}), v okolici katere ga želimo uporabljati.

Prenosno funkcijo naprave ocenimo eksperimentalno. V okolici delovne točke DT izvedemo stopničasto vzbujanje na vhodu procesa. Amplituda stopnice ΔU mora biti primerno izbrana, torej dovolj majhna, da ne preseže meja linearnega področja in hkrati dovolj velika, da je vpliv šuma in motenj procesa zanemarljiv. Iz odziva procesa ocenimo linearni model procesa v obliki

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1}$$

Tako ocenjeni model procesa velja le v okolici delovne točke (velikost okolice je odvisna od nelinearnosti procesa).

Podatki:

- območje aktuatorja: $0 - 10V$
- čas vzorčenja: $T_S = 0.01s$

10. Dodatek C - Zajem in obdelava podatkov v realnem času v okolju Matlab-Simulink

Za povezavo z realnimi napravami uporabljamo procesni vmesnik National Instruments NI PCI 6014 (<http://www.ni.com/>). Vmesnik omogoča analogno-digitalno pretvorbo (A/D), digitalno-analogno pretvorbo (D/A), zajem digitalnih vhodov in izhodov, realizacijo števcov in sinhronizacijo z realnim časom. Vmesnik omogoča priključitev do 8 analognih vhodnih signalov in generira do 2 analogna izhodna signala. Območje analognih vhodnih signalov je $\pm 10V$, območje analognih izhodnih signalov pa je $\pm 10V$.

Za izmenjavo podatkov s procesnim vmesnikom NI PCI 6014 uporabljamo bloke iz knjižnice NI-PCI, ki so nahaja v zbirki knjižnic Simulink. Z dvojnim klikom na ikoni NI-PCI odpremo okno, v katerem so trije bloki za komunikacijo s procesnim vmesnikom NI PCI 6014. Prvi blok se imenuje NI PCI 6014 A/D D/A in omogoča analogno-digitalno in digitalno-analogno pretvorbo. Ostala dva pa sta NI PCI 6014 A/D in NI PCI 6014 D/A in omogočata samo ali A/D pretvorbo ali samo D/A pretvorbo.

Uporaba bloka NI PCI 6014 A/D D/A

Blok NI PCI 6014 A/D D/A lahko uporabljamo za komunikacijo z zunanjo napravo oziroma procesom. V simulacijski shemi blok NI PCI 6014 A/D D/A dejansko predstavlja zunanji proces. Signal, ki ga pripeljemo na vhod bloka, se pretvori z D/A pretvornikom in predstavlja vhod v proces, signal, ki ga dobimo na izhodu bloka, pa je rezultat A/D pretvorbe in predstavlja izhod procesa. Preko A/D in D/A pretvornika lahko zajemamo več signalov oz. kanalov, tako da lahko z enim blokom NI PCI 6014 A/D D/A generiramo oz. merimo več signalov. Če želimo generirati več signalov, jih moramo pred vhodom v blok združiti z multipleksorskim blokom (blok **Mux**), če pa merimo več signalov in želimo iz izhoda bloka določiti posamezne signale, uporabimo demultiplekserski blok (blok **Demux**).

V primeru zaprtozančnega vodenja lahko blok uporabljamo tako, da ga postavimo na mesto, kjer imamo v običajni simulacijski shemi model procesa.

Parametri bloka NI PCI 6014 A/D D/A

Parametri pogovornega okna NI PCI 6014 A/D D/A bloka so naslednji:

- **A/D channel numbers** - vektor s številkami kanalov A/D pretvornika, na katere imamo priključene signale, ki jih želimo meriti. Številke kanalov so lahko med 1 in 8 in so enake številkam priključnih sponk na vmesniškem modulu.
- **D/A channel numbers** - vektor s številkami kanalov D/A pretvornika, na katerih želimo generirati signal. Številke kanalov so lahko med 1 in 2 in so enake številkam priključnih sponk na vmesniškem modulu.
- **D/A end values** - vrednosti, ki jih zavzamejo definirani D/A kanali po končanem eksperimentu.
- **Device number** - številka priključene kartice, s katere zajemamo signale. Nastavljena vrednost je 1 in je običajno ni potrebno spreminjati.
- **Sample time** - čas vzorčenja oz. čas med dvema zaporednima pretvorbama. Najmanjši možni čas vzorčenja je odvisen od hitrosti računalnika in od kompleksnosti simulacijske sheme. Če izberemo prekratek čas vzorčenja, pride do izpuščanja vzorcev, to pomeni, da program ne uspe dovolj hitro izvajati A/D in D/A pretvorbe. Ob vsakem izpuščenem vzorcu se v ukaznem oknu Matlaba izpiše opozorilo Missing samples. Če se opozorilo ponavlja, je potrebno povečati čas vzorčenja! Do izpuščanja vzorcev pride tudi v primeru, če med simulacijskim tekom premikamo okna, odpiramo pogovorna okna in podobno, saj v teh primerih okolje Windows blokira izvajanje vseh programov, torej tudi program za zajem podatkov.

11. Dodatek D - Primer določitve PI regulatorja s pomočjo računalniške optimizacije

Uvod

V nadaljevanju je podan primer programa za določitev PI regulatorja s pomočjo računalniške optimizacije. Primer sestoji iz glavne datoteke *SkriptOptim.m*, funkcije za izračun kriterijske funkcije *kriterij.m* in simulacijske sheme *Proces.mdl*. Datoteke so dosegljive na:

http://msc.fe.uni-lj.si/Download/Klancar/TR/TR_Lab_Vaja3.zip.

Izpis *SkriptOptim.m* datoteke

```
% program za izvedbo optimizacije PI regulatorja
global Kp Ki
```

```
Kp=0; Ki=0; % začetne vrednosti parametrov PI
par0=[Kp Ki];
```

```
OPTIONS=optimset('MaxIter',200,'Display','iter','TolFun',1e-3,'TolX',1e-3);
par = fminsearch('Kriterij',par0,OPTIONS );
```

```
Kp=par(1) Ki=par(2)
```

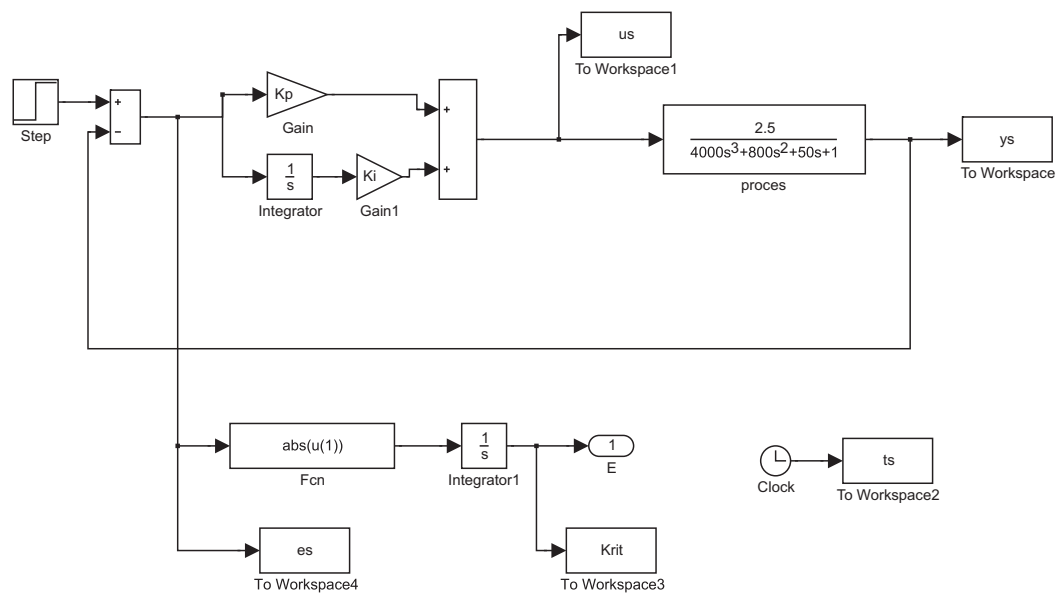
```
sim('Proces')
Krit(end)
```

```
figure subplot(3,1,1),plot(ts,es), ylabel('e')
subplot(3,1,2),plot(ts,us), ylabel('u')
subplot(3,1,3),plot(ts,ys), ylabel('y')
```

Izpis *kriterij.m* datoteke

```
function Jfin=Kriterij(par)
global Kp Ki
Kp=par(1); Ki=par(2);
[T,X,J]=sim('Proces');
Jfin=J(end);
```

Izglede *Proces.mdl* simulacijske sheme



Literatura

- [1] Zupančič, B.: Vodenje Sistemov, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2013. (<http://msc.fe.uni-lj.si/Download/Zupancic/vs/VS.pdf>)
- [2] Zupančič, B.: Zvezni regulacijski sistemi - I. del, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2010. (<http://msc.fe.uni-lj.si/Download/Zupancic/zrs1.pdf>)
- [3] Zupančič, B.: Simulacija dinamičnih sistemov, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2010. (<http://msc.fe.uni-lj.si/Download/Zupancic/sim.pdf>)
- [4] Matko, D., Karba, R., Zupančič, B.: Simulation and Modelling of Continuous Systems, A Case Study Approach, Prentice Hall International Series in Systems and Control Engineering, Series Editor M. J. Grimble, 1992.
- [5] Karba, R.: Modeliranje procesov, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 1999.
- [6] Priročnik modelne naprave treh tankov AMIRA DTS200. (http://msc.fe.uni-lj.si/Download/DTS200_gb.pdf)
- [7] Priročnik modelne naprave AMIRA DR300. (http://msc.fe.uni-lj.si/Download/DR300_gb.pdf)