Laboratorijske vaje
Industrijski krmilni in regulacijski sistemi
2012/13

4. laboratorijska vaja

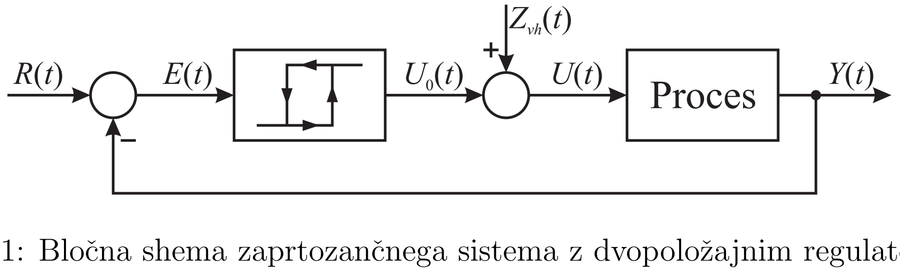
Praktična implementacija vodenja na realni napravi

Namen te laboratorijske vaje je spoznati nekaj izvedbenih vidikov pri realizaciji vodenja na realnem sistemu. Preizkusili boste najbolj enostaven regulator med vsemi – dvopoložajni regulator. Cilj vaje je tudi spoznavanje vpliva parametrov dvopoložajnega regulatorja na odzivanje zaprtozančnega sistema. Nadalje boste uporabili najbolj enostaven linearni regulator – P-regulator, pri katerem pa je ključna kompenzacija pogreška v delovni točki.

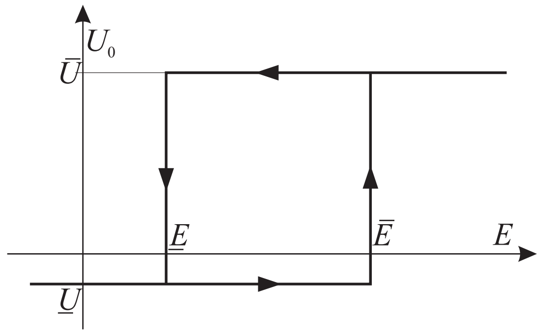
Dvopoložajni regulator

Dvopoložajni regulator je nelinearni sistem s histerezo, ki ima na izhodu lahko le dve vrednosti. Ti dve vrednosti predstavljata signal za vklop oz. izklop aktuatorja, ki neposredno vpliva na proces. Zelo široka uporaba pri vodenju (predvsem temperature, pa tudi ostalih veličin) je posledica enostavnosti in dejstva, da lahko uporabimo aktuatorje, ki jih je moč le vklopiti in izklopiti. Običajno gre za zelo enostavne regulatorje (npr. bimetal v likalniku), ki ne vsebujejo mikroprocesorjev in so zato preprosti, intuitivni in, kar je za praktično uporabo zelo pomembno, poceni.

Predmet obravnave pri tej laboratorijski vaji bo regulacijska shema na sliki 1. Regulacijski algoritem želimo načrtati tako, da bo izhodni signal iz procesa $Y(t)$ čimbolj verno sledil referenčnemu signalu $R(t)$, s katerim definiramo želeno obnašanje sistema. Seveda se ne moremo izogniti motnjam. V našem primeru imamo motnjo na vhodu v proces $Z_{vh}(t)$, ki izhod iz regulatorja $U_0(t)$ pokvari, tako da je dejanski vhod v proces $U(t)$ drugačen od tistega, ki ga je izračunal regulator.



Slika 1: Bločna shema zaprtozančnega sistema z dvopoložajnim regulatorjem



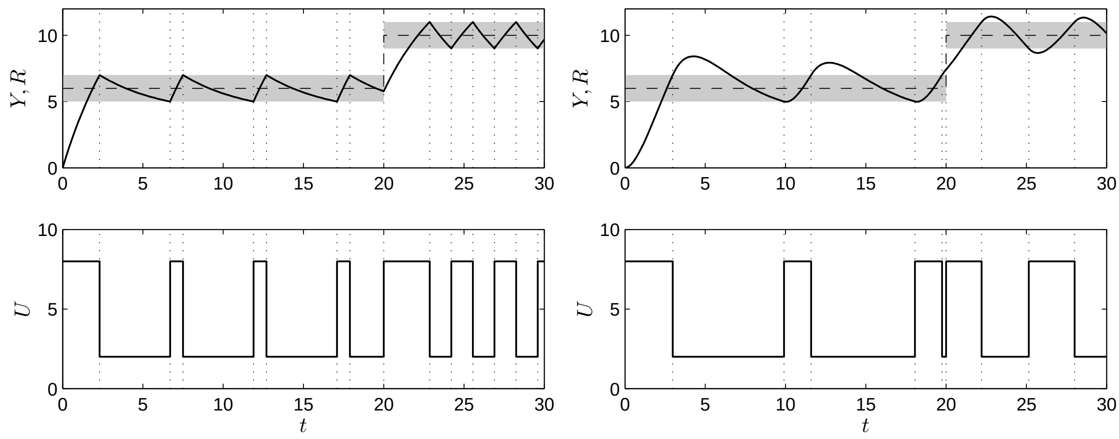
Slika 2: Karakteristika dvopoložajnega regulatorja

Karakteristika regulatorja je prikazana na sliki 2. Na abscisni osi je regulacijski pogrešek $E(t)$, ki predstavlja vhod v regulator, na ordinatni pa regulirna veličina $U_0(t)$, ki se pojavi na izhodu regulatorja. Vidimo, da gre za nelinearni sistem s histerezo. Če si zamislimo proces ogrevanja, kjer začnemo v točki, ko je dejanska temperatura precej nižja od želene, je regulacijski pogrešek velik in pozitiven, tako da se nahajamo na skrajnem desnem zgornjem koncu karakteristike dvopoložajnega regulatorja. Takrat je na izhodu stanje vklopa $\overline{U}$. Vklop grela povzroči dviganje regulirane temperature in padanje regulacijskega pogreška. Iz karakteristike na sliki 2 vidimo, da ostane grelo vklopljeno, dokler regulacijski pogrešek ne pade na $\underline{\mathrm{E}}$. Zato imenujemo $\underline{\mathrm{E}}$ točka izklopa. Takrat se na izhodu regulatorja pojavi signal $\underline{\mathrm{U}}$, ki ga imenujemo stanje izklopa, ki povzroči padanje temperature in naraščanje regulacijskega pogreška. Ko le-ta doseže točko vklopa $\overline{E}$, preide regulirni signal spet v stanje vklopa $\overline{U}$ in postopek se nadaljuje. Ker se regulacijski pogrešek, ko dosežemo okolico želene vrednosti, spreminja med $\underline{\mathrm{E}}$ in $\overline{E}$ ter želimo, da je regulacijski pogrešek čim bližje 0, običajno postavimo točko izklopa in točko vklopa tako, kot opisujeta naslednji enačbi:

$$\begin{aligned} \underline{\mathrm{E}} &= -\tfrac{\varepsilon}{2} \\ \overline{E} &= \tfrac{\varepsilon}{2} \end{aligned} \tag{1}$$

kjer je ε širina histereze.

Zgornjo miselno analizo lahko podkrepimo tudi z rezultati simulacijskega preizkusa na namišljenem procesu. Z dvopoložajnim regulatorjem smo najprej vodili sistem prvega reda. Rezultate tega eksperimenta si lahko ogledamo na sliki 3 (levo). V zgornjem delu slike je z izvlečeno črto prikazan izhod procesa oz. regulirana veličina $Y(t)$, s črtkano črto pa je narisan referenčni signal $R(t)$. Spodnji del slike prikazuje regulirno akcijo $U(t)$. Pikčasto so prikazane točke vklopa in izklopa, s sivo barvo pa je označeno področje okoli referenčnega signala, ki obsega interval $[R(t) - \frac{\varepsilon}{2}, R(t) + \frac{\varepsilon}{2}]$. Proces prvega reda je zmožen zelo hitro reagirati na spremembo regulirne veličine, tako da regulirana veličina nikoli ne zapusti sivega področja. Nekoliko drugačne rezultate dobimo pri vodenju sistema drugega reda, ki so prikazani na sliki 3 (desno). Regulirana veličina v točki preklopa nima koničaste oblike, pač



Slika 3: Odziv regulirane in regulirne veličine pri vodenju sistema prvega reda (levo) in drugega reda (desno)

pa zaobljeno. To je posledica dejstva, da regulirna veličina počasneje vpliva na izhod procesa kot pri procesu prvega reda. Ravno zaradi tega razloga regulirana veličina ne more v hipu obrniti trenda in po preklopu za kratek čas zapusti sivo področje. Opazimo lahko tudi, da so izhodi iz sivega področja nesimetrični in odvisni od vrednosti referenčnega signala.

Sledilno delovanje regulacijskega sistema

O sledilnem delovanju regulacijskega sistema govorimo takrat, ko je regulacijski sistem namenjen sledenju reguliranega signala referenčnemu, v manjši meri pa je izražena potreba po odpravljanju posledic motenj.

Zgradite simulacijsko shemo v Simulink-u po vzoru slike 1, pri čemer postavite zunanjo motnjo na 0, referenco pa nastavite tako, da bo sistem najprej prišel v delovno točko (takrat je želena vrednost izhoda oz. referenčni signal enak Y_{DT}), nato pa izvedite stopničasto spremembo reference (podoben referenčni signal je prikazan na sliki 3) primerne amplitude (amplituda mora biti dovolj velika, da bo manj viden vpliv motenj, ne pa prevelika, da ne bi zapustili linearnega področja). Ker je referenčni signal neposredno povezan z izhodom procesa, je potrebno amplitudo stopnice določiti iz ordinatne osi statične karakteristike. Dvopoložajni regulator izvedite z blokom *relay*, ki ima štiri parametre – točko vklopa in izklopa ter stanje izhoda pri vklopu in izklopu.

Na prvem grafu prikažite odziv regulirane veličine in potek referenčnega signala, na drugem pa odziv regulirne veličine. Izmerite maksimalno in minimalno vrednost reguliranega signala $Y(t)$ v ustaljenem stanju in določite območje spreminjanja reguliranega signala Y_{pp}. Določite tudi periodo nihanja reguliranega signala v ustaljenem stanju τ:

$Y_{pp} =$ ______________

$\tau =$ ______________

Regulacijsko delovanje regulacijskega sistema

Regulacijski sistem deluje v regulacijskem načinu, kadar je referenčni signal konstanten, glavni namen regulacije pa je odpravljanje posledic motenj.

Zgradite simulacijsko shemo v Simulink-u po vzoru slike 1, pri čemer postavite referenčni signal tako, da bo sistem prišel v delovno točko ($R(t) = U_{DT}$ ali Y_{DT}?). Motnja naj bo v začetku enaka 0. Ko bo sistem prišel v nihanje okoli delovne točke, vključite stopničasto motnjo primerne amplitude. Amplitudo motnje določite upoštevajoč statično karakteristiko procesa. Ker se motnja prišteva k regulirni veličini, je potrebno primerno amplitudo odčitati iz abscisne osi statične karakteristike.

Na prvem grafu prikažite odziv regulirane veličine in potek referenčnega signala, na drugem pa odziv regulirne veličine.

Vpliv širine histereze na obnašanje sistema

Raziščite vpliv histereze regulatorja na območje reguliranega signala in na njegovo frekvenco. Izvedli boste še dva eksperimenta, ki se bosta razlikovali le v nastavitvi širine histereze. Pri prejšnjih poizkusih ste imeli širino histereze nastavljeno na ε, sedaj pa boste preizkusili, kaj se zgodi z regulirano veličino, če širino histereze nastavimo na $\frac{\varepsilon}{2}$ in $\frac{\varepsilon}{4}$. Seveda boste ohranili točki vklopa in izklopa simetrični glede na 0. Ohranili boste tudi stanje regulirne veličine pri vklopu in izklopu.

Vrednost motnje boste nastavili na 0, referenčni signal pa bo ves čas konstanten, postaviti pa ga morate tako, da bo sistem nihal okoli delovne točke. Pri vsakem od obeh eksperimentov morate posneti odziv regulirane veličine ter obseg nihanja Y_{pp} in njegovo periodo τ (podobno, kot ste to počeli pri sledilnem delovanju regulatorja).

Regulirana veličina in referenčni signal pri širini histereze $\frac{\varepsilon}{2}$:

$Y_{pp} =$ ______________

$\tau =$ ______________

Regulirana veličina in referenčni signal pri širini histereze $\frac{\varepsilon}{4}$:

$Y_{pp} =$ ______________

$\tau =$ ______________

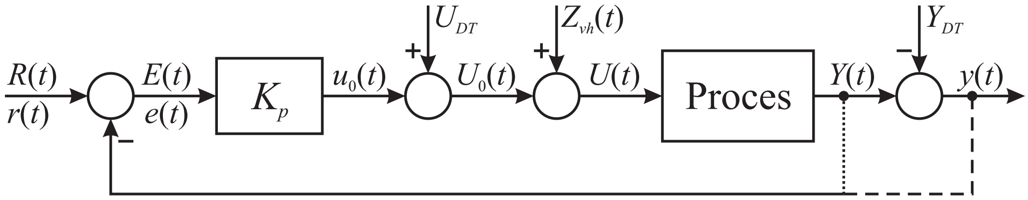
Opišite, kako vpliva spreminjanje širine histereze na zaprtozančni odziv. Kako se spremeni amplituda in frekvenca nihanja regulirane veličine?

Uporaba P-regulatorja

P-regulator je najbolj enostaven linearni regulator, saj regulirno veličino dobimo tako, da regulacijski pogrešek množimo s konstanto – ojačenjem regulatorja K_P (pri praktičnih izvedbah je izhod še dodatno omejen, saj zelo velikega regulirnega signala ni mogoče realizirati). Kljub svoji enostavnosti P-regulator omogoča dokaj kakovostno vodenje nekaterih procesov in celo stabilizacijo nekaterih nestabilnih sistemov. Njegova glavna pomanjkljivost je, da v splošnem ne odpravlja pogreška v ustaljenem stanju pri stopničasti spremembi referenčnega signala ali motnje. To je mogoče do neke mere odpraviti, če uporabimo P-regulator s kompenzacijo delovne točke.

Kompenzacija delovne točke sistema

Obravnavali bomo regulacijski sistem na sliki 4. Shema je na prvi pogled precej kompleksna, vendar vsebuje le dva zunanja vhoda (referenčni signal R oz. r in motnjo na vhodu v proces Z_{vh}) ter dve konstanti, s katerima kompenziramo delovno točko (U_{DT} in Y_{DT}).



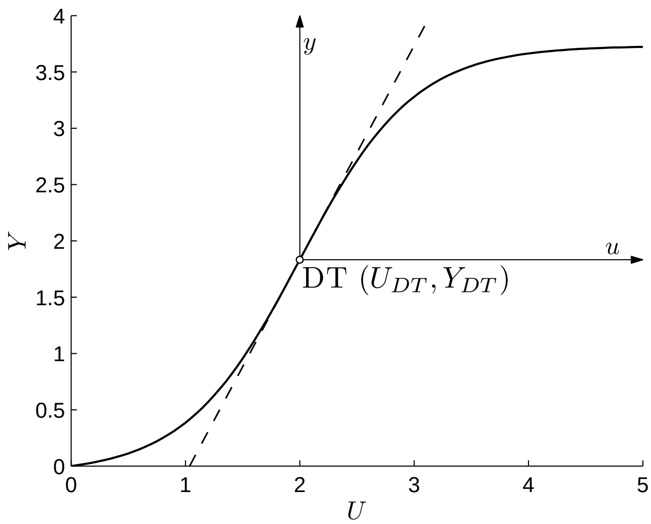
Slika 4: Regulacijska shema s P-regulatorjem in kompenzacijo delovne točke

V shemi so veličine označene z velikimi in malimi črkami. Prve so povezane s spremenljivkami procesa, druge pa z veličinami lineariziranega modela oz. deviacijskega modela. Slednje predstavljajo odstopanje dejanskih veličin od veličin v delovni točki. Če je delovna točka sistema določena s parom (U_{DT}, Y_{DT}), velja naslednja zveza:

$$\begin{aligned} U(t) &= U_{DT} + u(t) \\ Y(t) &= Y_{DT} + y(t) \end{aligned} \tag{2}$$

Enačbo (2) lahko osvetlimo še z enega zornega kota. Če v koordinatni sistem (U, Y) vrišemo statično karakteristiko procesa z izbrano delovno točko, dobimo koordinatni sistem deviacijskih veličin (u, y) tako, da narišemo premaknjeni koordinatni sistem z izhodiščem v DT (U_{DT}, Y_{DT}). Oba koordinatna sistema sta predstavljena na sliki 5, kjer je s črtkano črto prikazana tudi statična karakteristika lineariziranega sistema, ki je dobljena kot tangenta na dejansko statično karakteristiko. Prava in linearizirana statična karakteristika sovpadata v delovni točki, v neposredni bližini pa sta si zelo blizu.

Statična karakteristika linearnega sistema gre vedno skozi koordinatno izhodišče (Zakaj?). Linearizirana statična karakteristika gre skozi izhodišče koordinatnega sistema (u, y), ker je le-ta tako definiran, ne gre pa skozi izhodišče koordinatnega sistema (U, Y), zaradi česar je potrebno pri uporabi lineariziranega modela v absolutnih koordinatah VEDNO upoštevati še razliko med izhodiščema obeh koordinatnih sistemov.



Slika 5: Absolutni koordinatni sistem (U, Y), koordinatni sistem lineariziranega procesa (u, y) in linearizirana statična karakteristika (črtkana premica)

Kakšne pa so vrednosti regulacijskega pogreška $E(t)$ in referenčnega signala $R(t)$ v delovni točki? Referenčni signal definira želeno vrednost izhoda sistema v delovni točki. Jasno je, da želimo imeti na izhodu sistema v delovni točki $Y(t) = Y_{DT}$, zaradi česar velja tudi $R_{DT} = Y_{DT}$ in

$$R(t) = Y_{DT} + r(t) \tag{3}$$

Regulacijski pogrešek lahko računamo iz absolutnih ali deviacijskih veličin, pomembno pa je, da obeh vrst ne mešamo:

$$\begin{aligned} E(t) &= R(t) - Y(t) \\ e(t) &= r(t) - y(t) \end{aligned} \tag{4}$$

Z upoštevanjem enačb (4), (2) in (3) dobimo

$$E(t) = R(t) - Y(t) = (Y_{DT} + r(t)) - (Y_{DT} + y(t)) = r(t) - y(t) = e(t) \tag{5}$$

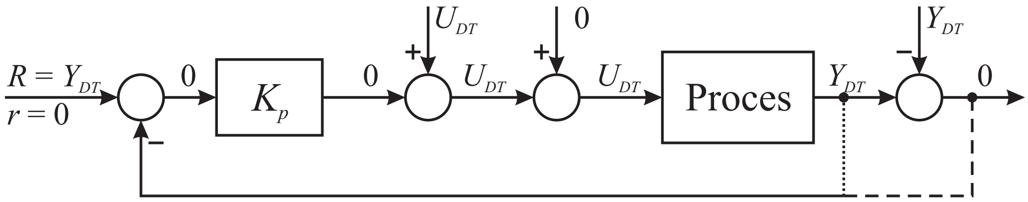
iz česar vidimo, da je vrednost regulacijskega pogreška v delovni točki enaka 0, kar je razumljivo, saj ne želimo pogreška v delovni točki oz. normalnih obratovalnih pogojih.

Da bi bolje razumeli regulacijsko shemo na sliki 4, si pobliže oglejmo osrednja bloka v tej shemi – proces in regulator. Jasno je, da proces ne »more vedeti«, kaj je delovna točka, zato je na njegovem vhodu vedno $U(t)$ in na njegovem izhodu vedno $Y(t)$. Po drugi strani pa je P-regulator (kar velja tudi za PID-regulator) linearen in operira z veličinami deviacijskega modela. Regulacijska shema na sliki 4 upošteva obe omenjeni dejstvi in pretvarja eno vrsto veličin v drugo upoštevajoč enačbe (2), (3) in (4). Na sliki 4 sta narisani dve različici povratne zanke. Ena je pikčasta, kjer v povratno zanko vodimo izmerjeni izhod procesa $Y(t)$. To različico uporabimo, če na referenčni vhod priključimo $R(t)$ – torej referenco podano v originalnih koordinatah, in ne kot odstopanje od delovne točke. Če pa v povratno zanko vodimo $y(t)$, kar je na sliki 4 prikazano s črtkano krivuljo, moramo na referenčni vhod priključiti $r(t)$.

Postavitev sistema v delovno točko

Ko se proces, katerega statična karakteristika je prikazana na sliki 5, nahaja v delovni točki, je na njegovem vhodu signal $U(t) = U_{DT}$, na izhodu pa $Y(t) = Y_{DT}$. Takšno stanje lahko dosežemo, če na referenčni vhod priključimo $R(t) = Y_{DT}$ oz. $r(t) = 0$ (referenčni signal je namreč potrebno postaviti na vrednost želenega izhoda procesa). Po preteku prehodnega pojava se vzpostavi ravnovesno stanje, ki je prikazano na sliki 6. Če je celotni sistem stabilen (to dosežemo s pravilno načrtanim regulatorjem), je stanje na sliki 6 stabilno, saj vidimo, da je regulacijski pogrešek enak 0, zaradi česar je tudi $u(t)$ enak 0, $U(t)$ pa enak U_{DT} (v tej analizi smo upoštevali, da je motnja enaka 0), kar pomeni, da bo tudi izhod procesa ostal nespremenjen, in sicer Y_{DT}.

Ob uporabi regulacijske sheme na sliki 4 zagotovimo, da vsaj v delovni točki sistem ne bo imel pogreška v ustaljenem stanju. Jasno pa je, da bo pogrešek rasel z oddaljenostjo od delovne točke.



Slika 6: Stanje signalov regulacijske sheme na sliki 4 v delovni točki

Sledilno delovanje regulacijskega sistema

Načrtajte P-regulator (izračunajte ojačenje regulatorja K_P) za zagotovitev **sledilnega delovanja**. Za izračun parametra regulatorja (K_P) uporabite nastavitvena pravila. Potrebno je izbrati primerno metodo načrtovanja (pravo tabelo v nastavitvenih pravilih) in upoštevati nastavitve za P-regulator. Ustrezne podatke dobimo iz odziva na stopnico v delovni točki sistema.

Izvedite eksperiment, pri katerem uporabite enak referenčni signal kot v primeru vodenja z dvopoložajnim regulatorjem (v prvi polovici eksperimenta postavite sistem v delovno točko, potem pa izvedite stopničasto spremembo referenčnega signala; motnja naj ne bo prisotna). Tudi pri tej vaji najprej izvedite simulacijski eksperiment, pri čemer proces simulirajte s podsistemom, ki vključuje tudi pravilno realizacijo delovne točke procesa.

Izračunano ojačenje regulatorja $K_P =$ ______________

Na prvem grafu prikažite odziv regulirane veličine in potek referenčnega signala, na drugem pa odziv regulirne veličine.

Regulacijsko delovanje regulacijskega sistem

Načrtajte P-regulator (izračunajte ojačenje regulatorja K_P) za zagotovitev **regulacijskega delovanja** (takrat je referenca konstantna, motnja pa naj bo stopničasta). Za izračun parametra regulatorja (K_P) uporabite nastavitvena pravila. Potrebno je izbrati primerno metodo načrtovanja in upoštevati nastavitve za P-regulator. Ustrezne podatke dobimo iz odziva na stopnico v delovni točki sistema.

Izračunano ojačenje regulatorja $K_P =$ ______________

Na prvem grafu prikažite odziv regulirane veličine in potek referenčnega signala, na drugem pa odziv regulirne veličine.