Regulacije

1. Regulacijska zanka

Pogosto želimo izbrano fizikalno veličino obdržati pri izbrani vrednosti navkljub vplivom okolice, ki želijo to fizikalno veličino prikrojiti po svoje. Za zgled naj služi temperatura, ki jo moramo med peko kruha v peči obdržati na 200°C. Najlažje gre tako, da temperaturo v peči merimo in po potrebi povečamo ali zmanjšamo moč gretja tako, da je temperature ravno prava.

Seveda želimo postopek avtomatizirati. Namesto osebe, ki opazuje termometer in vrti gumbe na peči, naj to delo opravi elektronsko vezje, imenujemo ga regulator. Regulator sprejema signal iz senzorja fizikalne veličine in ga primerja z željeno vrednostjo te veličine ter na podlagi razlike med njima krmili fizikalni sistem tako, da bo imela željena fizikalna veličina ravno pravo vrednost.

Tak regulacijski sistem ponazarja bločna shema na sliki 1. Na fizikalni sistem *F* vpliva več dejavnikov iz okolice, imenujmo jih A_1, A_2, A_3, poleg teh pa lahko na fizikalni sistem vplivamo še preko dejavnika *c*, ki ga neodvisno od vplivov okolice krmilimo sami. Izhodna veličina fizikalnega sistema je odvisna od vseh vhodnih dejavnikov in je označena z *Y*; to je hkrati tudi veličina, ki jo merimo s primernim senzorjem. V regulatorju izmerjeno vrednost odštejemo od željene vrednosti, ki je označena z Y_G, rezultat odštevanja pa je napaka regulacije *err*. Napako v regulatorju dodatno matematično obdelamo tako, da dobimo primeren signal za poseganje v sistem preko dejavnika *c*. Najenostavneje gre, če posegamo v sistem sorazmerno napaki *err*; za majhne razlike med željeno in dejansko vrednostjo regulirane fizikalne veličine posegamo v sistem le malo, za velike razlike pa močneje. Pravimo, da v fizikalni sistem posegamo proporcionalno. Regulator naj zato poleg vezja za računanje napake vsebuje še ojačevalnik, ki napako *err* poveča na primerno vrednost za poseganje v fizikalni sistem. Ojačevalniku pripišemo ojačenje A. Kako veliko pa naj bi to ojačenje bilo?

Zapišimo enačbo. Dejavnik *c* izračunamo kot:

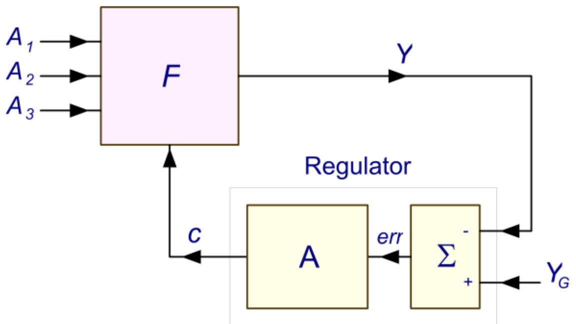
$$c = A(Y_G - Y)$$

Fizikalnemu sistemu pripišemo lastnost *F*, ki povezuje izhodno vrednost *Y* in vplivne veličine:

$$Y = F(A_1, A_2, A_3, c)$$

Z nekaj truda in matematične sreče lahko zgornjo formulo preuredimo v:

$$c = F^{-1}(A_1, A_2, A_3, Y)$$



Slika 1: Fizikalni sistem in regulator tvorita regulacijsko zanko

Ter tako zvemo kakšen dejavnik *c* je potreben, da fizikalni sistem da od sebe veličino z vrednostjo *Y* kljub vplivom ostalih dejavnikov A_1 do A_3. Ta dejavnik *c* dobimo iz regulatorja, zato:

$$A(Y_G - Y) = F^{-1}(A_1, A_2, A_3, Y)$$

Po preureditvi enačbe dobimo:

$$Y = Y_G - \frac{F^{-1}(A_1, A_2, A_3, Y)}{A}$$

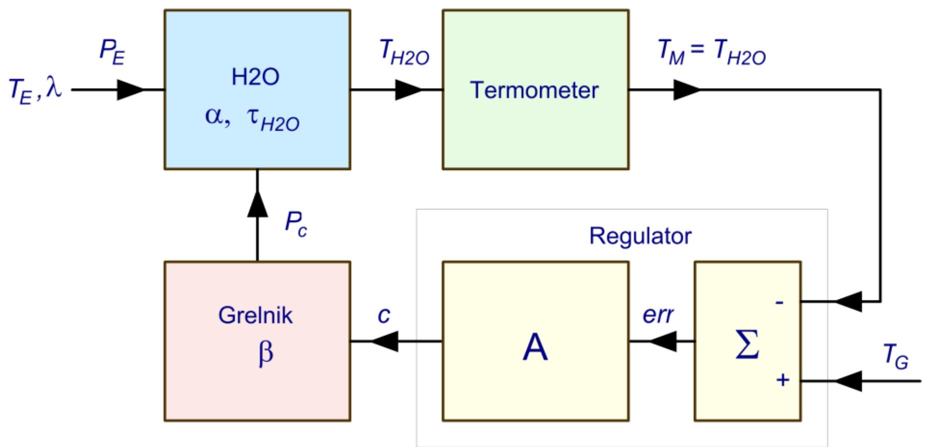
Če uporabimo ojačevalnik z neskončno velikim ojačenjem, je regulirana fizikalna veličina Y natanko enaka željeni vrednosti Y_G:

$$Y\ (za\ A \to \infty) = Y_G$$

To pa je natanko tisto, kar želimo doseči: izhodna veličina ima tako vrednost, kot si jo želimo in je neodvisna od vseh ostalih dejavnikov.

2. Reguliranje sistema prvega reda

Žal se zadeve komplicirajo v primeru, da se fizikalni sistem ne odzove v hipu. V nadaljevanju bomo raziskali obnašanje reguliranega sistema v primeru, ko mu lahko pripišemo še kasnitve. Za zgled naj služi ogrevanje izbranega predmeta, na primer bazena vode, slika 2. Privzemimo, da je voda H2O v bazenu zadostno mešana in ima zato v danem trenutku enako temperaturo T_{H2O} po vsem volumnu. Termometer, ki ga uporabljamo za merjenje temperature vode, naj bo idealen in naj pravilno in takoj izmeri temperaturo vode, zato je izmerjena temperatura T_M enaka temperaturi vode T_{H2O}. Željena temperatura vode je označena s T_G, regulator pa spet izračuna razliko med željeno in izmerjeno temperaturo ter razliko ojači za faktor A. Rezultat je krmilni signal (dejavnik) c. Ker regulator ne zmore ogrevanja vode, potrebujemo še močnostni del regulacijskega sistema, to je grelnik, ki šibek električni signal c pretvori v toplotno moč P_C, to dovajamo v bazen z vodo.



Slika 2: Regulacija temperature vode v bazenu H2O

Običajen grelnik lahko le dovaja toploto v bazen, kar morda za popolno regulacijo ne zadošča. Zato raje uporabimo poseben grelnik, ki zna bodisi dovajati (za pozitivne vrednosti signala c) ali pa jemati (za negativne vrednosti signala c) toploto v/iz bazena. Tak grelnik je na primer Peltier-ov element. Za v bazen dovajano toplotno moč zato lahko zapišemo:

$$P_c = \beta c = \beta A(T_G - T_{H2O})$$

V bazen vstopa še toplota iz okolice. Količina te toplote v časovni enoti oziroma toplotna moč P_E je odvisna od razlike med temperaturo okolice T_E in temperaturo vode T_{H2O} v bazenu ter od lastnosti stene bazena, ki jih zaznamuje lastnost λ:

$$P_E = \lambda(T_E - T_{H2O})$$

Temperaturo vode v bazenu dobimo z integriranjem dovedene toplotne moči po času. Pri tem moramo upoštevati še količino vode v bazenu in njene toplotne lastnosti, te označuje konstanta τ_{H2O}:

$$T_{H2O} = \frac{P_c + P_E}{\tau_{H2O}\, p}$$

Uporabili smo operatorski zapis za integriranje: operator p predstavlja odvajanje, recipročna vrednost p pa integriranje. Združitev zgornjih treh enačb da:

$$T_{H2O} = T_G \cdot \frac{1}{1+\dfrac{\lambda}{\beta A}} \cdot \frac{1}{1+\dfrac{\tau_{H2O}}{\beta A+\lambda}\,p} + T_E \cdot \frac{1}{1+\dfrac{\beta A}{\lambda}} \cdot \frac{1}{1+\dfrac{\tau_{H2O}}{\beta A+\lambda}\,p}$$

Preverimo skrajne rešitve te enačbe:

- Brez povratne regulacijske zanke ($A = 0$) je temperatura vode T_{H2O} odvisna le od temperature okolice T_E. Tej temperaturi se približuje eksponentno, kot smo že spoznali pri elektroniki ob analizi operatorskega zapisa prenosne funkcije oblike $1/(1+\tau\,p)$. Časovna konstanta približevanja τ je podana z lastnostmi vode τ_{H2O} in sten bazena λ.
- Za neskončno veliko ojačenje ($A \to \infty$) temperatura okolice T_E ne vpliva na temperaturo vode T_{H2O} v bazenu. Matematika kaže, da je takrat temperatura vode T_{H2O} natanko enaka željeni temperaturi T_G. To velja tudi v primeru, ko željeno temperaturo T_G hipoma spremenimo. Seveda bi bila za hipno spremembo temperature večje količine vode potrebna zelo velika moč P_C, delujoča kratek čas. Ker grelnik tolikšne moči ne obstaja lahko ugibamo, da pride do prehodnega pojava, med katerem se temperatura vode bolj ali manj hitro, pač glede na lastnosti vode in grelnika, približuje željeni temperaturi. Ko je približevanje končano, je temperatura vode enaka željeni temperaturi ($T_{H2O} = T_G$).

Za končno velika ojačenja A je približevanje temperature vode željeni temperaturi eksponentno (zaradi člena $\frac{1}{1+\frac{\tau_{H2O}}{\beta A+\lambda}p}$), časovno konstanto približevanja pa diktirajo lastnosti vode, grelnika in ojačenja. Večje, ko je ojačenje, hitrejše je približevanje. Seveda je za hitrejše približevanje potrebna večja moč grelnika P_C. če grelnik potrebne moči ne zmore, bo približevanje enakomerno do trenutka, ko grelnik zahtevano moč zmore, od takrat naprej pa eksponentno.

Zgornje enačbe napovedujejo še eno, ne tako lepo lastnost sistema. Običajno je temperatura okolice drugačna od željene temperature, zato iz bazena vez čas odteka toplota v okolico. Ker želimo temperaturo bazena obdržati na željeni vrednosti, mora grelnik ves čas enako količino toplote uvajati v bazen, torej P_C ni nič. Zato tudi signal c ni nič in dejanska temperatura vode T_{H2O}ne more biti enaka željeni temperaturi T_G. V realnem primeru, ko je ojačenje v povratni zanki končno, opisani regulacijski sistem ne more zagotavljati enakosti temperatur; enakosti se lahko le čim bolj približamo s povečevanjem ojačenja A. Enako velja za katerikoli regulirani sistem: ojačenje v povratni zanki želimo čim bolj povečati, saj bo po prehodnem pojavu regulirana veličina bolj podoba željeni, pa še hitreje bo dosežena, če le zmoremo močno poseganje v sistem.

3. Reguliranje sistema drugega reda

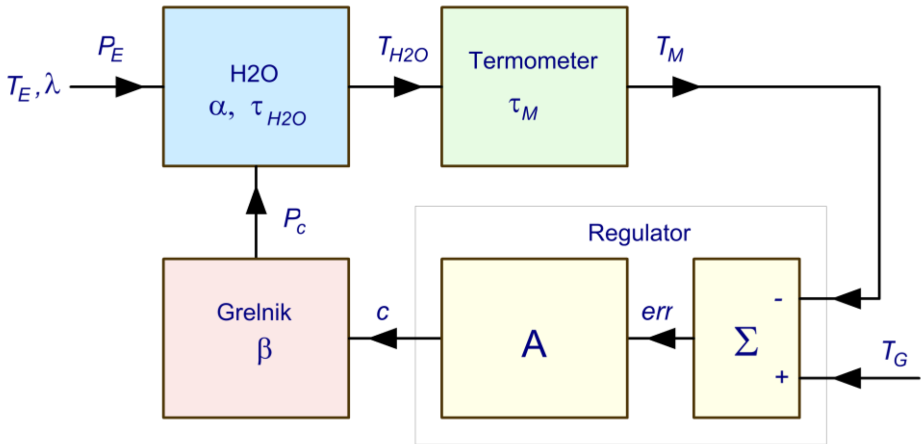
3.1. Proporcionalna regulacija

V pravkar analiziranem sistemu, ki je bil sicer precej idealiziran, smo upoštevali le časovno akumuliranje toplote v bazenu in prišli do operatorsko zapisane enačbe prvega reda za ta sistem. V njej je operator p nastopal v prvi potenci in ugotovitve se nanašajo na vse regulacijske sisteme, ki jih lahko popišemo z enačbo istega reda. Obstajajo pa tudi sistemi, v katerih več elementov vnaša kasnitve. Kako se obnašajo taki regulirani sistemi?

Za primer uporabimo isti bazen, a tokrat pripišimo kasnitev še termometru. Znano je, da termometer potrebuje nekaj časa preden sporoči pravo temperaturo. Ta čas je odvisen od toplotne kapacitete termometra, prevodnosti njegovega ohišja in podobno. Za pravilen odčitek medicinskega termometra pod pazduho je, na primer, treba počakati nekaj minut. Če predpostavimo, da se izmerjena temperatura T_M eksponentno približuje pravi vrednosti, časovna konstanta približevanja pa znaša τ_M, lahko za tak termometer, vtaknjen v vodo s temperaturo T_{H2O}, zapišemo:

$$T_M = T_{H2O} \cdot \frac{1}{1 + \tau_M\, p}$$

Tak termometer lahko uporabimo v prejšnjem regulacijskem sistemu, katerega bločna shema je narisana na sliki 3. Seveda se lahko pogovarjamo o argumentu, da je časovna konstanta termometra mnogo krajša od časovne konstante, ki smo jo pripisali bazenu in je zato morda zanemarljiva. A gre za analizo sistema, kjer upoštevano dve kasnitvi in posledicah regulacije takega sistema. Zato naj časovna konstanta τ_M, pripisana termometru, za zdaj ostane.



Slika 3: Regulacija temperature vode v bazenu H2O ob upoštevanju lastnosti termometra

Spet zapišimo toplotno moč P_C, ki jo regulacijska povratna zanka dovaja v bazen z vodo:

$$P_c = \beta c = \beta A(T_G - T_M) = \beta A\left(T_G - T_{H2O} \cdot \frac{1}{1 + \tau_M\, p}\right)$$

Iz tega ob upoštevanju prejšnjih formul izpišemo izraz za temperaturo vode T_{H2O}:

$$T_{H2O} = \frac{T_G \beta A(1 + \tau_M p) \;+\; T_E \lambda (1 + \tau_M p)}{\tau_{H2O}\, \tau_M\, p^2 + (\tau_{H2O} + \lambda \tau_M) p + \lambda + \beta A} = \frac{T_G \beta A(1 + \tau_M p) \;+\; T_E \lambda (1 + \tau_M p)}{a p^2 + b p + c}$$

V tej operatorsko zapisani diferencialni enačbi nastopajo odvodi, ki jih zaznamujejo operatorji *p*. Pričakujemo, da se v reguliranem sistemu prej ali slej vrednosti spremenljivk ustalijo, zato so takrat vsi odvodi enaki nič. Za to, stacionarno stanje, lahko zapišemo rešitev:

$$T_{H2Os} = \frac{T_G \beta A \;+\; T_E \lambda}{\lambda + \beta A} = \; T_G \cdot \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\beta A}} \;+\; T_E \cdot \frac{1}{1 + \frac{\beta A}{\lambda}}$$

Ta rešitev je enaka rešitvi, ki smo jo dobili za stacionarno stanje sistema, opisanega z operatorsko diferencialno enačbo prvega reda. Spet lahko za stacionarno stanje trdimo:

- Če je ojačenje v povratni regulacijski zanki enako nič, je temperatura vode enaka temperaturi okolice.
- Če je ojačenje v povratni regulacijski zanki neskončno veliko, je temperatura vode enaka željeni temperaturi in je neodvisna od temperature okolice.

- Če je ojačenje v povratni regulacijski zanki končno veliko, je temperatura vode nekje med temperaturo okolice in željeno temperaturo, odvisno od temperatur in lastnosti bazena ter povratne zanke.

Je pa to stacionarno stanje treba doseči. Po vsaki spremembi željene ali okoliške temperature je treba počakati čas prehodnega pojava, da sistem doseže stacionarno stanje. Raziščimo obnašanje tako reguliranega sistema, ki ga opisuje operatorsko zapisana enačba drugega reda, med prehodnim pojavom. Iz zgoraj zapisane operatorske formule je videti, da sta odziva na željeno in okoliško temperaturo po obliki sorodna, zato bomo tule obravnavali le obliko odziva na spremembo željene temperature; oblika odziva na spremembo druge temperature je po obliki enaka. Obravnavamo torej enačbo:

$$T_{H2O} = \frac{T_G \beta A(1 + \tau_M p)}{ap^2 + bp + c} \qquad \Leftrightarrow \qquad a \cdot \ddot{T}_{H2O} + b \cdot \dot{T}_{H2O} + c \cdot T_{H2O} = T_G \cdot \beta A + \dot{T}_G \cdot \beta A \tau_M$$

Pri tem: $a = \tau_{H2O}\, \tau_M$, $b = \tau_{H2O} + \lambda \tau_M$, $c = \lambda + \beta A$

Obnašanje te enačbe med približevanjem stacionarnemu stanju določajo rešitve homogene verzije iste enačbe, torej :

$$a \cdot \ddot{T}_{H2O} + b \cdot \dot{T}_{H2O} + c \cdot T_{H2O} = 0$$

Rešitve te enačbe iščemo v obliki:

$$T_{H2O} = T_{H2Os}(1 - e^{\gamma_{1,2} t}) \qquad \text{kjer:} \quad \gamma_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Za majhno razliko med dejansko in željeno temperaturo vode v stacionarnem stanju potrebujemo veliko ojačenje *A*; žal je ojačenje skrito v parametru *c*. Če ojačenje preveč povečamo, postane parameter *c* dovolj velik, da je vrednost pod korenom negativna. Koreni karakteristične enačbe so zaradi tega kompleksni, kar implicira rešitve v obliki:

$$T_{H2O} = T_{H2Os}\left(1 - e^{RE(\gamma_{1,2})t} * e^{IM(\gamma_{1,2})t}\right) = T_{H2Os}\left(1 - e^{-\frac{b}{2a}t} * \cos\left(\frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\, t\right)\right)$$

Taka oblika rešitve pa pomeni nihanje okoli stacionarne vrednosti T_{H2Os}; nihanja si ne želimo. Nihanje bo po zgornji enačbi počasi izzvenevalo; časovna konstanta izzvenevanja je podana z $2a/b$. Ker nihanja ne želimo, je največje možno ojačenje (optimalno ojačenje A_{opt}) v povratni zanki omejeno z:

$$b^2 - 4ac = 0 \qquad \rightarrow \qquad A_{opt} = \frac{(\tau_{H2O} + \lambda \tau_M)^2}{4\, \beta\, \tau_{H2O}\, \tau_M} - \frac{\lambda}{\beta}$$

Če izberemo ojačenje manjše od A_{opt}, je približevanje željeni vrednosti počasnejše. Taka izbira namreč povzroči dva realna korena karakteristične enačbe, od katerih je en manjši od optimalnega in torej povzroči še daljšo časovno konstanto.

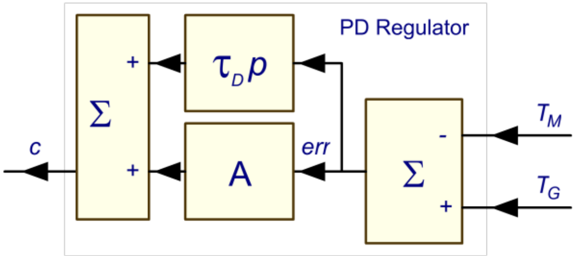
Temperatura vode v stacionarnem stanju ne more biti enaka željeni, ker ne želimo dušenega nihanja okoli željene temperature in torej ne smemo izbrati neskončno velikega ojačenja *A*. Proporcionalna regulacija takrat, ko imamo opravka z reguliranim sistemom drugega reda, ne daje dovolj dobrih rezultatov.

3.2. Proporcionalno diferencialna regulacija

Ker so fizikalne lastnosti reguliranega sistema marsikdaj nespremenljive, se v tem zapisu osredotočamo na regulator, ki je v domeni elektronike. Namesto ojačevalnika v povratni regulacijski zanki ali vzporedno ojačevalniku lahko vežemo dodatne elektronske module in se nadejamo izboljšav regulacije. Prvi pomislek bi morda bil sledeč: če se temperatura vode hitro približuje željeni vrednosti in je hkrati razlika temperatur majhna, je smiselno upočasniti približevanje; če ga ne upočasnimo, bo temperatura vode verjetno presegla željeno temperaturo, kar vodi v dušeno nihanje. V povratno regulacijsko zanko bomo zato dodali diferenciator in njegov izhodni signal dodali izhodnemu signalu ojačevalnika. Blok *A* v tem primeru zamenja blok na sliki 4, pri tem se prenosna funkcija *G* tega bloka glasi:

$$G = A + \tau_D\, p$$

Parameter τ_D je časovna konstanta diferenciatorja in jo lahko izberemo po svoje, saj predstavlja le produkt kapacitivnosti in upornosti v diferenciatorju uporabljenih elementov. Toplotna moč P_C, ki jo povratna regulacijska zanka dovaja v bazen, je zato:



Slika 4: Proporcionalno diferencialni regulator

$$P_c = \beta c = \beta(A + \tau_D p)(T_G - T_M) = \beta(A + \tau_D p)\left(T_G - T_{H2O} \cdot \frac{1}{1 + \tau_M\, p}\right)$$

Spet lahko ob upoštevanju formul iz začetka tega zapisa izračunamo temperaturo vode T_{H2O}:

$$T_{H2O} = \frac{T_G \beta(A + \tau_D p)(1 + \tau_M p) \; + \; T_E \lambda(1 + \tau_M p)}{\tau_{H2O}\, \tau_M\, p^2 + (\tau_{H2O} + \lambda\tau_M + \beta\tau_D)p + \lambda + \beta A} = \frac{T_G \beta(A + \tau_D p)(1 + \tau_M p) + T_E \lambda(1 + \tau_M p)}{a p^2 + b p + c}$$

Ob primerjavi prejšnjega izraza za regulator brez diferenciatorja s tem izrazom, ugotovimo:

- Imenovalca se razlikujeta le v členu *b*, ta je sedaj večji za $\beta\tau_D$, ki pa ga lahko poljubno izberemo s časovno konstanto diferenciatorja.
- Števca se razlikujeta le za željeno temperaturo T_G v členu $A \rightarrow (A + \tau_D p)$, kar ne vpliva na približevanje temperature vode T_{H2O} željeni vrednosti T_G. Če bi nas ta dodani del le motil, ga lahko kompenziramo z integriranjem pred vezjem, ki računa napako *err*.

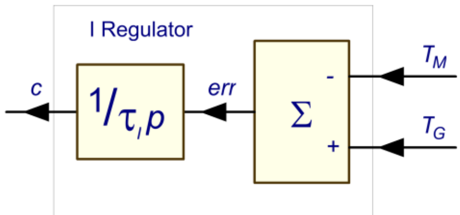
Dodani del v členu *b* pomeni, da zdaj lahko povečamo ojačenje *A* v povratni zanki. Zaradi večjega ojačenja postane izraz pod korenom negativen, a ga lahko popravimo z izbiro časovne konstante diferenciatorja, ki poveča vrednost pod korenom nazaj na nič.

Tako vrsto regulacije, kjer v povratni zanki izrabljamo ojačevalnik in diferenciator, imenujemo proporcionalno-diferencialna regulacija. Dušenemu nihanju okoli željene vrednosti se lahko ognemo s primerno izbrano časovno konstanto diferenciatorja, a regulirana vrednost v stacionarnem stanju kljub temu ne dosega točne željene vrednosti.

3.3. Integralna regulacija

Poskusimo blok *A* v povratni zanki regulatorja zamenjati še z integratorjem, slika 5, ki naj ga označuje prenosna funkcija *H*. Takrat zapišemo:

$$H = \frac{1}{\tau_I\, p}$$



Slika 5: Integralni regulator

Kasneje med matematično analizo se bo izkazalo, da je treba uporabiti integrator z zelo dolgo časovno konstanto τ_I. Zato lahko privzamemo, da je odziv termometra zelo hiter v primerjavi z odzivom integratorja in lahko počasnost odziva termometra zanemarimo. Odziv termometra je torej na videz hipen in zanj zapišemo $T_M = T_{H2O}$.

Spet zapišemo izraz za v sistem dovajano toplotno moč:

$$P_c = \beta c = \beta \frac{1}{\tau_I p}(T_G - T_M) = \beta \frac{1}{\tau_I p}(T_G - T_{H2O})$$

In ponovno lahko z uporabo na začetku podanih formul izpeljemo izraz za temperaturo vode T_{H2O}:

$$T_{H2O} = \frac{T_G \, \beta + T_E \, \lambda \, \tau_I \, p}{\tau_{H2O} \tau_I p^2 + \lambda \, \tau_I \, p + \beta} = \frac{T_G \, \beta + T_E \, \lambda \, \tau_I \, p}{a p^2 + b p + c}$$

Pri tem so: $a = \tau_{H2O} \tau_I$, $b = \lambda \, \tau_I$, $c = \beta$

Tokrat v povratni vezavi nismo uporabili ojačevalnika, zato je vredno posebej preveriti temperaturo vode v stacionarnem stanju, ko so vsi odvodi enaki nič. Če iz zgornjega izraza odstranimo vse člene z operatorjem p, dobimo:

$$T_{H2Os} = T_G$$

Torej je v stacionarnem stanju temperatura vode enaka željeni temperaturi tudi v primeru, ko v povratni zanki ni ojačevalnika. Poglejmo še obnašanje reguliranega sistema med prehodnim obdobjem. Ob enakem razmišljanju tudi tokrat iščemo korene karakteristične enačbe ustrezne homogene diferencialne enačbe za imenovalec:

$$\gamma_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-\lambda \, \tau_I \pm \sqrt{\lambda^2 \tau_I^2 - 4 \, \tau_{H2O} \, \beta}}{2 \, \tau_{H2O} \, \tau_I}$$

V optimalnem primeru mora biti izraz pod korenom enak nič, takrat bo približevanje temperatur najhitrejše. Kaže, da mora imeti uporabljeni integrator dolgo časovno konstanto (zelo približno rečeno: primerljivo s časovno konstanto bazena vode popravljeno za nekaj parametrov). Če bo izraz pod korenom negativen, bo temperature vode dušeno nihala okoli željene vrednosti. Če bo časovna konstanta uporabljenega integratorja predolga, bo izraz pod korenom pozitiven in bo zaradi tega približevanje temperature vode željeni vrednosti eksponentno in počasnejše.

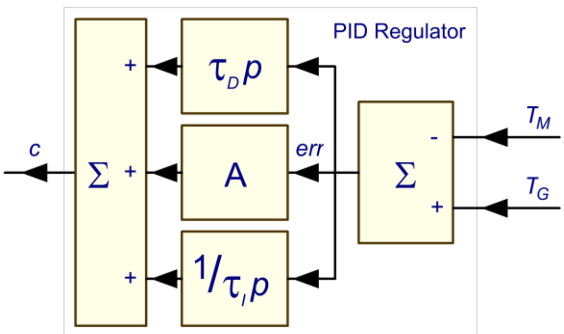
Z integralno regulacijo torej dosežemo, da je regulirana vrednost enaka željeni, a moramo zaradi dolgih časovnih konstant na to čakati dolgo časa. Poleg tega sprememba vpliva okolice, v našem primeru je to temperatura okolice T_E, močno vpliva na regulirano veličino, saj najdemo v formuli odvod okoliške temperature. Tudi integralna regulacija ima torej slabe lastnosti. Izboljšanje lahko pričakujemo s kombinacijo vseh treh načinov regulacije.

3.4. Proporcionalno integralna diferencialna regulacija – PID

Tokrat v regulatorju uporabimo vse tri do sedaj obravnavane module: ojačevalnik, diferenciator in integrator. Njihove izhodne signale seštejemo v skupni izhodni signal c, slika 6.

Izhodni signal c takega regulatorja v našem primeru gretja vode je:

$$c = \left(A + \tau_D p + \frac{1}{\tau_I p}\right)(T_G - T_M)$$



Slika 6: Proporcionalno integralno diferencialni (PID) regulator

Zdaj imamo na razpolago tri parametre, s katerimi lahko optimiramo kakovost regulacije. Z velikim ojačenjem A dosežemo hiter odziv sistema na spremembe referenčne vrednosti ali vplivov okolja, z časovno konstanto diferenciatorja τ_D preprečimo nihanje okoli stacionarne vrednosti regulirane veličine. S časovno konstanto integratorja τ_I poskrbimo za popolno izničenje počasnih vplivov okolice in tako zagotovimo, da je regulirana veličina popolnoma enaka željeni v stacionarnem stanju.

Polna analiza reguliranega sistema za ogrevanje vode da diferencialno enačbo četrtega reda. En red prispeva bazen z vodo, en red termometer, regulator pa preostala dva. Ker je sistem linearen, bi se analize lotili na enak način, le red karakteristične enačbe je tokrat štiri. Poiskati bi morali korene te enačbe in s primerno izbiro časovnih konstant in ojačenja poskrbeti, da so vsi koreni realni (ni nihanja okoli stacionarne vrednosti) ter čimbolj enaki (čim hitrejše približevanje regulirane vrednosti željeni). Reševanje takega sistema presega ta kratek zapis, zato bomo med predavanji obnašanje reguliranega sistema raje simulirali na računalniku.