

Cuprins

1. Descrierea standului de laborator Festo	3
2. Modelarea standului de laborator Festo	7
2.1 Amplificatorul.....	7
2.2 Motorul	10
2.3 Pompa	11
2.4 Randamentul pompei	15
2.5 Curentul rotoric	19
2.6 Rezervorul.....	21
2.7 Senzorul de nivel.....	24
2.8 Blocul filtru	25
3. Structură clasică de reglare cu reacție negativă	27
3.1 Frequency Response Tool - introducere	38
3.2 Frequency Response Tool – tutorial	41
4. Structuri avansate de control automat	49
4.1 Structura de control cu reacție negativă și feedforward.....	49
4.2 Structura de reglare în cascadă.....	52
4.3 Structură de reglare combinată: cascadă și feedforward....	59
Bibliografie	61

Scopul proiectului: Reglarea automată a nivelului

Etapele proiectului:

1. Dezvoltarea unui model neliniar pentru process
2. Implementarea modelului în Simulink
3. Identificarea funcției de transfer a procesului
4. Calcularea și implementarea unui regulator PI
5. Introducerea perturbațiilor pe debitul de intrare și de ieșire
6. Implementare structură de control de tip feed-forward
7. Implementare structură de control de tip cascadă
8. Implementare structură combinată de control (cascadă și feed-forward)

Date inițiale:

Semnificație	Notăție	Valoare	Unitate de măsură
Suprafața bazinului	A	332,5	cm ²
Coeficienți model pompa	k	0,035	-
	k1	0,654	
	k2	-0,015	
	k3	-0,0006	
Coeficient de curgere	C	9	-

1. Descrierea standului de laborator Festo

Standul didactic Festo (Figura 1.1) este o instalație compactă și este proiectat pentru a satisface diferite necesități de instruire orientată pe aplicații industriale și o bună cunoaștere a componentelor hardware utilizate în sistemele de control industriale. Standul este conceput pentru realizarea a patru sisteme de control automat, fiecare cu senzorii și elementele de execuție aferente: controlul nivelului, controlul debitului, controlul temperaturii, și controlul presiunii.



Figura 1.1 Standul experimental Festo

Schema pentru standul de control al nivelului este prezentată în Figura 1.2, și o schemă funcțională simplificată a sistemului de control în Figura 1.3.

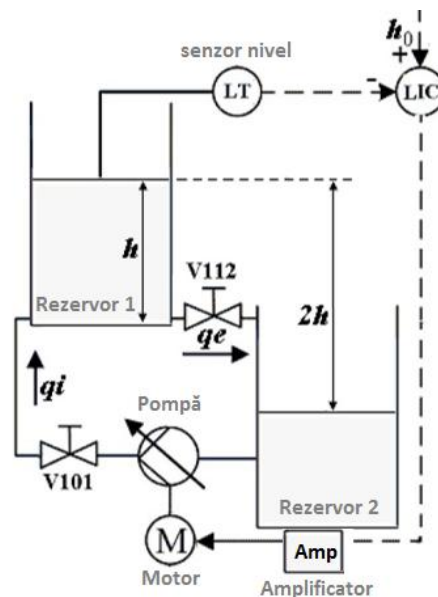


Figura 1.2 Schema procesului

Sistemul conține două rezervoare de apă, cu aceeași secțiune transversală, situate unul deasupra celuilalt (Figura 1.2) astfel încât minimul în rezervorul de sus este la același nivel cu maximum din rezervorul de jos. Nivelul este reglat în Rezervorul 1, iar Rezervorul 2 are rolul de rezervor tampon. Rezervorul în care se reglează nivelul este poziționat deasupra rezervorului tampon. Prin alegerea acestei soluții constructive sarcina pompei este reprezentată de distanța pe verticală dintre suprafața apei în rezervorul de sus și suprafața apei în cel de jos, adică de două ori înălțimea coloanei de apă din rezervorul principal. Pentru nivelul minim în rezervorul principal, rezervorul tampon este plin, suprafața apei în acest caz în cele două rezervoare fiind aproximativ pe același nivel.

Alte componente ale stației Festo utilizate pentru controlul nivelului sunt: senzor ultrasonic analogic, senzori de debit, amplificatorul pentru comanda motorului pompei, convertoare de semnale: din curent în tensiune, din frecvență în tensiune, PLC, panou de control, sistem de conducte de legătură, robineți cu acționare manuală, electrovalve.

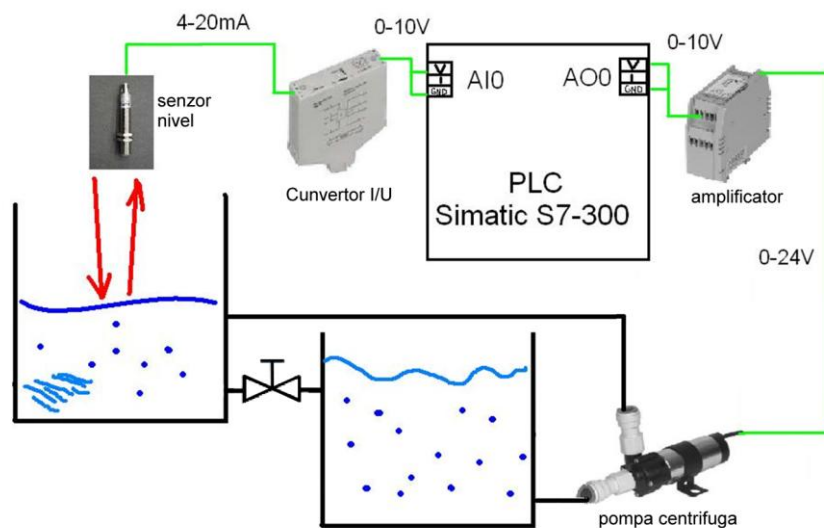


Figura 1.3 Schema simplificată a sistemului de reglare a nivelului

Regulatorul de nivel este implementat pe un PLC iar semnalul de comandă rezultat este aplicat la intrarea amplificatorului care va modifica corespunzător tensiunea de alimentare a motorului pompei, motor de curent continuu. Motorul antrenează pompa care introduce lichid în rezervorul principal. În rezervorul principal intră lichid cu debitul q_i și este evacuat cu debitul q_e . V101 și V112 sunt robineți cu acționare manuală de care depind cele două debite q_i (V101) și q_e (V112). Nivelul lichidului în rezervorul principal este monitorizat cu ajutorul unui senzor de nivel ultrasonic (LT- Level Transmitter). Valoarea dată de senzor este valoarea actuală a nivelului în rezervor.

Variabila de intrare în proces este tensiunea de comandă a amplificatorului, iar variabila de ieșire din proces este nivelul apei din rezervorul principal.

Scopul proiectului este modelarea și calibrarea modelului procesului, proiectarea și implementarea unor variante de sistem pentru reglarea automată a nivelului din rezervorul principal. Trebuie implementate strategii de control care au ca scop menținerea nivelului la valoarea prescrisă și rejectarea rapidă a perturbațiilor.

Când procesul ajunge în regim staționar, înălțimea coloanei de apă în rezervor este constantă (debitul de intrare q_i este egal cu debitul de ieșire q_e). În cazul unei reglări de stabilizare, această valoare

trebuie menținută la un nivel fix chiar dacă apar perturbații de debit pe conducta de evacuare sau intrare. Perturbațiile pot apărea prin modificarea poziției robinetului V101 (pentru perturbația pe debitul de intrare) sau modificarea robinetului V112 (pentru perturbația pe debitul de ieșire) care duc la modificarea debitelor.

Schema bloc simplificată a instalației este prezentată în Figura 1.4.

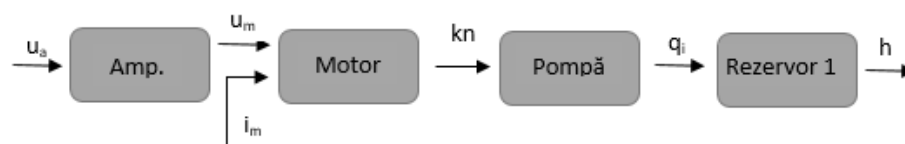


Figura 1.4 Schema bloc simplificată

Modelul final al procesului va fi compus din modelele individuale pentru fiecare bloc component.

2. Modelarea standului de laborator Festo

2.1 Amplificatorul

Variabilă de intrare în amplificator: tensiunea u_a (0-10V)

Variabilă de ieșire din amplificator: tensiunea u_m (0-24V)

Amplificatorul permite controlul motorului care antrenează pompa. Acesta asigură la ieșire o tensiune (u_m) între 0 și 24 V. Capetele de scală pot fi reglate cu ajutorul a două potențiometre de pe modulul amplificatorului. La intrarea amplificatorului se aplică tensiunea de comandă (u_a) dată de regulatorul automat. Caracteristica amplificatorului determinată din măsurători este prezentată în Figura 2.1 cu linie continuă.

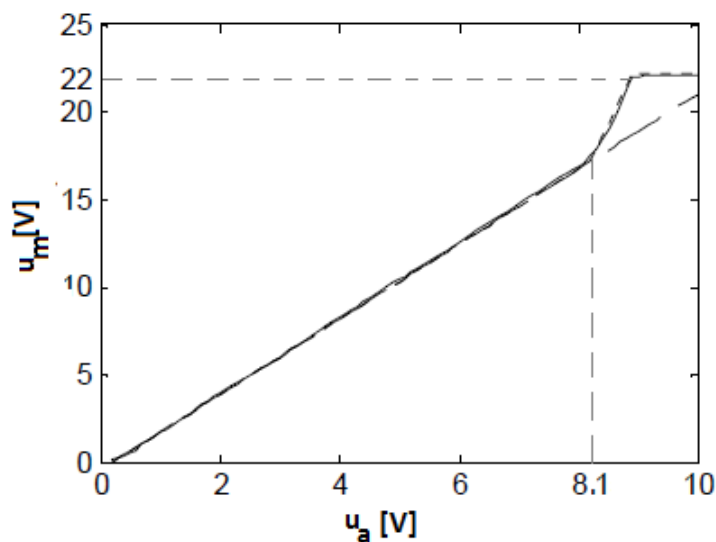


Figura 2.1 Caracteristica statică a amplificatorului

Caracteristica liniarizată pe tot domeniul de funcționare poate fi aproximată cu relația:

$$u_m = 2.2 \cdot u_a \quad (2.1)$$

iar reprezentarea corespunzătoare este cu linie întreruptă.

După cum se observă, pe caracteristica rezultată din măsurători, atunci când valoarea tensiunii de intrare u_a depășește pragul de 8.1 V, panta dreptei se schimbă. Din acest motiv, pentru a obține o caracteristică a modelului mai apropiată de cea reală atunci când

valoarea tensiunii de intrare este mai mare decât 8.1 V caracteristica este exprimată cu relația:

$$u_m = 2.2 \cdot u_a + 5(u_a - 8.1) \quad (2.2)$$

Tot din caracteristica statică rezultată din măsurători se observă și faptul că deși în teorie valoarea tensiunii de ieșire este între 0-24V, în practică, tensiunea de ieșire este între 0-22 V. Valoarea maximă de saturație a tensiunii de ieșire este 22 V.

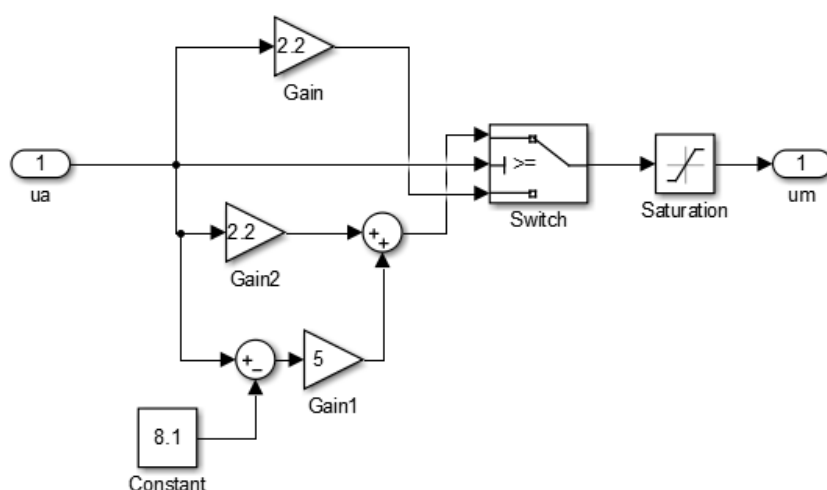


Figura 2.2 Implementarea amplificatorului în Simulink

O posibilitate de implementare a modelului amplificatorului este prezentată în Figura 2.2. Pentru ca schema Simulink să funcționeze corect trebuie alese valoarea de prag (Threshold) 8.1 în setarea proprietăților blocului *Switch* și valoarea de saturație 22 (Upper limit = 22, Lower Limit = 0) în proprietățile blocului *Saturation*. Setarea proprietăților blocurilor se pot accesa cu dublu click dreapta pe fiecare din blocuri.

O altă variantă de implementare a modelului amplificatorului constă în utilizarea blocului Embedded Matlab Function din biblioteca User-Defined Functions. Se selectează acest bloc din bibliotecă și se copiază în schemă. Funcția realizată de acest bloc poate fi editată din opțiunile blocului, după modelul:


```
function um = amp(uc)
um=2.2*uc;
if um<0; um=0; end
if uc>8.1; um=um+5*(uc-8.1); end
if um>22; um=22; end
```

2.2 Motorul

Variabilele de intrare în motor: tensiunea u_m (0-22V), curentul i_m .

Variabila de ieșire din motor: turația n .

Pompa este antrenată de un motor de curent continuu cu magneți permanenți. Mărimea de comandă a motorului este tensiunea de alimentare u_m , iar ca ieșire se considera turația motorului, n . Deoarece dinamica motorului este caracterizată de constante de timp mult mai mici decât constantele procesului în care se reglează nivelul, se considera doar ecuațiile motorului în regim staționar:

$$\begin{aligned} u_m &= R_m i_m + e_m \\ m &= m_r \\ e_m &= k_m n \\ m &= k_m i_m \end{aligned} \quad (2.3)$$

unde: R_m – rezistența înfașurării rotorice a motorului

i_m – curentul absorbit de motor

e_m – tensiunea contraelectromotoare dezvoltată de motor

m – cuplul activ dezvoltat de motor

m_r – cuplul rezistent

Tensiunea contra-electromotoare este proporțională cu turația motorului iar constanta k_m depinde de construcția motorului. Cuplul dezvoltat de motor este proporțional cu valoarea curentului prin motor, constanta de proporționalitate k_m fiind aceeași cu cea de la tensiunea contra-electromotoare, care se poate exprima astfel:

$$\begin{aligned} k_m n &= e_m = u_m - R_m i_m \\ R_m &= 3 \, \Omega \end{aligned} \quad (2.4)$$

Implementarea Simulink pentru modelul motorului este prezentată în Figura 2.3. Pentru a evita determinarea constantei de proporționalitate k_m se va considera în continuare că ieșirea motorului nu este direct turația n , ci $k_m n$. Constanta de proporționalitate k_m va fi inclusă în modelul pompei și apoi determinată experimental împreună cu celelalte constante din modelul pompei.

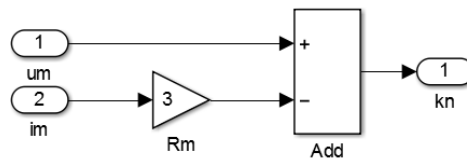


Figura 2.3 Implementarea modelului motorului în Simulink

Variabila de intrare cunoscută până acum este u_m (ieșirea din amplificator). Valoarea curentului rotoric i_m se poate obține în funcție de nivelul din rezervor, debitul și randamentul pompei. De aceea, înainte de a determina ecuațiile pentru i_m trebuie determinată caracteristica și randamentul pompei.

2.3 Pompa

Varibilele de intrare în pompă: turația motorului $k_m n$, nivelul din rezervorul h .

Variabila de ieșire din pompă: debitul de intrare în rezervorul principal q_i .

Pentru a calcula debitul generat de pompă trebuie determinate caracteristicile pompei și ale instalației. Caracteristica funcțională a pompei centrifuge reprezintă legătura dintre sarcina pompei și debitul ei pe tot domeniul de lucru. Deducerea acestei caracteristici pe cale analitică este greoaie și nepractică, deoarece calculul pierderilor hidraulice prin frecare și prin șoc se face destul de laborios și cu aproximații mari. Din acest motiv, caracteristicile funcționale ale pompei se determină pe baza încercărilor experimentale la standul de probe. În urma încercărilor s-a găsit că funcția $f(q_i, P_p, n) = 0$ care aproximează cel mai bine caracteristica reală este un paraboloid hiperbolic de ecuație:

$$P_p = k'_1 \cdot n^2 + k'_2 \cdot n \cdot q_i + k_3 \cdot q_i^2 \quad (2.5)$$

unde P_p reprezintă presiunea generată de pompă, n turația pompei și q_i debitul de lichid prin pompă iar coeficienții k'_1 , k'_2 , k_3 reprezintă valori constante pentru pompa dată. Deoarece în cazul nostru nu am aflat o valoare explicită pentru turația pompei n , ci doar pentru $k_m n$, înlocuind această expresie în relația de mai sus vom obține:

$$\begin{aligned} P_p &= k'_1 \cdot (k_m n)^2 + k'_2 \cdot (k_m n) \cdot q_i + k_3 \cdot q_i^2 \\ P_p &= k_1 \cdot n^2 + k_2 \cdot n \cdot q_i + k_3 \cdot q_i^2 \\ k_1 &= k'_1 \cdot (k_m)^2 \\ k_2 &= k'_2 \cdot k_m \end{aligned} \quad (2.6)$$

Valorile parametrilor k_1 , k_2 și k_3 vor fi determinate experimental.

Pentru scopuri practice, caracteristica generalizată a pompei se transpune în caracteristici parțiale definite la turație constantă (Figura 2.4).

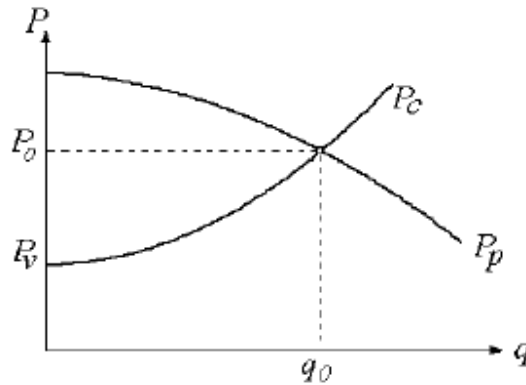


Figura 2.4 Determinarea grafică a punctului de funcționare al pompei centrifuge

$P_p(q)$ reprezintă caracteristica pompei la turație constantă, $P_c(q)$ este caracteristica tuturor consumatorilor (conducte, coturi, ramificații, recipiente, robinete etc.), P_v este presiunea statică a consumatorului, iar punctul determinat de coordonatele (q_0, P_0) este punctul static de funcționare reprezentat de intersecția caracteristicilor P_p și P_c .

Comportarea instalației din Figura 2.4 poate fi definită prin relația:

$$P_c = P_v + kq_i^2 \quad (2.7)$$

unde P_v reprezintă presiunea statică a consumatorului, iar kq_i^2 este căderea dinamică de presiune pe robineți, conduite etc.

Punctul de funcționare determinat grafic la intersecția P_p și P_c se poate determina și analitic din relația $P_p = P_c$, respectiv:

$$P_v + kq_i^2 = k_1n^2 + k_2nq_i + k_3q_i^2 \quad (2.8)$$

Ecuția care rezultă:

$$k_1n^2 + k_2nq_i + (k_3 - k)q_i^2 - P_v = 0$$

este o ecuație de gradul 2, de unde se determină q_i ca fiind:

$$q_i = \frac{k_2n + \sqrt{[k_2^2 + 4(k - k_3)k_1]n^2 - 4(k - k_3)P_v}}{2(k - k_3)} \quad (2.9)$$

În cazul instalației detaliată în Figura 1.1 rezervorul principal (rezervorul 1) și rezervorul tampon (rezervorul 2) au aceeași secțiune transversală. Acest lucru înseamnă că în funcționare, nivelul lichidului în rezervorul tampon se modifică cu aceeași valoare cu care se modifică nivelul lichidului în rezervorul principal. În aceste condiții, contrapresiunea pompei este reprezentată de presiunea exercitată de o coloană de apă cu înălțimea de valoare dublă față de nivelul lichidului în rezervorul principal, adică:

$$P_v = 2h \quad (2.10)$$

Substituind în Ecuația (2.9):

$$\begin{aligned} k_{11} &= k_2^2 + 4(k - k_3)k_1 \\ k_{12} &= 4(k - k_3)P_v = 8(k - k_3)h \\ k_{13} &= 2(k - k_3) \end{aligned} \quad (2.11)$$

obținem:

$$q_i = \frac{k_2 n + \sqrt{k_{11} n^2 - k_{12}}}{k_{13}} \quad (2.12)$$

Subsistemul pentru pompa centrifugă se obține implementând ecuația (2.12) în Simulink după cum se vede în Figura 2.5.

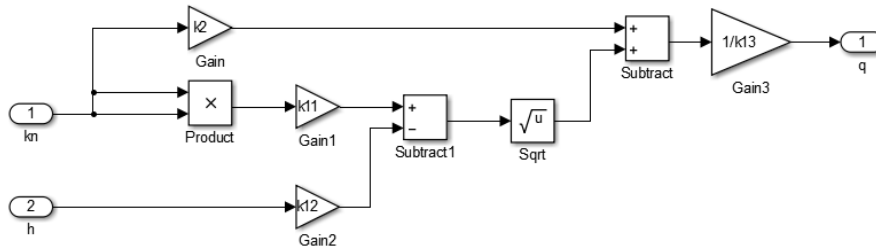


Figura 2.5 Implementarea pompei în Simulink

Se recomandă calcularea valorilor pentru constantele k_{11} , k_{12} , k_{13} într-un fișier .m în Matlab. După rularea fișierului, numele variabilelor împreună cu valorile atribuite vor apărea în workspace. Atunci când se rulează fișierul Simulink valorile pentru constantele respective vor fi luate din workspace.

Pentru a putea calcula valorile pentru k_{11} , k_{12} și k_{13} trebuie să determinăm k_1 , k_2 , k_3 și k . Pentru a determina caracteristica pompei s-au realizat câteva experimente ale căror rezultate sunt prezentate în Figura 2.6.

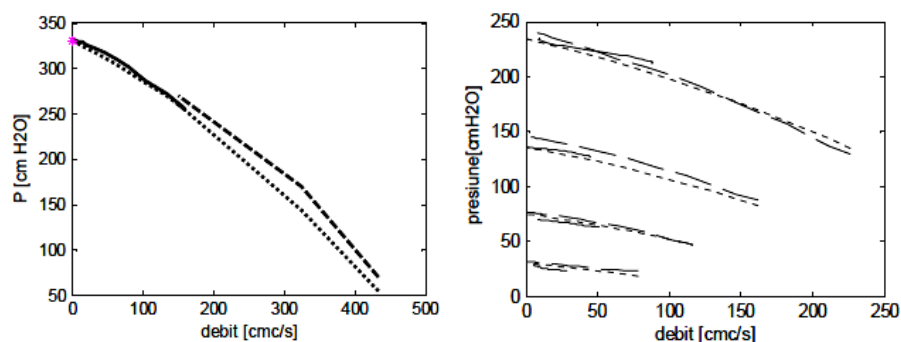


Figura 2.6 Caracteristica pompei pentru: valoarea maximă a tensiunii de alimentare (stânga) și pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare (dreapta)

În Figura 2.6 stânga, curba cu linie continuă reprezintă caracteristica pompei conform măsurătorilor cu debitmetrul pentru debitul de intrare în rezervorul principal montat în instalație și la o tensiune de alimentare a motorului pompei de 24V. Cu linie întreruptă este reprezentată caracteristica pompei utilizând valorile de catalog iar cu linie punctată caracteristica pompei calculată conform ecuației (2.6).

Se poate observa domeniul acoperit de debitul de intrare conform măsurătorilor acoperă doar partea de început a caracteristicii, debitul maxim la care se poate ajunge cu robinetul V101 complet deschis este de cca $92 \text{ cm}^3/\text{s}$ (cmc/s). Dacă se demontează debitmetrul pentru măsurarea debitului de intrare q_i (pe care, la debit maxim se constată o cădere de presiune de cca 0,4 bar) se constată că debitul maxim crește puțin, dar nici în această situație nu se ajunge nici măcar la jumătate din domeniul de valori posibile.

Pentru coeficienții k_1 , k_2 , k_3 au fost determinate pe baza măsurătorilor următoarele valori:

$$k_1 = 0.624, k_2 = -0.015, k_3 = -0.0006 \quad (2.13)$$

În partea dreaptă, sunt prezentate 4 seturi de curbe obținute pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare a pompei, respectiv pentru valorile de 4, 6, 8 și 10 volți pe intrarea amplificatorului de putere (ua). Cu linie continuă s-a reprezentat caracteristica pompei conform măsurătorilor în instalație cu debitmetrul montat pe debitul de intrare în rezervorul principal, cu linie întreruptă conform măsurătorilor după

demontarea debitmetrului iar cu linie punctată caracteristica pompei conform următoarei relații:

$$P_p = 0.624n^2 - 0.015nq - 0.0006q^2 \quad (2.14)$$

Se constată din nou că domeniul de variație a debitului în instalație, cu debitmetrul montat acoperă valori scăzute față de posibilitățile pompei. Din păcate pe această porțiune a caracteristicii la variații mici ale presiunii rezultă variații mari ale debitului adică debitul de intrare în rezervorul principal va fi puternic influențat de nivelul din rezervor.

Pentru a determina caracteristica instalației s-a luat în considerare un set de măsurători pentru presiunea la ieșirea din pompă (P_{po}), debitul dat de pompă (q) și nivelul în rezervor. Pe baza măsurătorilor de nivel s-a calculat presiunea statică în instalație (P_v).

Valoarea coeficientului k s-a calculat ca o medie a valorilor rezultate din relația:

$$k = \frac{P_{po} - P_v}{q^2} \quad (2.15)$$

rezultând:

$$k = 0.035 \quad (2.16)$$

2.4 Randamentul pompei

Randamentul global al pompei, a cărei valoare este necesară pentru a putea calcula curentul rotorului al motorului ce acționează pompa, se calculează ca raportul între puterea hidraulică dezvoltată de pompă (P_H) și puterea electrică pe care o consumă motorul pompei (P_E):

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_H}{P_E} \\ P_E &= u_m i_m \\ P_H &= \frac{q \rho g P_p}{3.6 * 10^3} \end{aligned} \quad (2.17)$$

unde: u_m reprezintă tensiunea de alimentare a motorului pompei,

i_m – curentul consumat de motorului pompei

q – debitul pompei [m^3/h],

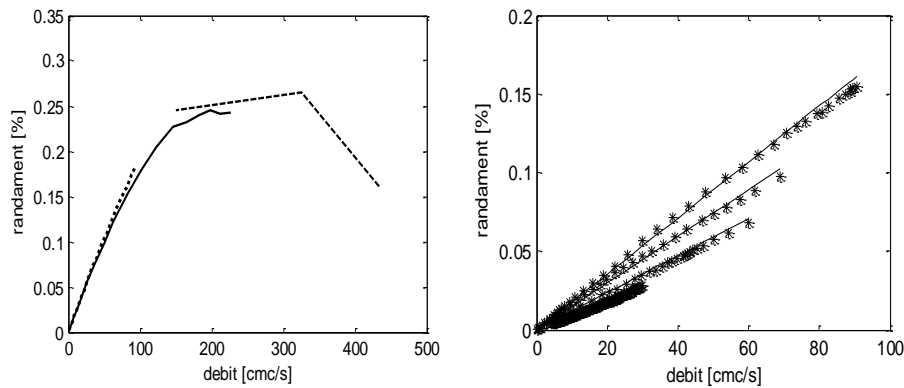
ρ – densitatea lichidului la temperatura de lucru [kg/m^3],

P_p – presiunea dezvoltată de pompă (diferența dintre presiunea pe refulare și cea pe admisie) [m]

g – accelerația gravitațională [m/s^2]

Constanta de la numitorul expresiei pentru P_H apare din cauză că debitul este exprimat aici raportat la oră și nu la secundă.

Pentru determinarea randamentului pompei s-au realizat câteva experimente ale căror rezultate sunt prezentate în figurile de mai jos. S-a calculat randamentul global conform relației (2.17) pe baza măsurărilor efectuate pe standul de laborator la valoarea maximă a tensiunii pe motorul pompei ($u_m=24V$) dată de la o sursă stabilizată. Reprezentând grafic valorile obținute în funcție de debit s-a obținut curba punctată din Figura 2.7. Se poate observa că domeniul de variație a debitului în instalație este relativ restrâns ($q_{max}=92cm^3/s$), valorile măsurate fiind mici dacă ne referim la caracteristicile de catalog ale pompei. În fișa tehnică a pompei este prezentat un tabel ce cuprinde trei seturi de valori pentru presiune, debit și curentul absorbit de motorul pompei. Calculând și reprezentând grafic randamentul pe baza acestor date s-a obținut linia întreruptă din Figura 2.7 (stanga). Funcționarea pompei în instalația de laborator la valori scăzute ale debitului față de datele de catalog este datorată căderilor mari de presiune dinamică pe debitmetru și pe conducte (s-a folosit conductă de DN12 în loc de DN20 cum este recomandat în datele de catalog ale pompei). S-a demontat debitmetrul și s-au refăcut măsurătorile tot la valoarea maximă a tensiunii pe motorul pompei. S-au obținut rezultatele prezentate în Figura 2.7 (stanga) cu linie continuă. Aceste rezultate vin să confirme atât măsurătorile anterioare cu debitmetrul montat în instalație (linie punctată) cât și datele de catalog (linie întreruptă).



*Figura 2.7 Randamentul pompei centrifuge (stanga);
Liniarizarea randamentului (dreapta)*

Funcționarea pompei în instalația de laborator la valori scăzute ale debitului are variația randamentului în funcție de debit liniară. Repetând experimentele pentru diferite tensiuni de alimentare s-a putut determina o relație simplă care să permită calculul randamentului dacă se cunoaște debitul pompei (q) și tensiunea de alimentare (u_m):

$$\begin{aligned}\eta &= k_\eta u_m q \\ k_\eta &= 8 * 10^{-5}\end{aligned}\tag{2.18}$$

În Figura 2.7 (dreapta) s-au reprezentat cu * rezultatele calculelor bazate pe măsurători conform cu relația (2.17) iar cu linie continuă reprezentarea rezultatelor obținute cu relația (2.18), pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare. Se poate observa că relația (2.18) de calcul a randamentului dă rezultate satisfăcătoare. Pentru diferite tensiuni de alimentare s-a putut determina o relație simplă care să permită calculul randamentului dacă se cunoaște debitul pompei (q) și tensiunea de alimentare (u_m).

În Figura 2.8 este prezentată schema Simulink pentru modelarea blocului care calculează randamentul pompei conform relației (2.18).

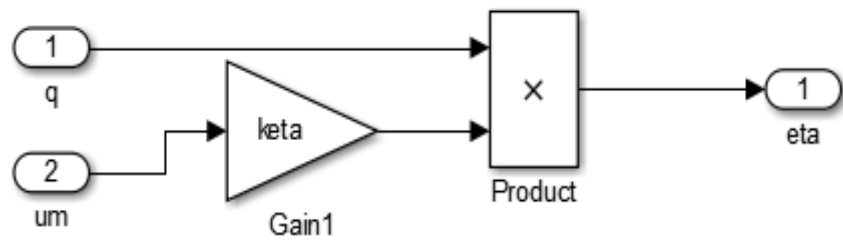


Figura 2.8 Schema bloc corespunzătoare relației de calcul a randamentului pompei

2.5 Curentul rotoric

Valoarea curentului rotoric, i_m , se poate obține pe baza ecuațiilor randamentului pompei descrise în (2.17). Puterea electrică este produsul dintre curentul i_m și tensiunea u_m . Astfel curentul i_m poate fi exprimat în funcție de puterea hidraulică, tensiune și randament astfel:

$$i_m = \frac{P_H}{u_m \eta} = \frac{q \rho g P_p}{u_m \eta} \quad (2.19)$$

Debitul q fiind exprimat de data aceasta în m^3/s . În formula (2.19), constantele $\rho = 1000 \text{ kg}/m^3$ și $g = 10 \text{ m}/s^2$ vor fi înlocuite de valorile lor. Trebuie considerat faptul că debitmetrul din sistem măsoară debitul având unitatea de măsură cm^3/s . Astfel sunt necesare câteva schimbări ale unităților de măsură pentru debitul q din m^3/s în cm^3/s ($q [cm^3/s] = q [m^3/s] * 10^{-6}$) și pentru presiunea pompei P_p din m în cm ($P_p [cm] = P_p [m] * 10^{-2}$) pentru a trece de la mărimile exprimate în unitățile sistemului internațional la cele folosite în model. Astfel ecuația (2.19) devine:

$$i_m = \frac{q * 10^{-6} * 1000 * 10 * P_p * 10^{-2}}{u_m \eta} \quad (2.20)$$

Considerăm $P_p = P_c$ și pe baza relațiilor (2.7), (2.10) și (2.20) se rescrie:

$$i_m = \frac{P_H}{u_m \eta} = \frac{q(2h + kq^2)}{10^4(u_m \eta)} \quad (2.21)$$

În Figura 2.9 este prezentată schema Simulink pentru modelarea blocului care calculează randamentul pompei. Constanta 0.001 este folosită pentru a evita o eroare în cazul unei împărțiri cu 0 în blocul *Divide*.

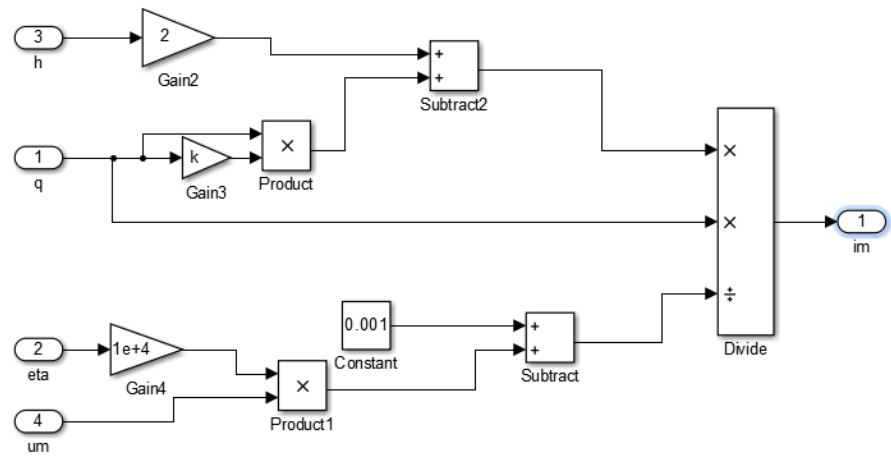


Figura 2.9 Schema Simulink pentru calculul curentului rotoric

2.6 Rezervorul

Vom considera pentru început cazul general, descris la curs, pentru modelarea rezervorului cu ieșire gravitațională. Un rezervor (Figura 2.10), având secțiunea constantă A , este alimentat prin partea superioară a bazinului cu un lichid cu debit q_i curgând liber (înălțimea lichidului din rezervor nu influențează debitul de intrare). Din acest rezervor lichidul curge cu un debit q_e . Debitul de ieșire q_e se obține printr-un robinet acționat manual V_e a cărui secțiune poate fi modificată, sau direct printr-o conductă. Debitul de intrare q_i poate fi modificat cu ajutorul robinetului V_i . În reglările de nivel elementul de execuție poate fi V_i sau V_e , adică mărimea de execuție poate fi debitul q_i de intrare sau debitul q_e de ieșire, după cerințele procesului și caracteristicile utilajului. În rezervoarele deschise și cu ieșire gravitațională la presiunea atmosferică, lichidul curge sub acțiunea greutății proprii, fără să mai existe o altă presiune care să îl influențeze. În acest caz, pentru curgerea turbulentă, relația se poate scrie sub forma:

$$q_e = C\sqrt{h} \quad (2.22)$$

în care C este un coeficient care depinde de secțiunea conductei de ieșire, eventual ale strângulării conductei în cazul când există robinetul V_e , și de tipul lichidului.

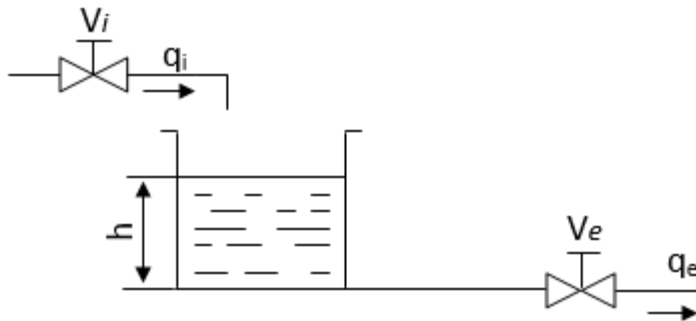


Figura 2.10 Schema rezorului

unde,

h – nivelul lichidului în rezervor, ieșirea procesului

q_i – debitul de intrare

q_e – debitul de ieșire

Ve, Vi – robineți cu acționare manuală.

Determinarea modelului matematic și a funcției de transfer se poate obține pe baza bilanțului de material. Relația este următoarea:

$$\frac{dV}{dt} = q_i - q_e \quad (2.23)$$

care exprimă faptul că variația volumului de lichid din rezervor este egală cu diferența între cantitatea de lichid intrată și aceea ieșită din rezervor în intervalul de timp dt considerat.

Considerând aria suprafeței S constantă și înlocuind pe $\frac{dV}{dt}$ cu $S \cdot \frac{dh}{dt}$ (unde $\frac{dh}{dt}$ reprezintă variația înălțimii în raport cu timpul), obținem:

$$S \cdot \frac{dh}{dt} = q_i - q_e \quad (2.24)$$

Această ecuație diferențială este neliniară din cauza termenului: $q_e = C\sqrt{h}$.

Pentru determinarea unui model neliniar al procesului care să poată fi implementat cu ușurință în Simulink, vom considera din nou ecuația:

$$q_i - q_e = S \frac{dh}{dt} \quad (2.2205)$$

scrisă de această dată sub forma:

$$h = \int \frac{1}{S} (q_i - q_e) dt \quad (2.26)$$

Pentru calcularea debitului de ieșire din rezervor se utilizează formula:

$$q_e = C\sqrt{h}, \quad (2.27)$$

rezultând pentru relația anterioară:

$$h = \int \frac{1}{S} (q_i - C\sqrt{h}) dt \quad (2.28)$$

În acest caz se pune în evidență neliniaritatea procesului, N iar schema bloc a procesului devine:

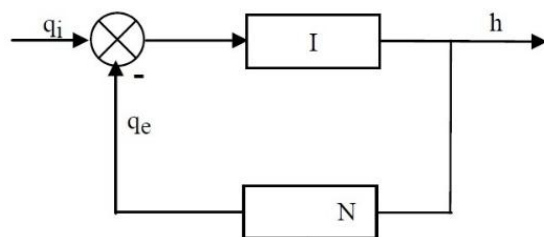


Figura 2.11 Schema bloc a modelului nelinier a unui rezervor deschis

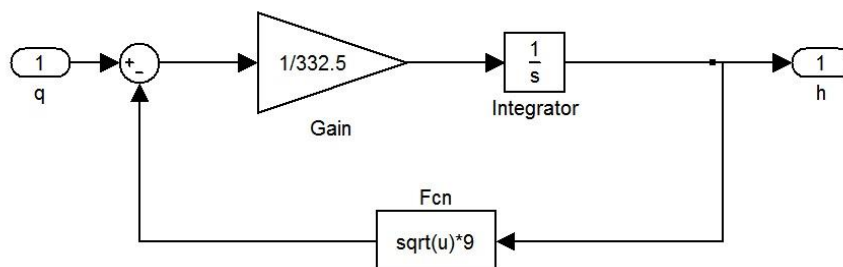


Figura 2.12 Schema bloc Simulink corespunzătoare rezervorului

Pentru calcularea debitului de ieșire din rezervor se poate utiliza formula (2.22) care permite determinarea debitului de ieșire dacă se cunoaște constanta C și nivelul în rezervor. Constanta C depinde de caracteristicile lichidului din instalație și de poziția robinetului de pe conducta de ieșire din rezervor. Rezultatele măsurărilor experimentale realizate pe standul de laborator pentru debitul de ieșire, cu robinetul fixat pe o anumită poziție și pentru diferite valori ale nivelului în rezervor sunt prezentate în Figura 2.13 (linie continuă). Pentru a obține acest grafic a fost umplut rezervorul cu robinetul de ieșire închis, până la un nivel $h = 17\text{cm}$, după care a fost oprită pompa, apoi s-a deschis robinetul de ieșire și s-au măsurat valorile debitului de ieșire și ale nivelului până la golirea rezervorului. Valorile debitului de ieșire q_e calculate cu formula (2.22) pentru $C = 9$ sunt reprezentate cu linie punctată. Se poate observa că rezultatele calculate și cele măsurate sunt apropiate.

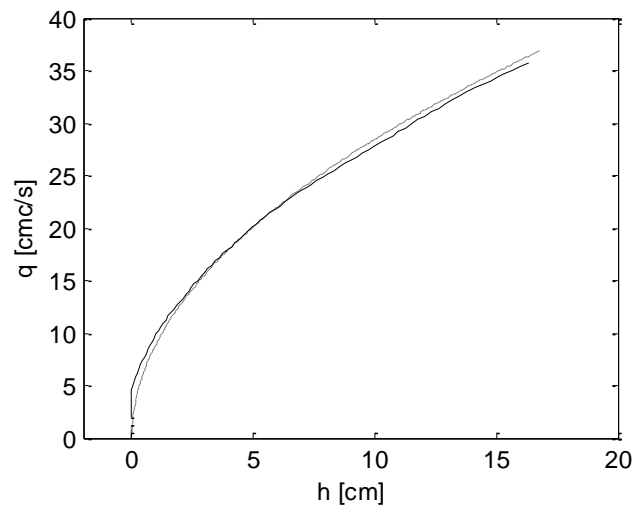


Figura 2.13 Debitul de ieșire din rezervor în funcție de nivel

2.7 Senzorul de nivel

Senzorul de nivel este un senzor ultrasonic cu ieșire în curent unificat 4-20mA. Semnalul în curent (i_{pv}) este transformat în semnal de tensiune (u_{pv}) în domeniul 0 - 10V cu ajutorul convertorului curent-tensiune. Caracteristica traductorului de nivel s-a dovedit în urma măsurărilor a fi liniară pe domeniul în care este utilizat în instalație, astfel că nivelul în rezervor se poate calcula cu formula:

$$h = k_{SN} \cdot u_{PV} \quad (2.29)$$

unde,

$$k_{SN} = 30cm/10V = 3 \text{ cm}/V \quad (2.30)$$

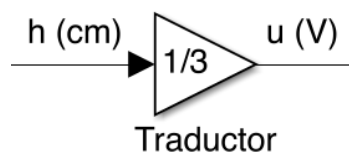


Figura 2.14 Schema bloc corespunzătoare traductorului

2.8 Blocul filtru

Dupa descrierea detaliată a fiecărui bloc în parte, schema bloc a instalației rezultă precum Figura 2.15.

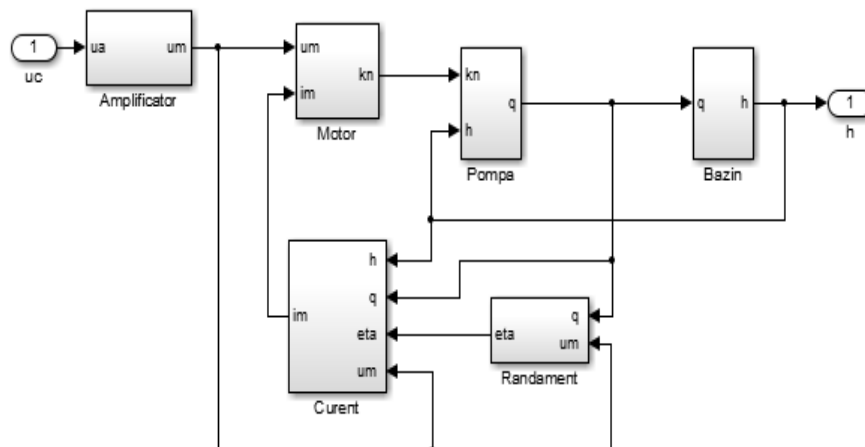


Figura 2.15 Schema bloc a instalației

Implementarea acestui model în Simulink și rularea lui va genera o eroare din cauza existenței unei bucle algebrice. Această eroare apare la prima perioada de integrare deoarece pentru a calcula valoarea curentului (i_m) din blocul Motor e necesar să se cunoască valoarea debitului din blocul Curent și kn din blocul Pompa. Astfel calculul valorii curentului se bazează pe însuși valoarea sa. De aceea e nevoie de introducerea unui bloc de întârziere a semnalului. Deoarece este necesara simularea cu diferite valori pentru condițiile inițiale, trebuie aleasă o variantă constructivă care permite introducerea de condiții inițiale, astfel, blocul filtru va fi construit sub forma unei funcții de transfer de ordinul 1, cu un integrator și reacție negativă. Condițiile inițiale pentru q_e , vor putea fi introduse în blocul integrator. Constanta de timp a filtrului va fi de 1 sec, comparabilă cu constanta de timp a pompei (de reținut că în modelarea pompei au fost considerate numai relații de regim staționar și a fost neglijată dinamica

acesteia) și neglijabilă în raport cu constanta de timp a procesului. Funcția de transfer se calculează din formula sistemului închis pentru sistemul din Figura 2.16.

$$H_{filtru} = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s}} = \frac{1}{s + 1} \quad (2.31)$$

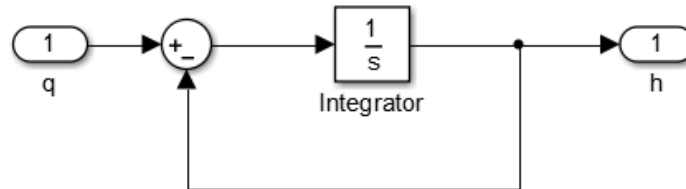


Figura 2.16 Blocul filtru

Sistemul final care include și blocul Filtru este prezentat în Figura 2.17. Folosind această abordare cu filtrul conectat la ieșirea blocului Pompa facilitează introducerea unor condiții inițiale asupra debitului pompei. Astfel se poate simula sistemul din condiții inițiale nenule.

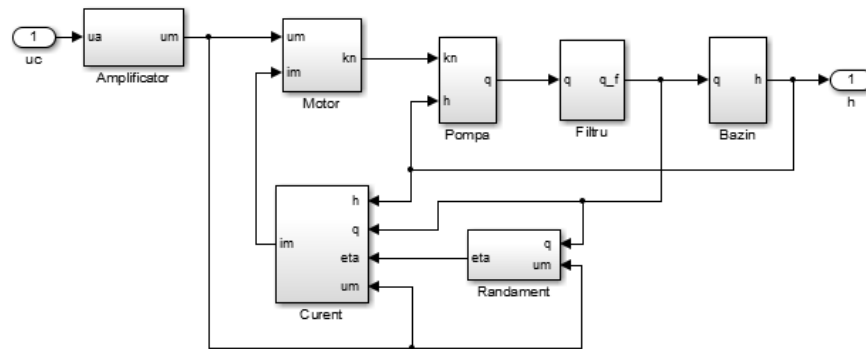


Figura 2.17 Schema bloc a instalației cu filtru

3. Structură clasică de reglare cu reacție negativă

Nivelul este parametrul efectiv controlat în cursul desfășurării procesului și trebuie menținut la o valoare constantă (reglare de stabilizare), sau trebuie să urmărească o referință.

În vederea stabilirii structurii și parametrilor sistemului de reglare, este necesară determinarea caracteristicilor dinamice ale instalației tehnologice.

Pentru acordarea regulatorului, se folosesc metode de acordare bazate pe un model matematic liniar, care poate fi determinat prin stabilirea pe cale analitică a structurii modelului și determinarea coeficienților pe cale experimentală.

La o modificare a intrării de tip treaptă, $u_c = 5\text{ V}$ aplicată intrării blocului amplificator (jumătate din valoarea maximă a comenzii), se constată că ieșirea sistemului evoluează exponențial.

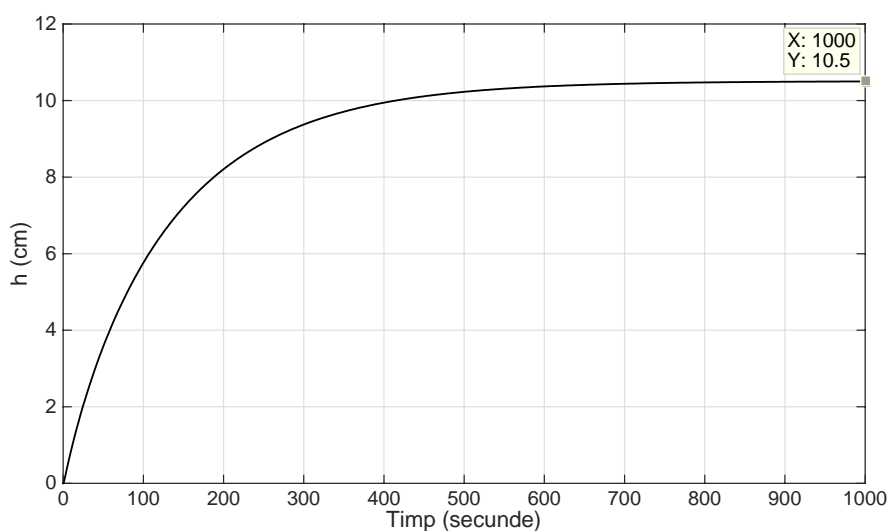


Figura 3.1 Evoluția înălțimii la o intrare treaptă $u_a = 5\text{ V}$

Din Figura 3.1 se observă că pentru o intrare treaptă $u_a = 5\text{ V}$, nivelul în rezervor se stabilizează la $h = 10.5\text{ cm}$.

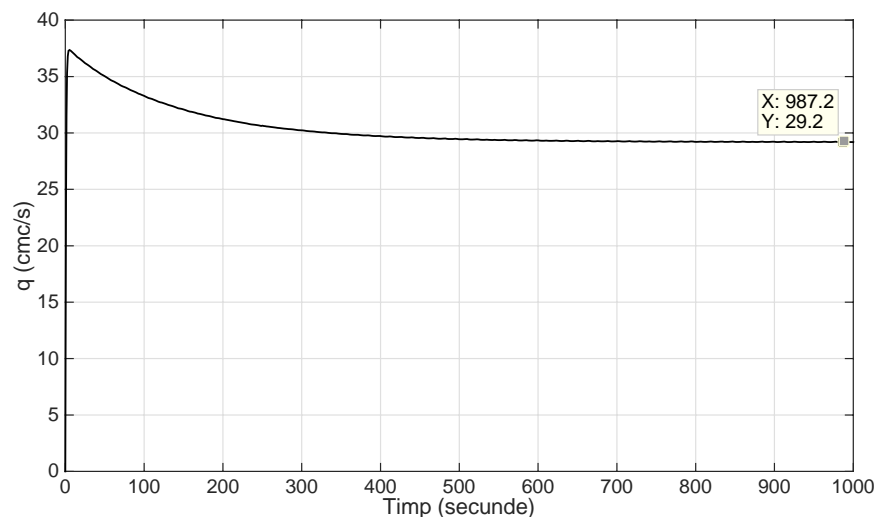


Figura 3.2 Evoluția debitului la o intrare treaptă $u_a = 5V$

Din Figura 3.2 se observă că debitul produs de pompă se stabilizează în jurul valorii de $29.2 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Se obține o valoare a nivelului $h_0 = 10.5 \text{ cm}$, în regim staționar, și o valoare a debitului dat de pompă egală cu a debitului de ieșire din rezervor, de $29.2 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Mediul Simulink permite introducerea condițiilor inițiale în blocul Integrator utilizat în schema pentru filtru și schema pentru rezervor. Astfel, se includ condițiile inițiale pentru debit $q_0 = 29.2 \text{ cm}^3/\text{s}$, în blocul integrator din blocul filtru și condițiile inițiale pentru înălțime $h_0 = 10.5 \text{ cm}$, în blocul integrator din blocul rezervor.

Considerând ca punct de funcționare această valoare a nivelului, și considerând că nu vor exista variații de peste 20% din această valoare, vom determina un model matematic liniar care să descrie funcționarea sistemului în jurul acestui punct. La o nouă modificare de tip treaptă a intrării, $u_a = 5.5 V$, se observă că, din nou, ieșirea sistemului evoluează exponențial, și se obține o valoare a nivelului $h = 13 \text{ cm}$ în regim staționar și rezultă $\Delta h = 2.5 \text{ cm}$ (Figura 3.3).

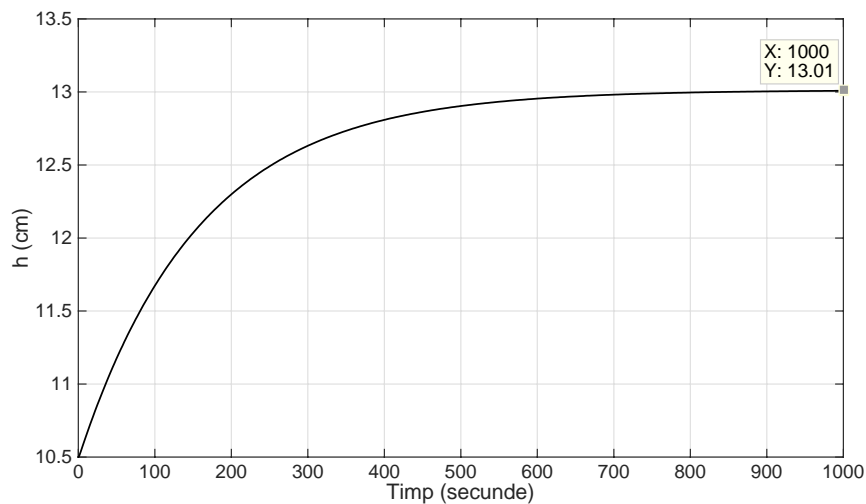


Figura 3.3 Ieșirea sistemului (h) la o modificare a intrării de 0.5 V

Comportamentul dinamic este echivalent cu al unui sistem de ordinul I, caracterizat printr-o constantă de timp mult mai mare în comparație cu cea a elementului de execuție, care poate fi neglijată.

Pe baza rezultatelor simulării, putem determina un model matematic, pentru variații mici ale comenzii (mai mici de 20%) în jurul unui punct de funcționare ales la jumătatea intervalului de variație a mărimii de comandă. Astfel, din răspunsul indicial, considerând structura generală a unui sistem de ordinul I:

$$H_P(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1} \quad (3.1)$$

pot fi determinate constantele k_p și T_p .

Trebuie reamintit că înălțimea apei din bazin este măsurată de senzorul ultrasonic care va avea ca ieșire o tensiune egală cu $1/3[V/cm]$. Din această cauză semnalul de reacție, adică intrarea de măsură pentru regulator se va obține luând în considerare și modelul traductorului, ceea ce conduce la înmulțirea valorilor înălțimii cu constanta $1/3$. În schema bloc se va lua în considerare acest aspect și semnalul de referință va fi scalat în același fel.

Obținem:

$$k_p = \frac{\Delta h/3}{\Delta u_a} = \frac{2.5/3}{0.5} = \frac{5}{3} = 1.67 \quad (3.2)$$

iar pentru constanta de timp se determină din graficul din Figura 3.3 ca fiind intervalul după care valoarea lui h ajunge la $h_0 + 0.63 * \Delta h = 12.075$. Se obține astfel o valoare a constantei de timp de 160 sec.

Rezultă:

$$H_P(s) = \frac{1.67}{160s + 1} \quad (3.2)$$

Deoarece se impune ca abaterea staționară să fie nulă, în cazul unor astfel de procese se alege o reglare de tip PI. Pentru acordarea regulatorului se va utiliza o metodă de acordare foarte simplă: se impune ca procesul în buclă închisă să aibă o comportare specifică unui sistem de ordinul I, respectiv se impune timpul de răspuns al sistemului. Comportarea sistemului în buclă închisă va fi dată de:

$$H_O(s) = \frac{1}{T_O s + 1} \quad (3.3)$$

T_O , constanta de timp corespunzătoare sistemului în buclă închisă.

Prin impunerea comportării în buclă închisă, respectiv a timpului de răspuns, $t_r = 160$ [s], se obține constanta de timp a procesului în buclă închisă:

$$T_O = \frac{t_r}{4} = 40 \text{ [s]} \quad (3.4)$$

Obținem:

$$H_O(s) = \frac{1}{40s + 1} \quad (3.5)$$

Din relația:

$$H_R(s) = \frac{1}{H_P(s)} \frac{H_O(s)}{1 - H_O(s)} \quad (3.6)$$

Se deduce regulatorul de tip PI:

$$H_R(s) = 2.395 \left(1 + \frac{1}{160s} \right) \quad (3.7)$$

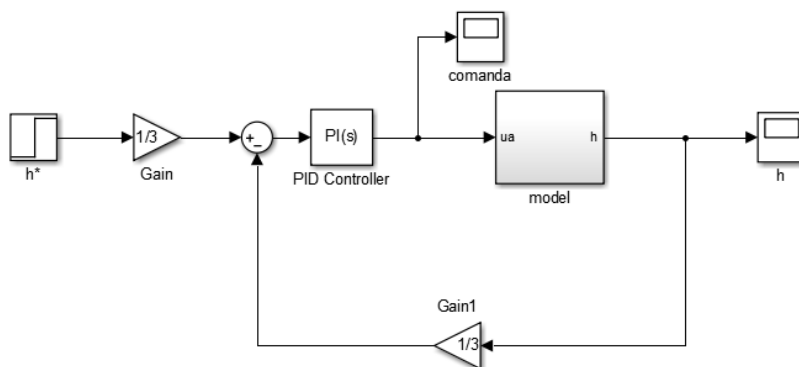


Figura 3.4 Schema de reglare clasică cu regulator PI

Având în vedere că sistemul are condiții inițiale pentru debit și înălțime, condiția inițială pentru marimea de intrare $u_a = 5V$ va fi introdusă în blocul de PID Controller din Figura 3.4. Cu regulatorul obținut, ieșirea sistemului reprezentând înălțimea coloanei de lichid, urmărește referința fără abatere și are timpul de răspuns pentru o treaptă aplicată intrării de 160 sec (Figura 3.5).

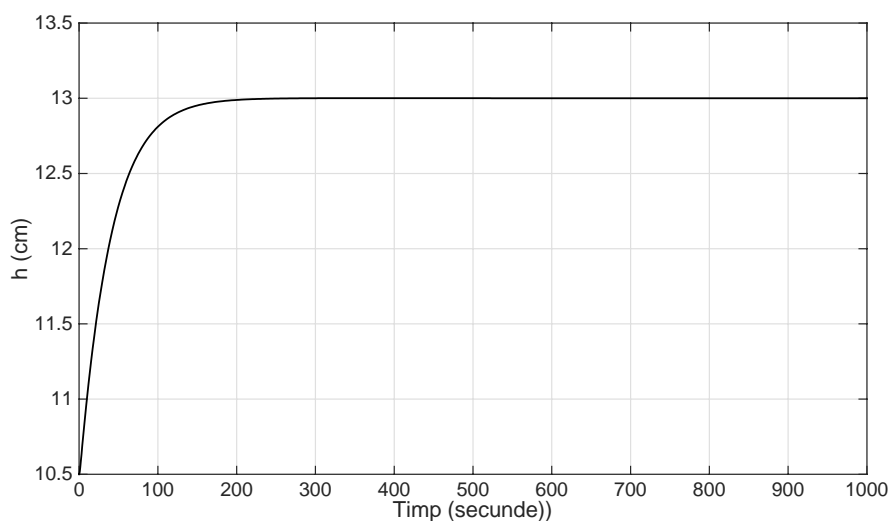


Figura 3.5 . Răspunsul sistemului în buclă închisă cu un regulator PI

În timpul funcționării instalației pot să apară diferite perturbații, care pot influența negativ desfășurarea procesului, prin modificarea nivelului la alte valori decât valoarea stabilită ca referință.

Simularea unei astfel de perturbații asupra debitului de ieșire q_e (închiderea sau deschiderea robinetului de evacuare V112), ar trebui să se reflecte prin modificarea constantei C , din relația debitului de ieșire:

$$q_e = C\sqrt{h} \quad (3.8)$$

Pentru a simula perturbația, pentru constanta C se va utiliza un generator de semnal treaptă ca și în Figura 3.6.

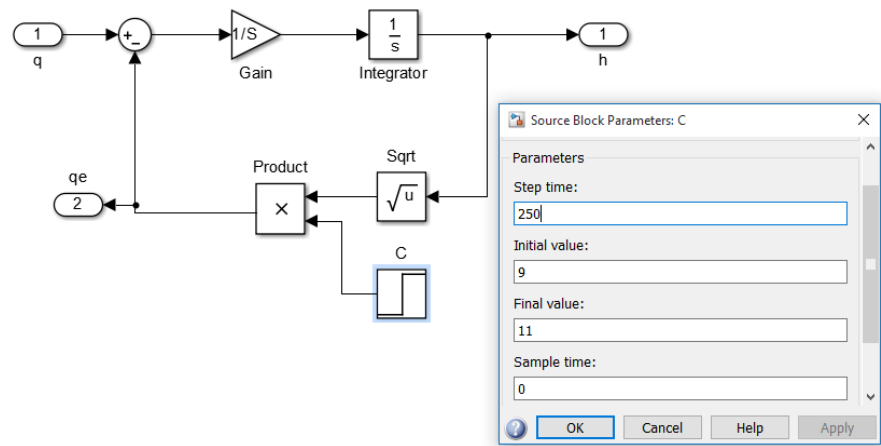


Figura 3.6 Adăugarea unei perturbații pe debitul de ieșire

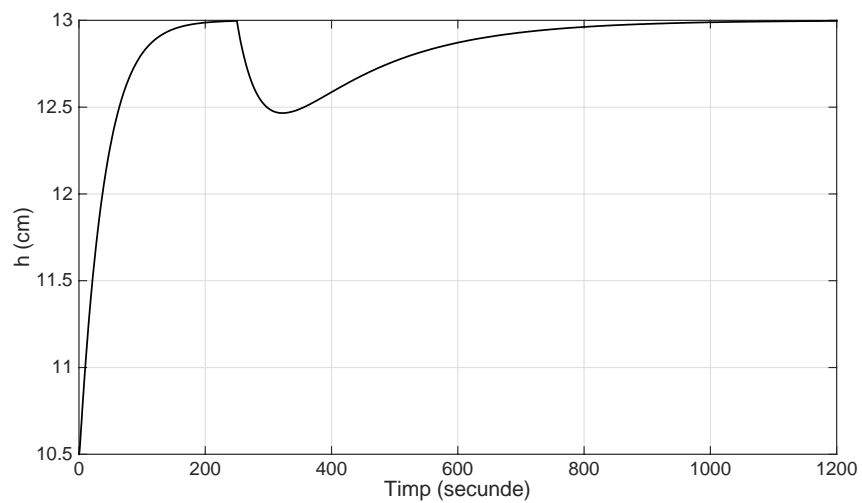


Figura 3.7 Evoluția în timp a nivelului la apariția unei perturbații pe debitul de ieșire

Din rezultatele obținute în urma simulării, se constată că sistemul de reglare automată urmărește în regim staționar referința fără abatere staționară și anulează efectul apariției unei perturbații pe debitul de ieșire din rezervorul principal. Din Figura 3.7 se poate observa că anularea acestei perturbații se face într-un interval de timp de cca 800 sec. Din păcate rejectarea perturbației este lentă, astfel că ar fi necesară o analiză atentă asupra acestor performanțe.

Regulatorul de tip proporțional integrator, PI, este folosit pentru a îmbunătăți performanțele sistemului la modificarea referinței (urmărire) și pentru a rejecta perturbațiile (reglare). Un factor important care ar trebui luat în considerare în acordarea regulatorului este timpul de răspuns la perturbație.

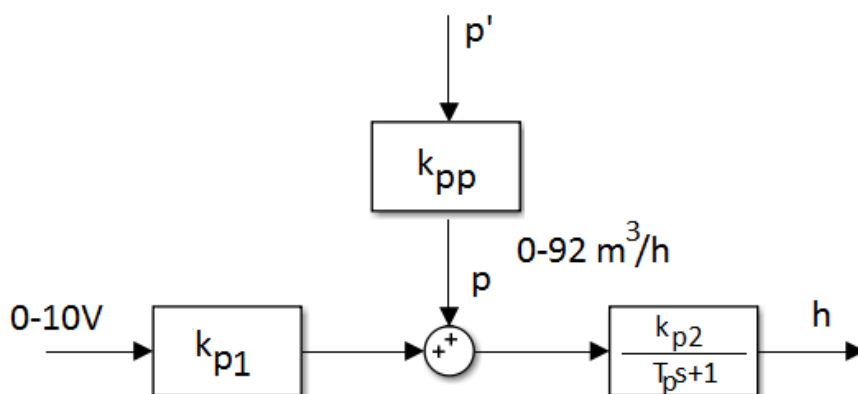


Figura 3.8 Introducerea unei perturbații la intrarea procesului

Vom considera de aceasta dată introducerea unei perturbații la intrarea în rezervor prin modificarea debitului de intrare q_i . Această perturbație acționează aditiv asupra debitului dat de pompa (la intrarea sumatorului din Figura 3.8). Acest lucru se realizează în practică prin modificarea poziției robinetului V101. În modelul neliniar al procesului, realizat în Simulink, modificarea poziției robinetului duce la modificarea constantei k . Pentru introducerea perturbației în Simulink, schema pompei ar trebui refăcută pentru a putea realiza modificarea lui k în timpul simulării. Aceasta ar însemna refacerea schemei Simulink a pompei astfel încât constanta k să fie intrare pentru acest bloc.

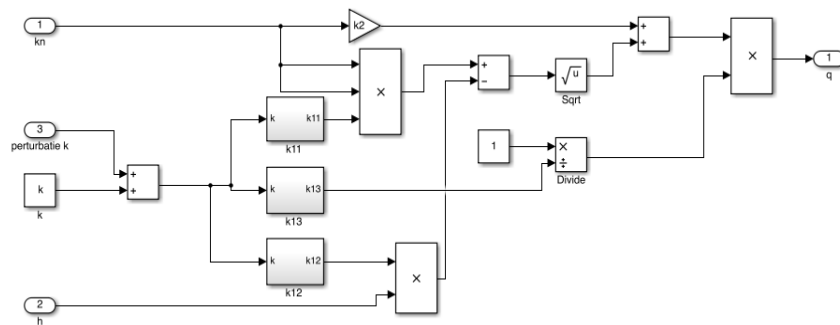


Figura 3.9 Schema Simulink a pompei refăcută pentru a permite introducerea perturbației pe debitul de intrare

Apoi, pentru a simula perturbația se va utiliza pentru constanta k un generator de semnal treaptă.

Revenind la Figura 3.8, în regim liniar, factorul de amplificare k_{p1} se poate determina cu relația:

$$k_{p1} = k_{\text{amplificator}} \cdot k_{\text{pompa}} = 2,2 \cdot \frac{92}{22} = 9,2 \quad (3.9)$$

Pornind de la schema de reglare clasică din Figura 3.4 putem calcula simbolic regulatorul dacă impunem funcția de transfer în buclă închisă, H_o .

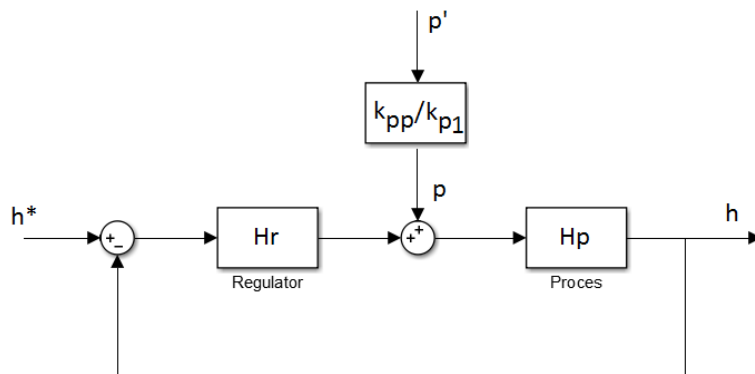


Figura 3.10 Schema de reglare clasică

Pentru simplificarea calculelor se consideră că perturbația acționează aditiv la intrarea procesului (H_p). Pentru că folosim aici doar modele liniare, funcții de transfer, algebra schemelor funcționale

permite reconfigurarea sistemului astfel ca perturbația să acționeze la intrarea procesului. Pentru aceasta însă va trebui să împărțim amplificarea pe calea perturbației cu factorul k_p pentru ca am modificat locul de aplicare a perturbației de după k_p în fața lui. Perturbația p este o perturbație care acționează asupra intrării în proces și poate fi rejectată doar dacă pe reacție este un integrator. Pentru o analiză detaliată a comportamentului sistemului la o perturbație pe intrare se aplică teoria superpoziției:

- se consideră $h^* \neq 0$ și $p = 0$
- se consideră $h^* = 0$ și $p \neq 0$

Pentru primul caz, știind că în regim staționar $h^* = h$ (ieșirea trebuie să urmărească referința) și pornind de la funcția de transfer a procesului de ordin I

$$H_p = \frac{k_p}{T_p s + 1} \quad (3.10)$$

se impune funcția de transfer în buclă închisă:

$$H_o = \frac{1}{T_o s + 1} \quad (3.11)$$

Regulatorul se poate calcula după formula:

$$H_r = \frac{1}{H_p} \cdot \frac{H_o}{1 - H_o} \quad (3.12)$$

Înlocuind ecuațiile (3.10) și (3.11) în (3.12) obținem:

$$H_r = \frac{T_p s + 1}{k_p} \cdot \frac{\frac{1}{T_o s + 1}}{1 - \frac{1}{T_o s + 1}} \quad (3.13)$$

$$H_r = \frac{T_p s + 1}{k_p T_o s}$$

H_r este un regulator cu efect proporțional integrator care elimină abaterea staționară la poziție și îmbunătățește timpul de răspuns.

Ecuția unui regulator de tip PI este:

$$H_{PI} = k_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.14)$$

Egalând ecuația (3.14) cu (3.13)

$$\begin{aligned}
k_r \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) &= \frac{T_p s + 1}{k_p T_o s} \\
k_r \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) &= \frac{T_p s}{k_p T_o s} + \frac{1}{k_p T_o s} \\
k_r \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) &= \frac{T_p}{k_p T_o} \left(1 + \frac{1}{T_p s}\right) \\
\Rightarrow \begin{cases} T_p = T_i \\ k_r = \frac{T_p}{k_p T_o} \end{cases}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

rezultând formula generală a regulatorului

$$H_r = \frac{T_p}{k_p T_o} \left(1 + \frac{1}{T_p s}\right) \tag{3.16}$$

și funcția de transfer a sistemului în buclă închisă:

$$\left. \begin{aligned} H_o &= \frac{1}{T_o s + 1} \\ k_r &= \frac{T_p}{k_p T_o} \Rightarrow T_o = \frac{T_p}{k_p k_r} \end{aligned} \right\} \Rightarrow H_o = \frac{1}{\frac{T_p}{k_p k_r} s + 1} \tag{3.17}$$

Din ecuația (3.17) și (3.16) putem concluda că timpul de răspuns este influențat doar de factorul de proporționalitate k_r .

Considerând al doilea caz: cel în care $h^* = 0$ și $p \neq 0$ sistemul se poate redesena ca în Figura 3.11.

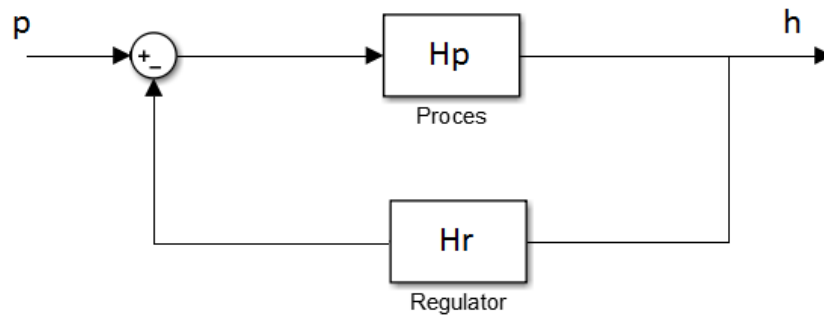


Figura 3.11 Buclă de reglare clasică, $h^*=0$ și $p \neq 0$

Funcția de transfer în buclă închisă se poate scrie:

$$H_{op} = \frac{H_p}{1 + H_p H_r} = \frac{\frac{k_p}{T_p s + 1}}{1 + \frac{1}{T_o s}} \quad (3.18)$$

$$H_{op} = \frac{k_p T_o s}{(T_p s + 1)(T_o s + 1)}$$

Ecuția (3.18) demonstrează faptul că răspunsul la perturbație pune în evidență două constante de timp: T_p și T_o . Chiar dacă T_o este impus ca fiind foarte mic, rămâne T_p care nu poate fi schimbat.

În regim staționar $t \rightarrow \infty$ și $s \rightarrow 0$, rezultând $H_{op} = 0$. Se anulează efectul perturbației, adică aceasta este rejectată cu un timp de răspuns aproximativ egal cu $4(T_p + T_o)$ considerând criteriul de stabilizare la 2% din amplitudinea perturbației.

În regim staționar efectul perturbației asupra ieșirii este dat de:

$$\Delta h = \Delta p \cdot \frac{k_{pp}}{k_{p1}} \cdot k_p = \frac{k_{pp} k_p}{k_{p1}} \cdot \Delta p \quad (3.19)$$

iar efectul unei trepte pe referință este:

$$\Delta h = \Delta h_0 \quad (3.20)$$

Când vizualizăm răspunsul la referință și perturbație pe același grafic suntem tentați să calculăm procente de 2% din Δh_0 , nu din Δp cum ar trebui. Din această cauză ne înșelăm și vom avea impresia că perturbația se rejectează mai rapid.

Răspunsul sistemului la o perturbație dată pe debitul de intrare în bazin de aproximativ $3 \text{ cm}^3/\text{s}$ la momentul $t = 250$ secunde poate fi văzut în Figura 3.12. Timpul de răspuns la perturbație este de aproximativ 800 secunde, iar timpul de răspuns la o treaptă pe referință este de 160 secunde.

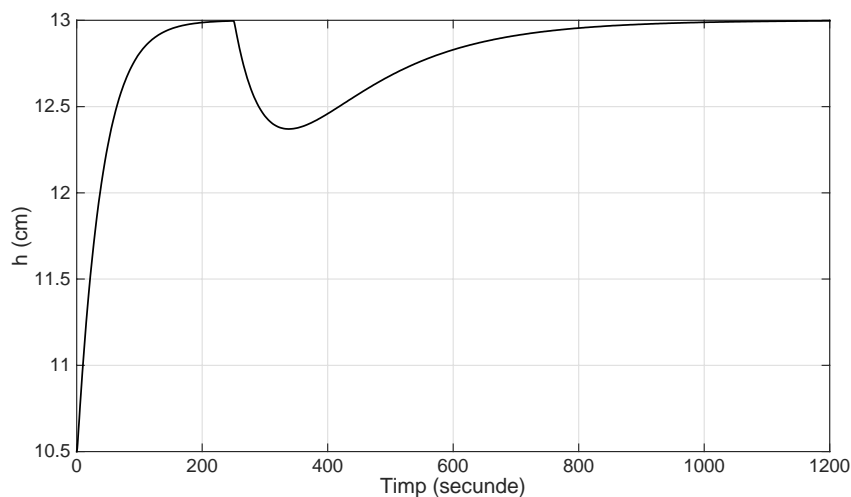


Figura 3.12 Răspunsul sistemului la perturbație pe debitul de intrare

Timpul de răspuns la perturbație poate fi obținut și analitic:

$$t_{rp} \cong 4(T_p + T_o) = 4(160 + 40) = 800 \text{ secunde} \quad (3.21)$$

Având în vedere constanta de timp a procesului $T_p=160s$ care este fixă, singurul mod de a îmbunătăți t_{rp} este prin alegerea unui timp de răspuns în buclă închisă foarte mic. Cel mai bun t_{rp} care poate fi obținut cu un regulator PI este $4 \cdot 160 = 640$ secunde, presupunând că alegem $T_o \rightarrow 0$, lucru imposibil de realizat în practică.

Pentru a putea obține un timp de răspuns mai bun la perturbație trebuie făcut un compromis între timpul de răspuns al sistemului și cel al perturbației. Efectul integrator trebuie păstrat neapărat pentru a avea abatere staționară nulă și avem două alternative:

- folosirea unui regulator PID în loc de PI
- regulator PI care să introducă suprareglaj

O alternativă de acordare a reguletoarelor ușor de utilizat este Frequency Response Tool.

3.1 Frequency Response Tool - introducere

Prescurtat FRTool, Frequency Response Tool este un toolbox pentru MatLAB cu o interfață grafică interactivă. Acordarea

regulatele se face grafic prin drag and drop, pe baza diagramei Nichols.

Diagrama Nichols este o diagramă frecvențială asemănătoare diagramei Bode. Aceasta afișează magnitudinea (în dB) reprezentată în funcție de fază (în grade) a răspunsului sistemului. Diagrama Nichols este utilă pentru analiza proprietăților în buclă deschisă și în buclă închisă ale procesului.

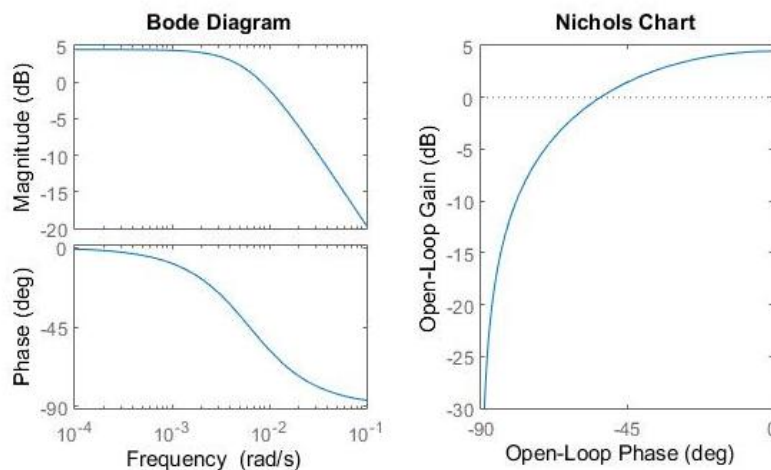


Figura 3.13 Diagramele Bode si Nichols pentru H_p

Răspunsul frecvențial al funcției de transfer al procesului H_p poate fi văzut în Figura 3.13.

O trăsătură importantă în activitatea de proiectare a regulatele este posibilitatea de a defini exact cerințele de proiectare. Aceste cerințe de proiectare trebuie convertite în specificații grafice pentru a facilita acordarea regulatorului. Restricțiile grafice sunt obținute din specificații numerice folosind relațiile matematice. Cele mai importante specificații sunt: robustețea, timpul de răspuns, suprareglajul maxim, marginea de câștig și marginea de fază.

Având în vedere suprareglajul maxim ca specificație de acordare, putem calcula factorul de amortizare ζ folosind relația:

$$OS = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.22)$$

Se impune valoarea maximă (M_r) a suprareglajului buclei închise în regim frecvențial, care va fi o curbă pe diagrama Nichols. După cum se poate vedea în Figura 3.14 prin creșterea valorii

suprareglajului (OS) de la 5% la 35%, curbele devin mai puțin restrictive (devin mai mici).

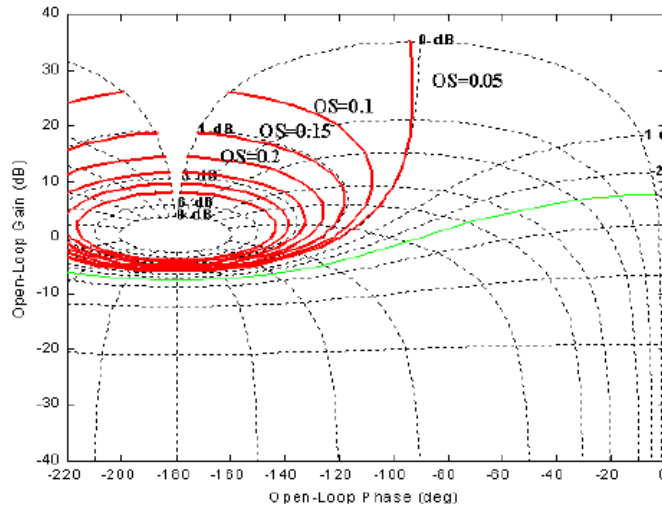


Figura 3.14 Reprezentarea suprareglajului pe diagrama Nichols

A doua cea mai importantă specificație este timpul de răspuns.

$$t_r = \frac{2\zeta^2 + 3}{\zeta\omega_n} \quad (3.23)$$

Știind timpul de răspuns și suprareglajul putem folosi relațiile (3.22) și (3.23) pentru a obține pulsația naturală ω_n a sistemului echivalent de ordinul II și factorul de amortizare ζ . Odata ce știm ζ și ω_n , valoarea de -3dB a benzii de trecere pentru sistemul în buclă închisă se obține cu relația (3.24). Acesta va fi folosit ca restricție grafică deoarece frecvența este parametrul de pe diagrama Nichols.

$$\Delta\omega_B = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{2 - 4\zeta^2 + 4\zeta^4}} \quad (3.24)$$

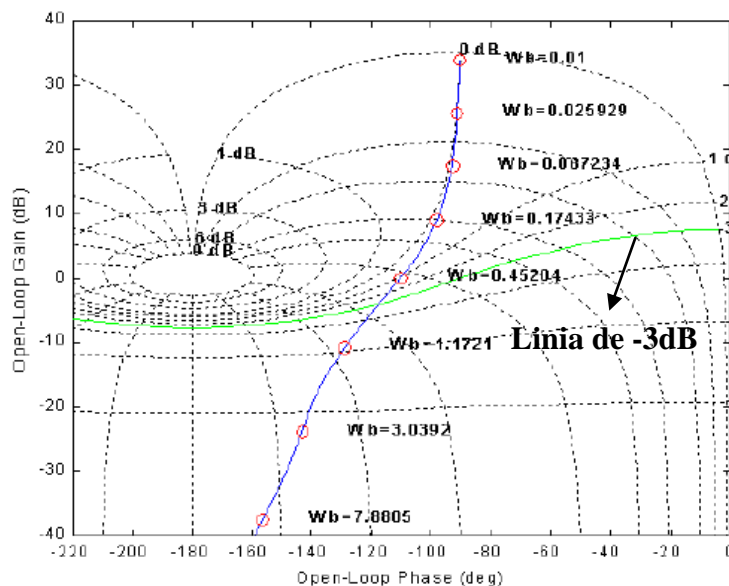


Figura 3.15 Reprezentarea benzii de trecere w_b pe diagrama Nichols

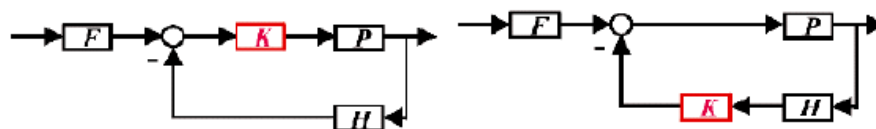
După cum se poate vedea în Figura 3.15, de-a lungul curbei Nichols sunt câteva cerculețe care corespund variației benzii de trecere w_b . Pentru a îndeplini specificația legată de timpul de răspuns, cercul corespunzător valorii lui w_b trebuie să fie sub linia care marchează -3dB.

Timpul de răspuns și suprareglajul sunt cele două specificații importante pentru reglarea nivelului.

3.2 Frequency Response Tool – tutorial

Primul pas este descărcarea și instalarea toolbox-ului. După descărcarea toolbox-ului și dezarhivarea acestuia pe hard disk, în fereastra Current Folder din Matlab se caută folderul în care se află toolbox-ul, se da click dreapta pe el, apoi **Add to Path** → **Selected Folders and Subfolders**.

Pentru a deschide fereastra principală trebuie rulată comanda *frtool* în consola din Matlab. Configurațiile buclelor de control sunt:



a) Vizualizarea

răspunsului la treapta

b) Vizualizarea

răspunsului la perturbație

Figura 3.16 Configurațiile buclelor de control

În configurațiile din Figura 3.16, K este regulatorul, iar P este procesul.

Din **File** → **Import** → **System** se alege funcția de transfer a procesului ca în Figura 3.17. Funcția de transfer a procesului trebuie să fie definită în workspace.

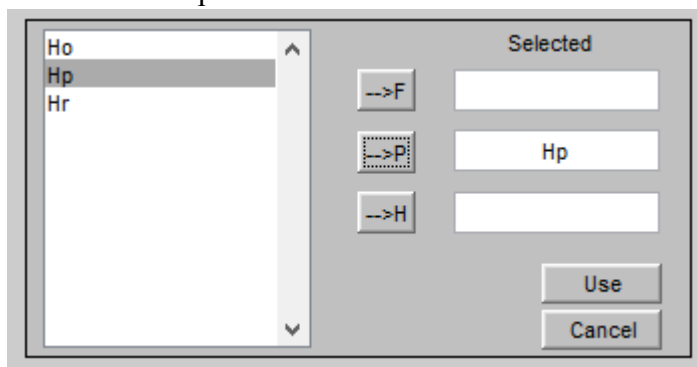


Figura 3.17 Importarea funcției de transfer a procesului

Dacă totul a fost executat corect, după apăsarea butonului *Use*, răspunsul frecvențial al procesului va apărea pe diagrama Nichols ca în Figura 3.18. Deocamdată pe diagrama Nichols apare răspunsul frecvențial al procesului pentru că nu au fost introduși parametrii regulatorului și în acest caz funcția de transfer a regulatorului este 1. În diagrama Nichols apare răspunsul frecvențial al funcției de transfer de pe calea directă adică $K \cdot P$.

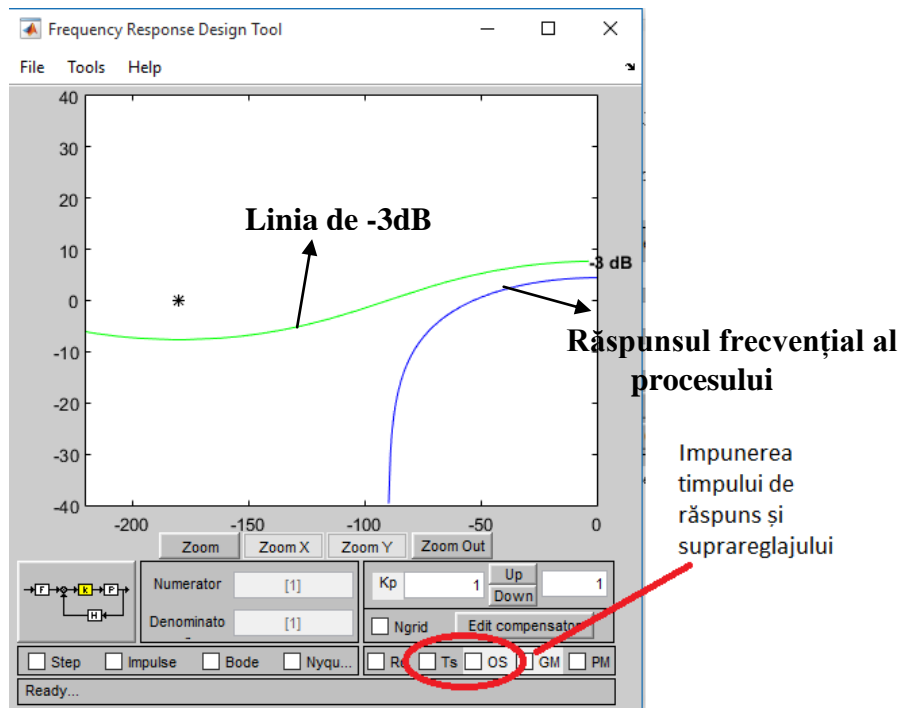


Figura 3.18 Răspunsul frecvențial al procesului pe diagrama Nichols în FRTTool

Următorul pas este impunerea specificațiilor de acordare a regulatorului: suprareglajul și timpul de răspuns. Prin validarea checkbox-ului din dreptul lui T_s (settling time – timp de răspuns) se alege valoarea pentru timpul de răspuns ca fiind 160 secunde, iar prin validarea checkbox-ului OS se alege suprareglajul ca fiind 0%.

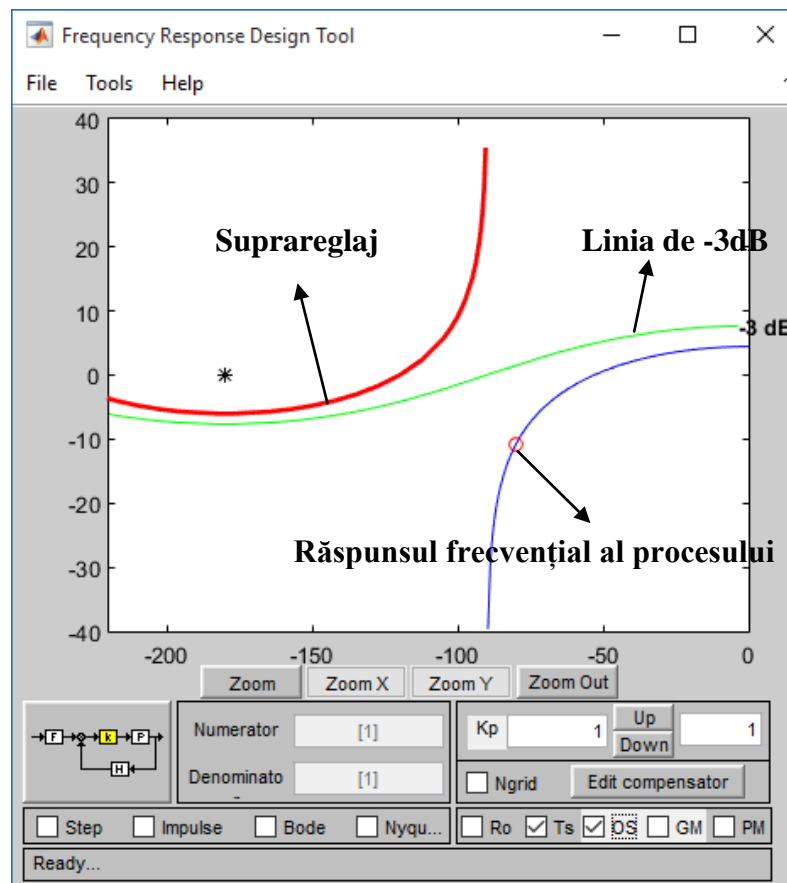


Figura 3.19 Vizualizarea grafică a cerințelor sistemului

Pentru ca timpul de răspuns să fie respectat, cercul roșu de pe răspunsul frecvențial al procesului trebuie să fie deasupra curbei de -3dB. Pentru a îndeplini cerința impusă de suprareglaj răspunsul frecvențial al procesului trebuie să fie în afara curbei de suprareglaj. Ambele cerințe trebuie îndeplinite simultan.

Acordarea regulatorului se face prin apăsarea butonului Edit Compensator. Sistemul trebuie să fie stabil, adică polii și zerourile inserate trebuie să fie în semiplanul stâng. Având în vedere că tipul regulatorului acordat este PI, trebuie inserat un pol (care e fixat în 0) și un zero. În cazul în care se optează pentru acordarea unui regulator PID se vor insera 2 zerouri.

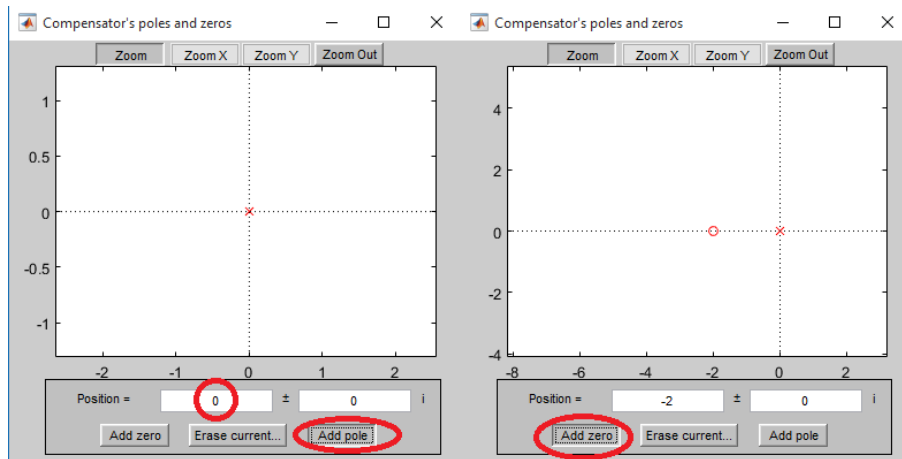


Figura 3.20 Inserarea polilor si zerourilor

Inserarea polului se face prin apăsarea butonului **Add Pole**, iar a unui zero prin apăsarea butonului **Add Zero**. Polul unui PI este fixat în 0, deci rămâne de modificat doar poziția zeroului. Acest lucru se face prin drag and drop în fereastra **Compensator's poles and zeros**. Dacă este necesar, se poate folosi funcția de mărire (**Zoom**).

Un alt parametru care trebuie acordat este factorul de proporționalitate al regulatorului. Acest lucru se poate realiza în două moduri:

- Prin butoanele Up and Down: în partea stângă se poate seta valoarea de plecare, iar în dreapta pasul cu care se face incrementarea/decrementarea.
- Prin drag and drop direct pe diagrama Nichols: se ține apăsat cu mouse-ul pe cerculețul roșu de pe răspunsul frecvențial și mișcarea sus-jos a mouse-ului.

Pentru a vizualiza grafic răspunsul la treapta atât al sistemului cât și al perturbației trebuie bifat checkbox-ul Step din partea stângă jos a ferestrei principale.

Configurația buclei de reglare (dacă avem referința ca intrare sau dacă avem perturbația) se selectează prin apăsarea pe imaginea configurației care arată ca schema prezentată în Figura 3.21.

Este indicat ca acordarea regulatorului și vizualizarea grafică a răspunsului să se facă simultan.

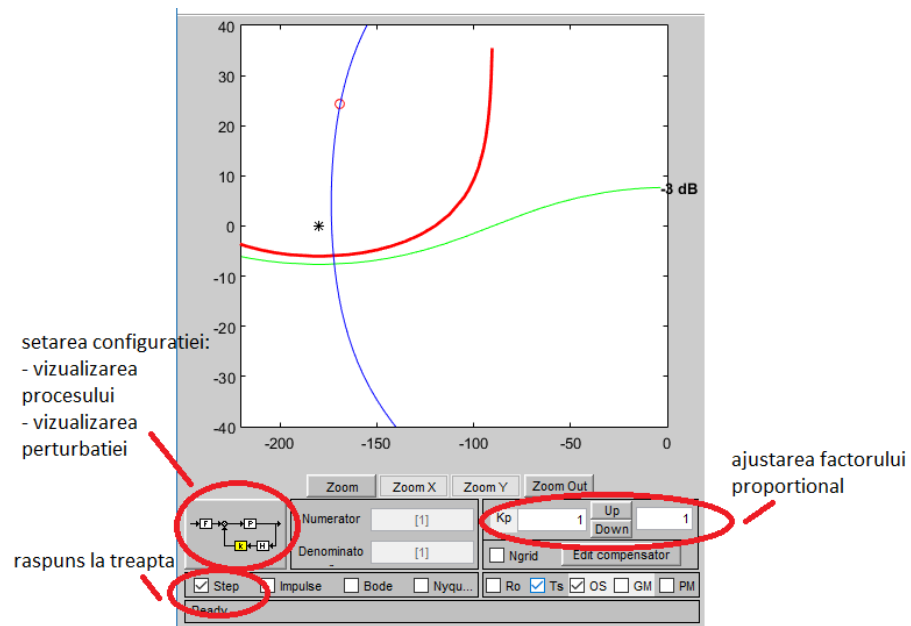


Figura 3.21 Acordarea vizuală a parametrilor

După cum arată răspunsul frecvențial al procesului în Figura 3.21, timpul de răspuns este respectat, dar suprareglajul nu este.

Scopul acordării regulatorului este ca răspunsul frecvențial să aibă cerculețul deasupra liniei de -3dB și să fie în afara curbei de suprareglaj. Se vor ajusta parametrii până când cerința va fi îndeplinită.

Pentru a asigura un răspuns bun atât la urmărirea referinței cât și la rejectarea perturbației ambele configurații trebuie analizate și respectate.

O posibilă soluție este regulatorul PI dat de ecuația:

$$H_{PI} = 16.208 \frac{(s + 0.040953)}{s} \quad (3.25)$$

Răspunsul la o referință treaptă cu regulatorul proiectat cu Frequency Response Tool este ilustrat în Figura 3.22, iar răspunsul la o perturbație treaptă dată pe intrare poate fi văzut în Figura 3.23. Sistemul are un timp de răspuns de 90 secunde și un răspuns la perturbație de 80 secunde. Timpul de răspuns al perturbației este mult îmbunătățit, dar este sacrificat suprareglajul.

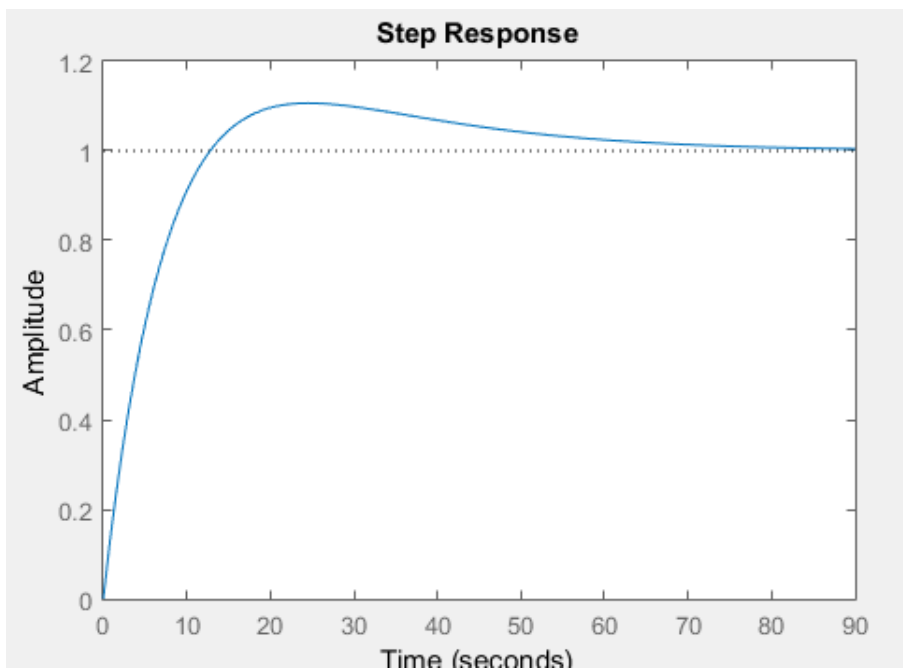


Figura 3.22 Răspunsul la referința de tip treaptă cu regulator proiectat în FRTool

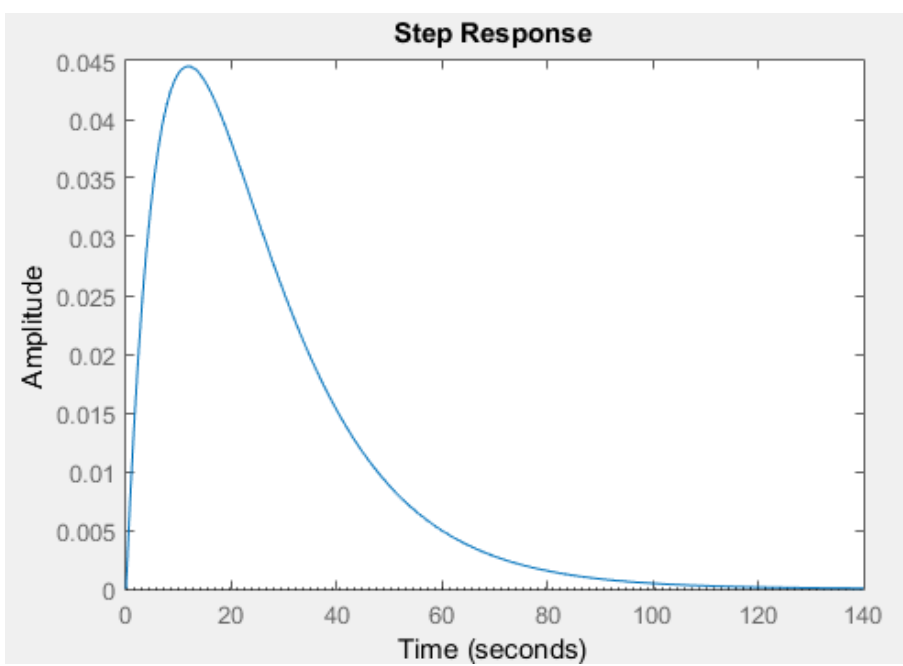


Figura 3.23 Răspunsul la perturbație treaptă pe intrare cu regulatorul proiectat cu FRTool

Rezultatele obținute prin implementarea în Simulink a regulatorului obținut sunt ilustrate în Figura 3.24 și în Figura 3.25. După cum se poate vedea, timpul de răspuns al perturbației este mult îmbunătățit, dar suprareglajul a crescut.

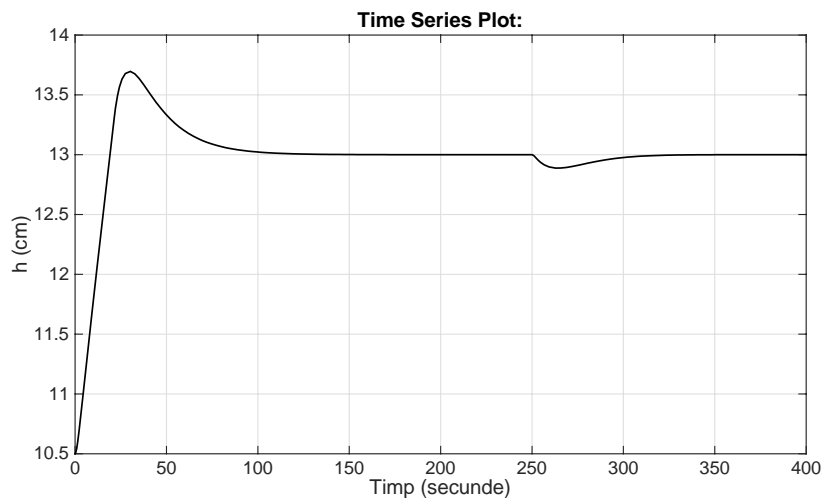


Figura 3.24 Răspunsul sistemului cu regulatorul obținut prin FRTool (Simulink)

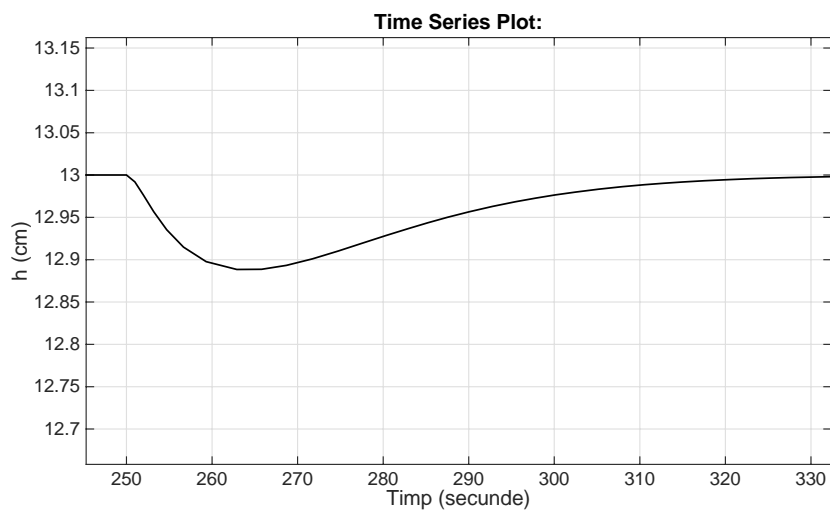


Figura 3.25 Rejectarea perturbației pe debitul de intrare

4. Structuri avansate de control automat

4.1 Structura de control cu reacție negativă și feedforward

Pentru a îmbunătăți performanțele sistemului de reglare automată la rejectarea unei perturbații apărute pe debitul de ieșire, q_e , se propune folosirea unei structuri avansate de control, de tipul feedforward, care poate să compenseze direct efectul acestei perturbații.

Introducerea perturbației pe debitul de ieșire se realizează conform cu Figura 4.1 .

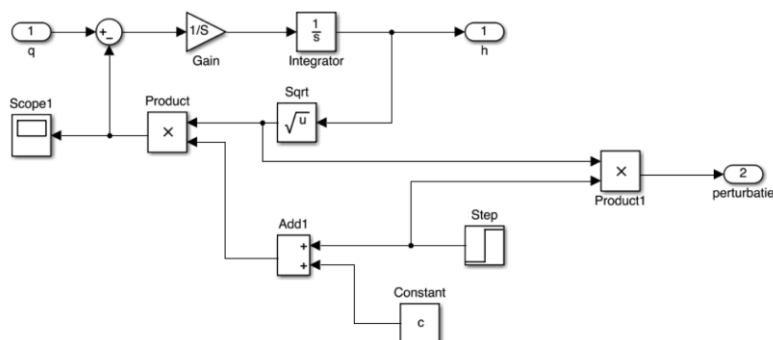


Figura 4.1 Introducerea perturbației pe debitul de ieșire.

Răspunsul sistemului cu regulator PI la o perturbație pe debitul de ieșire este prezentat în Figura 4.2.

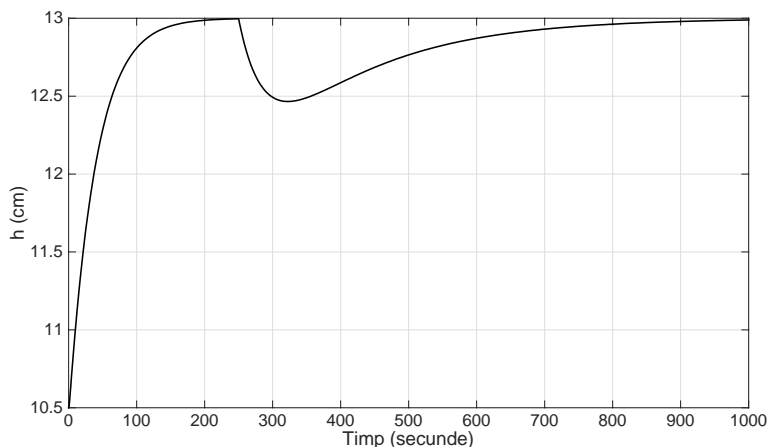


Figura 4.2 Răspunsul sistemului la perturbație pe debitul de ieșire

Această structură poate fi folosită presupunând că avem informații privind valoarea debitului de ieșire, pentru a cuantifica această perturbăție. Valoarea debitului de ieșire poate fi dată de un debitmetru cu inerție suficient de mică, deci cu o constantă de timp mică. Datorită acestui lucru, și a faptului că debitul de intrare și cel de ieșire au aceeași inerție în modificarea nivelului din rezervor este suficient doar un compensator static adică o constanta de amplificare. Valoarea acestei constante se poate calcula din relațiile de regim staționar având în vedere că debitul de ieșire (q_e) și cel de intrare (q_i) au același efect asupra nivelului dar cu semn schimbat. Deoarece efectul produs de perturbăție se însumează peste comanda dată de regulator, se poate determina valoarea cu care trebuie compensată perturbăția ca fiind raportul dintre amplificarea de la perturbăție la variația înălțimii din rezervor (k_{pFF}) și amplificarea de la intrarea u_c la variația înălțimii din rezervor (k_p).

$$k_{compensare} = \frac{k_{pFF}}{k_p} = \frac{\frac{\Delta h}{\Delta q_i}}{\frac{\Delta h}{\Delta u_c}} = \frac{\frac{13-10.5}{34.2-29.2}}{\frac{13-10.5}{5.5-5}} \quad (4.1)$$

$$= 0.1$$

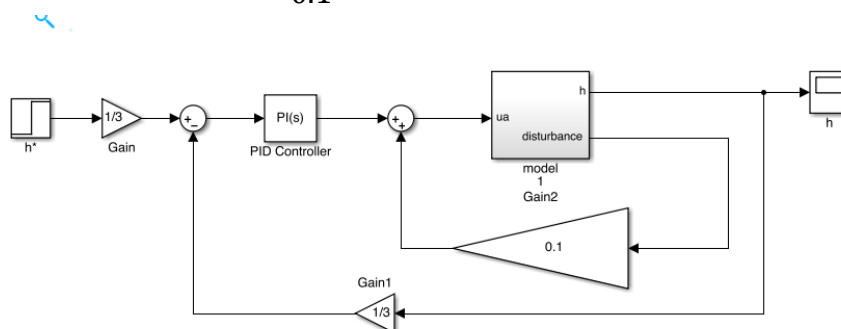


Figura 4.3 Schema bloc pentru sistemul de reglare PI cu structură de tip feed-forward.

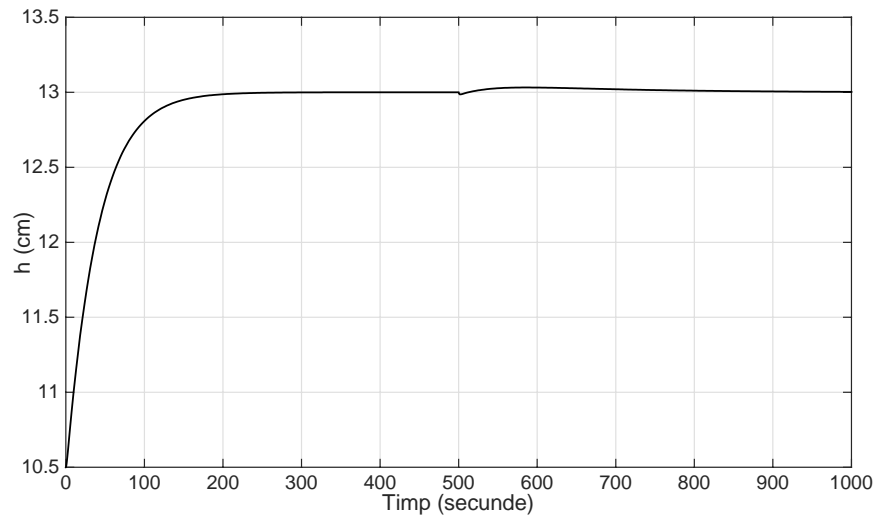


Figura 4.4 Evoluția în timp a nivelului pentru o perturbație pe debitul de ieșire, cu o structură de reglare automată de tip feed-forward

Un alt tip de perturbație care poate să apară în timpul funcționării sistemului, care are ca efect modificarea nivelului, h , la valori diferite decât cea stabilită ca referință, sunt perturbațiile datorate modificării debitului de intrare în rezervor, q_i , debit produs de pompă.

Acest tip de perturbații sunt produse ca efect al închiderii sau deschiderii robinetului montat pe conducta de intrare a lichidului în rezervor, situat după pompă. Simularea acestor perturbații se face prin modificarea coeficientului k din formula de calcul a debitului produs de pompă. Acest coeficient caracterizează rezistența la curgere a circuitului hidraulic (conducte, robinete, ramificații, coturi etc) dintre rezervorul de jos și cel de sus (respectiv între locul de aspirație și cel de refulare al pompei). Valoarea acestui coeficient se modifică odată cu închiderea sau deschiderea robinetului montat pe acest circuit.

Coeficientul k pe care aplicăm perturbația intră în formula de calcul a coeficienților k_{11} , k_{12} , k_{13} . Pentru aceasta se va schimba subsistemul Pompa pentru a putea să primească valoarea lui k ca și parametru extern ca și în Figura 3.9.

Din rezultatele obținute în urma simulării, se constată că, deși sistemul de reglare automată urmărește referința și anulează efectul

apariției unei perturbații pe debitul produs de pompă, anularea acestei perturbații se face foarte lent.

4.2 Structura de reglare în cascadă

Pentru a îmbunătăți performanțele sistemului de reglare automată la rejectarea unei perturbații apărute pe debitul de intrare, q_i , se propune folosirea unei structuri avansate de control, respectiv reglarea în cascadă.

În vederea stabilirii structurii și parametrilor sistemului de reglare, este necesară mai întâi determinarea parametrilor regulatorului buclei interne. Acest regulator are referința stabilită de ieșirea regulatorului buclei externe și comandă elementul de execuție, pompa și motorul de antrenare (prin blocul de amplificare). Regulatorul de pe bucla interioară are ca intrare pentru mărimea măsurată debitul produs de pompă. Pentru bucla internă, impunem ca abaterea staționară a debitului produs de pompă față de referința stabilită de regulatorul buclei externe să fie nulă, și ca procesul în buclă închisă să aibă o comportare specifică unui sistem de ordinul I, respectiv impunem timpul de răspuns în buclă închisă. Comportarea sistemului în buclă închisă va fi dată de:

$$H_o(s) = \frac{1}{T_o s + 1} \quad (4.2)$$

Pentru stabilirea parametrilor regulatorului buclei interne, trebuie să determinăm un model matematic pentru subsistemul ales, pentru variații mici ale comenzii în jurul punctului de funcționare. Pentru aceasta se va folosi modelul neliniar determinat și implementat în Simulink (Figura 4.5).

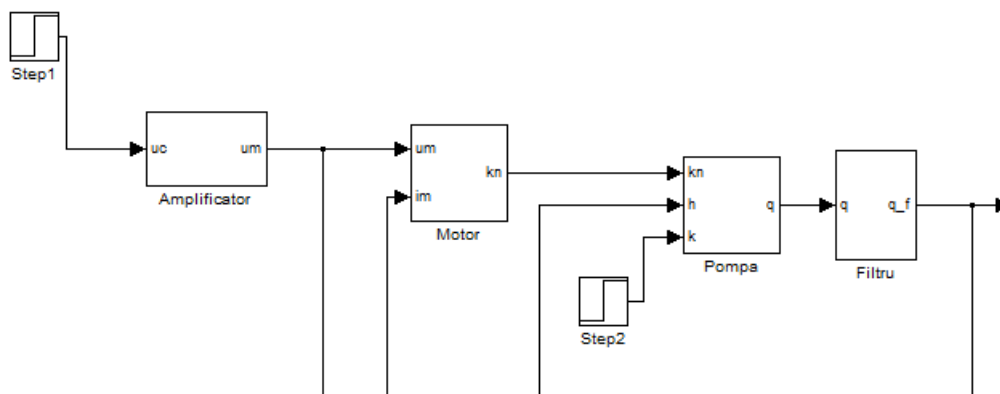


Figura 4.5 Determinarea unui model matematic pentru subsistemul reprezentat de elementul de execuție

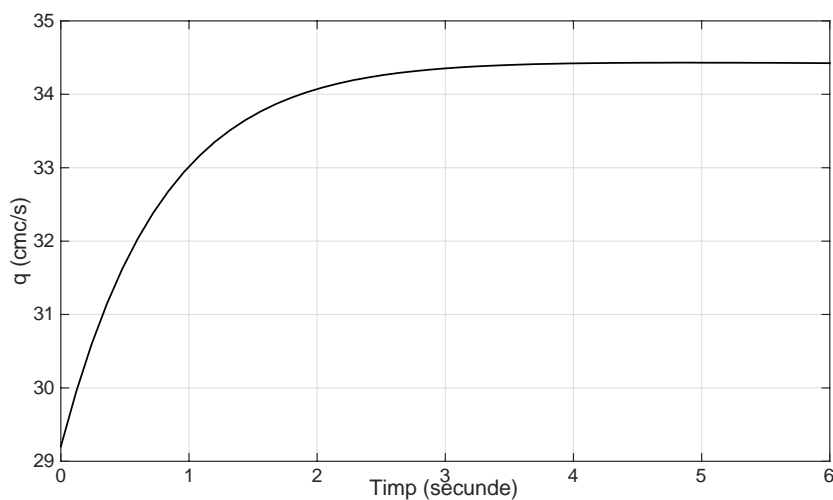


Figura 4.6 Evoluția în timp a debitului produs de pompă la o modificare de tip treaptă a intrării

Folosind rezultatele simulării, din răspunsul indicial constatând că evoluția debitului produs de pompă la modificarea de tip treaptă a intrării ($\Delta u = 0,5$), evoluează exponențial. Considerăm pentru subsistem o structură generală a unui sistem de ordinul I:

$$H_{p2}(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1} \quad (4.3)$$

Și pentru k_p obținem:

$$k_p = \frac{\Delta q}{\Delta u} = 10.2 \quad (4.4)$$

iar pentru constanta de timp se determină pe graficul din Figura 4.6 ca fiind intervalul după care valoarea lui q ajunge la $q_0 + 0.63 * \Delta q = 29.2 + 0.63 * 5.1 = 32.4$. Se obține astfel o valoare a constantei de timp de 0.73 sec.

Rezultă:

$$H_{P2}(s) = \frac{10.2}{0.7325 * s + 1} \quad (4.5)$$

Prin impunerea comportării în buclă închisă, respectiv a timpului de răspuns, $tr1=4$ [s]:

$$H_{O2}(s) = \frac{1}{T_o s + 1} \quad (4.6)$$

Respectiv:

$$T_o = \frac{t_r}{4} = 1 \text{ [s]} \quad (4.7)$$

Obținem:

$$H_{O2}(s) = \frac{1}{1s + 1} \quad (4.8)$$

Din relația:

$$H_{R2}(s) = \frac{1}{H_P(s)} \frac{H_o(s)}{1 - H_o(s)} \quad (4.9)$$

Obținem regulatorul de tip PI:

$$H_{R2}(s) = 0.07 \left(1 + \frac{1}{0.07s} \right) \quad (4.10)$$

Proiectarea regulatorului din bucla externă se poate face ținând cont de funcția de transfer a părții fixate pentru rezervor precum și de funcția de transfer pentru bucla internă, sistemul fiind în acest caz:

$$\begin{aligned} H_P(s) &= H_{P1}(s) \frac{H_{P2}(s)H_{R2}(s)}{H_{P2}(s)H_{R2}(s) + 1} \\ &= H_{P1}(s)H_{O2}(s) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Rezultatele vor fi însă nesatisfăcătoare datorită neliniarităților.

În vederea stabilirii structurii și parametrilor regulatorului, este necesară determinarea unui model matematic liniar cât mai exact pentru $H_P(s)$. Determinarea acestui model se va face experimental, considerând o modificare de tip treaptă a intrării. Întrucât ieșirea

regulatorului buclei externe reprezintă referința regulatorului buclei interne, care comandă elementul de execuție, intrarea în acest caz este reprezentată de debit, deci considerăm o modificare asupra debitului.

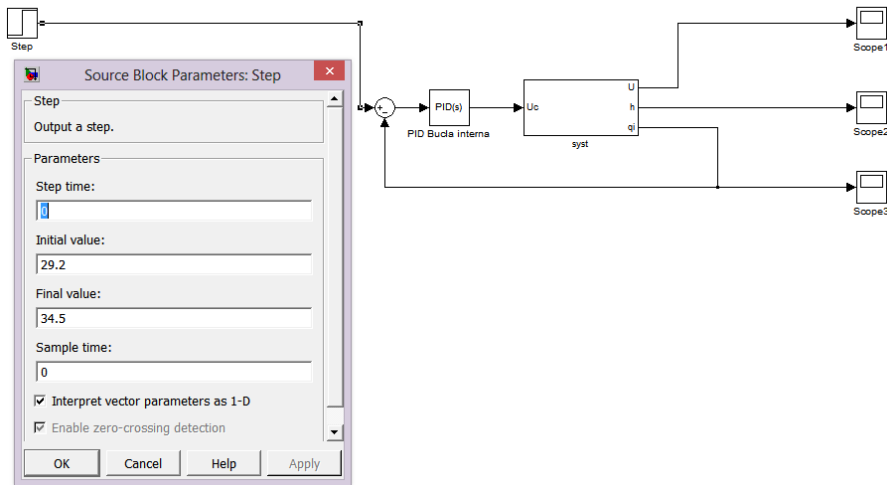


Figura 4.7 Determinarea unui model matematic pentru bucla externă

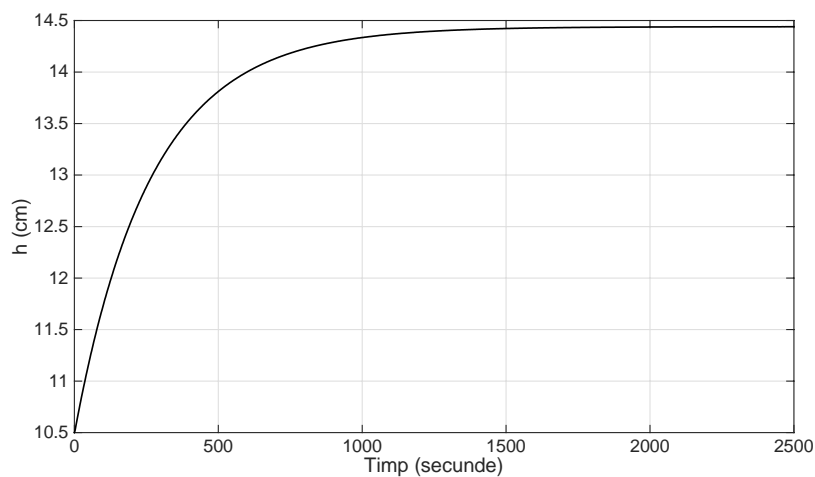


Figura 4.8 Determinarea unui model matematic pentru bucla externă, evoluția în timp a nivelului

Folosind rezultatele acestei simulări, din răspunsul indicial, constatând ca evoluția nivelului la modificarea de tip treaptă a intrării evoluează exponențial, considerăm pentru subsistem o structură generală a unui sistem de ordinul I:

$$H_p(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1} \quad (4.12)$$

Și obținem:

$$k_p = \frac{\frac{\Delta h}{3}}{\Delta q} = 0.26 \quad (4.13)$$

iar din grafic $T_p = 260$ [s],

Rezultă:

$$H_p(s) = \frac{0.26}{260s + 1} \quad (4.14)$$

Pentru bucla externă, impunem din nou ca abaterea staționară să fie nulă, și ca procesul în buclă închisă să aibă o comportare specifică unui sistem de ordinul I, respectiv impunem timpul de răspuns în buclă închisă, același ca în cazul sistemului de reglare cu un singur regulator de tip PI. Comportarea sistemului în buclă închisă va fi dată de:

$$H_o(s) = \frac{1}{T_o s + 1} \quad (4.15)$$

Prin impunerea comportării în buclă închisă, respectiv a timpului de răspuns, $t_r = 160$ [s]:

$$H_{o2}(s) = \frac{1}{T_o s + 1} \quad (4.16)$$

$$T_o = \frac{t_r}{4} = 40 \text{ [s]}$$

Obținem:

$$H_{o2}(s) = \frac{1}{40s + 1} \quad (4.17)$$

Din relația:

$$H_{R1}(s) = \frac{1}{H_p(s)} \frac{H_o(s)}{1 - H_o(s)} \quad (4.18)$$

Obținem regulatorul de tip PI:

$$H_{R1}(s) = 40 \left(1 + \frac{1}{250s} \right) \quad (4.19)$$

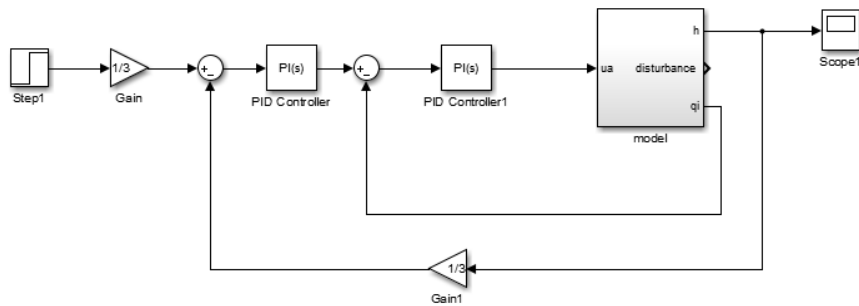


Figura 4.9 Schema bloc pentru reglarea în cascadă

Comportarea sistemului în buclă închisă folosind regulatorul PID în cascadă pentru un semnal de intrare de tip treaptă este prezentat în Figura 4.10. Se observă că timpul de răspuns al sistemului respectă timpul de răspuns impus în faza de proiectare și anume 160 s. La momentul $t = 300$ sec, apare o perturbație pe debitul de intrare q_i al sistemului, perturbație ce este rejectată imediat datorită regulatorului PID din bucla internă.

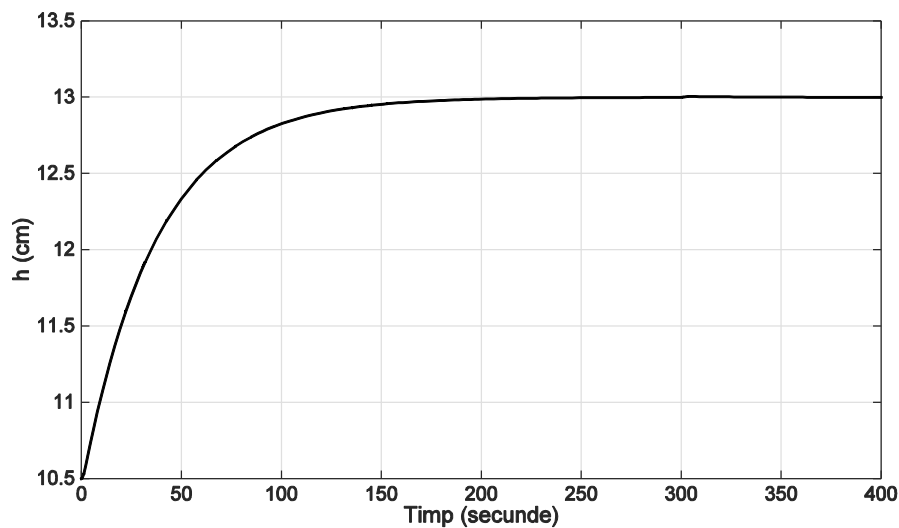


Figura 4.10 Evoluția nivelului în timp la apariția unei perturbații pe debitul de intrare

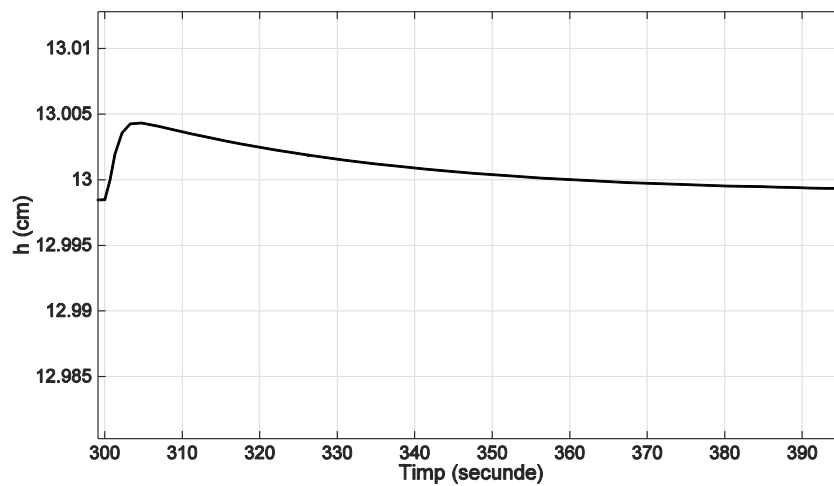


Figura 4.11 Evoluția nivelului în timp la apariția unei perturbații pe debitul de intrare - detaliat

4.3 Structură de reglare combinată: cascădă și feedforward

Dacă dorim ca sistemul de reglare automată să urmărească referința și să o mențină la valoarea de referință la ambele tipuri de perturbații care pot să apară, la schema anterioară de reglare în cascădă, se poate adăuga și structura de tip feed-forward pentru compensarea perturbațiilor apărute asupra debitului de ieșire din rezervor. În acest caz, având în vedere că regulatorul buclei interne are ca referință debitul, referință dată de regulatorul buclei externe, se poate compensa direct perturbația apărută asupra debitului de ieșire prin însumarea efectului produs de perturbație peste comanda dată de regulatorul buclei externe.

Întrucât:

$$S \frac{dh}{dt} = q_i - q_e \quad (4.20)$$

și având în vedere că dorim să menținem constant $h = \int \frac{1}{S} (q_i - q_e) dt$, rezultă ca trebuie ca $q_i = q_e$.

Așadar, pentru a menține nivelul în rezervor la o valoare constantă trebuie ca debitul de intrare să fie egal cu debitul de ieșire, și deci orice modificare apărută asupra debitului de ieșire să producă o modificare cu aceeași magnitudine asupra debitului de intrare. Considerând acestea, se poate însuma la referința primului regulator diferența dintre valoarea măsurată de debitmetrul amplasat pe conducta de ieșire din rezervor și debitmetrul amplasat după pompă, deci se poate face o compensare directă a perturbației fără a calcula amplificarea în regim staționar produsă de efectul unei perturbații.

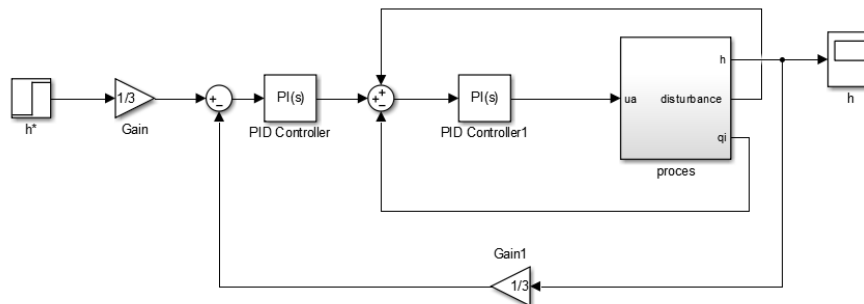


Figura 4.12 Schema bloc a sistemului de reglare în cascădă și cu structură de tip feed-forward

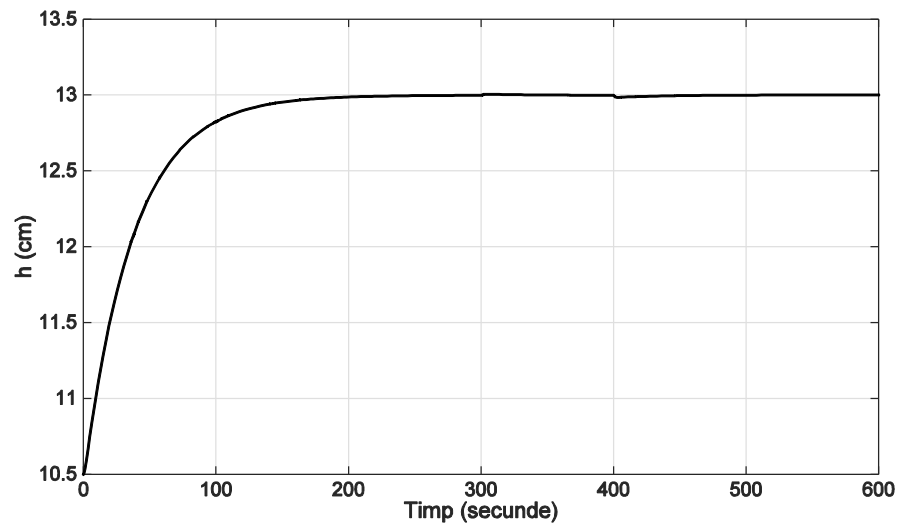


Figura 4.13 Evoluția în timp a nivelului la apariția unei perturbații pe debitul de intrare și ieșire

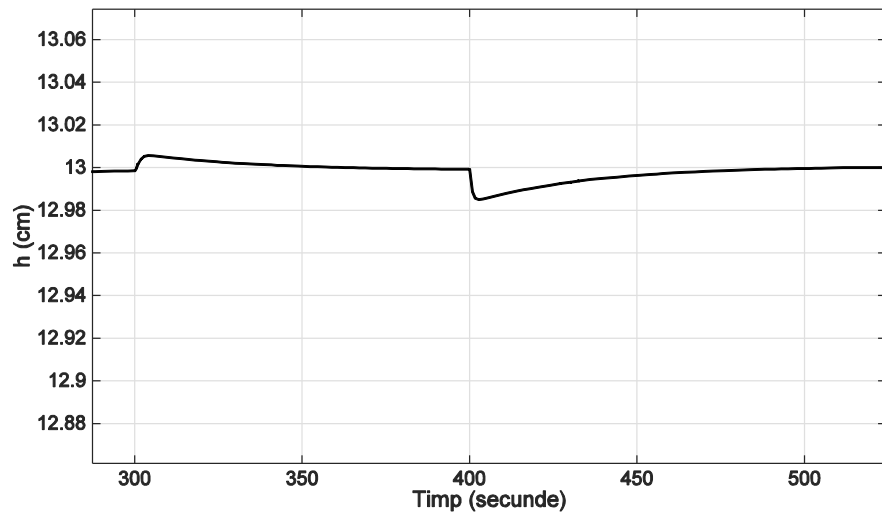


Figura 4.14 Evoluția în timp a nivelului la apariția unei perturbații pe debitul de intrare și ieșire (imagine detaliată)

Bibliografie

- [1] Petr Horacek, *Laboratory experiments for control theory courses: A survey*, Annual Reviews in Control, 2000, pp 151
- [2] Wellstead, P.E., Teaching control with laboratory scale models. *IEEE Transactions on Education*, vol. 33 (August), 1990, pp 285-290.
- [3] B. Wayne Bequette, *Process Control: Modeling, Design and Simulation*, 2002, Prentice Hall, ISBN: 0133536408
- [4] Jacek F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, CRC Press, 2009, ISBN: 9781420064407
- [5] Girdhar, Paresh Moniz, Octo, *Practical centrifugal pumps: design, operation and maintenance*, Newnes, Elsevier, 2005, ISBN 0 7506 6273 5
- [6] I. Naşcu, R. De Keyser, Ioana Naşcu, T. Buzdugan, Modeling and Simulation of a Level Control System, Proceedings of 2010 IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2010, May 28-30, Cluj-N, Romania, Vol.1, Pages:181-186, ISBN 978-1-4244-6722-8, IEEEXplore DOI: 10.1109/AQTR.2010.5520894
- [7] Festo Didactic GmbH & Co. Process Control System. *Compact Workstation Manual*