

1 Reglarea automată a nivelului

1.1 Cap1

1.2 Cap2

2 Reglarea automată a nivelului

2.1 Generalități

Nivelul unui lichid reprezintă cota suprafeței libere a lichidului dintr-o incintă, și reflectă volumul, masa unui lichid reținut în incinta respectivă. Nivelul se măsoară în unități de lungime. Valoarea lui este indicată în raport cu un nivel de referință.

Procese în care mărimea reglată este nivelul se desfășoară în incinte închise sau deschise, pe care le vom numi în continuare rezervoare. Acestea pot fi de secțiune constantă sau variabilă și sunt implicate conducte de legătură și robinete. Un rezervor deschis este un proces cu autoreglare având o comportare specifică unui element de întârziere de ordinul I. Atunci când scurgerea unui rezervor deschis, aflat la presiunea atmosferică se face în altul aflat tot la presiunea atmosferică, debitul de ieșire depinde direct de nivelul lichidului din vas. În cazul rezervoarelor închise, în mod obișnuit, debitul de ieșire nu depinde de nivelul lichidului. Rezervorul închis în care se reglează nivelul devine un element integrator, fiind un proces fără autoreglare. Ipoteza independenței debitului de ieșire de nivelul lichidului este asigurată fie prin prezența unei pompe care extrage lichidul din vasul închis la debit constant, fie prin acțiunea unei presiuni importante deasupra lichidului din rezervor.

Reglarea nivelului este una din reglările fundamentale în aplicațiile industriale, cazurile posibile fiind:

- instalația tehnologică poate funcționa corespunzător numai în cazul asigurării unui stoc constant de lichid într-un rezervor. Nivelul este parametrul efectiv controlat în cursul desfășurării procesului și trebuie menținut la o valoare constantă – reglare de stabilizare. Ca exemple pot fi enumerate: nivelul apei în tamburul unui cazan de abur, nivelul lichidului într-un separator de fază din care aspiră un compresor, nivelul de lichid în baza unei coloane de fracționare etc.

- pentru asigurarea funcționării instalației tehnologice apare necesitatea modificării nivelului lichidului. De exemplu: condensatoarele, la care suprafața activă a lichidului este modificată în funcție de sarcina de vapori, prin modificarea nivelului lichidului într-un rezervor cu secțiunea transversală variabilă.

- în scopul asigurării unui debit constant la intrarea unei instalații tehnologice chiar în situația în care acest debit rezultă la ieșirea unei instalații tehnologice din amonte variază în limite foarte largi. În acest caz, între cele două instalații tehnologice se intercalează un vas tampon în care se reglează nivelul. În cazul rezervoarelor deschise, cu ieșire prin curgere liberă, menținerea constantă a nivelului în rezervor va asigura un debit constant la ieșire, astfel încât debitul de ieșire din vasul tampon va fi constant.

2.2 Modelarea procesului.

De obicei, în reglarea nivelului unui lichid se presupune lichidul incompresibil. În situația în care rezervorul este închis și cuprinde în același timp vapori și lichid, compresibilitatea și volumul vaporilor influențează asupra reglării. În cazul în care fluidele sunt transportate cu viteze și presiuni ridicate, este necesar să se țină seama de compresibilitatea fluidului, de deformarea rezervoarelor și a conductelor și de efectele de inerție care se opun variațiilor debitului.

Determinarea modelului matematic al procesului se poate obține pe baza bilanțului de material. În ecuația de bilanț material intervin debitul de intrare și debitul de ieșire. În stabilirea relațiilor pentru exprimarea acestor mărimi se va presupune că toate conductele sunt pline cu lichid și că accelerațiile sunt mici, încât se pot neglija efectele de inerție care apar la variații de debit.

Nivelul lichidului într-un rezervor și debitele prin el nu sunt variabile independente. Înălțimea lichidului și condițiile de suprapresiune sau depresiune atrag variații de debit în ce privește intrarea și ieșirea fluidului. Variațiile de debit au ca efect variația nivelului în rezervoarele deschise, respectiv a nivelului și presiunii în rezervoarele închise. În consecință, reglarea nivelului unui lichid exclude reglarea simultană de debit și invers.

Curgerea lichidelor prin conductele de legătură poate fi de două feluri:

- turbulentă dacă numărul lui Reynolds este mai mare de 4000;
- laminară dacă acest număr este mai mic de 2300.

Domeniul care corespunde curgerilor cu număr Reynolds între 2300 și 4000 este considerat de tranziție.

În primul caz, care se întâlnește obișnuit în practică, debitul de lichid care trece printr-o conductă sau o strângere este dat de următoarea relație:

$$q = K \cdot S \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = K \cdot S \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad , \quad (2.1)$$

în care:

$\Delta h = h_1 - h_2$, cu h_1, h_2 – înălțimile coloanelor de lichid echivalente cu presiunile lichidului la intrarea și ieșirea din conductă sau strângere;

q – este debitul volumetric al lichidului;

K – un coeficient adimensional de curgere;

g – accelerația gravitațională;

S – secțiunea conductei;

Rezistența la curgere a unei conducte (sau a unei strângeri) se calculează astfel:

$$R = \frac{d(\Delta h)}{dq} = \frac{2(h_1 - h_2)}{q} \quad , \quad \left[\frac{s}{m^2} \right] \quad (2.2)$$

Această rezistență nu este constantă, depinzând de căderea de presiune echivalentă cu h_1-h_2 , precum și de debitul q și de obicei se determină experimental, trasând curba căderii de presiune în funcție de debit, pentru o anumită strângulare și măsurând apoi panta acestei curbe în punctul de funcționare ales. Această valoare se poate considera constantă numai pentru abateri mici ale funcționării procesului față de punctul normal de funcționare stabilit.

În cazul curgerii laminare, rar întâlnită însă în practică, debitul q este proporțional cu căderea de presiune h_1-h_2 și deci rezistența la curgere R este constantă.

Se observă că pentru un orificiu realizat la baza unui rezervor cu suprafață liberă și cota lichidului $h = \text{ct.}$ care debușează în atmosferă, debitul Q nu depinde de densitatea lichidului:

$$q = K \cdot S \sqrt{2g \cdot h} \quad (2.3)$$

Coeficientul de curgere K are următoarea structură $K = \varphi_v \cdot \varphi_c$. Coeficientul de viteză, $\varphi_v = 1/\sqrt{\alpha + \zeta} \cong 1/\sqrt{1 + \zeta}$ este dat de coeficientul Coriolis α și coeficientul pierderii locale de sarcină ζ . $\varphi_c = S_c / S$ este coeficientul de contracție al secțiunii de curgere, cu S_c secțiunea contractată a jetului de lichid la ieșirea din orificiu.

În reglările de nivel se întâlnesc diferite configurații de rezervoare și conducte de intrare și ieșire. Sunt prezentate în continuare cazurile cele mai frecvente întâlnite în practică.

2.2.1 Modelul procesului în cazul unui rezervor deschis cu evacuare gravitațională

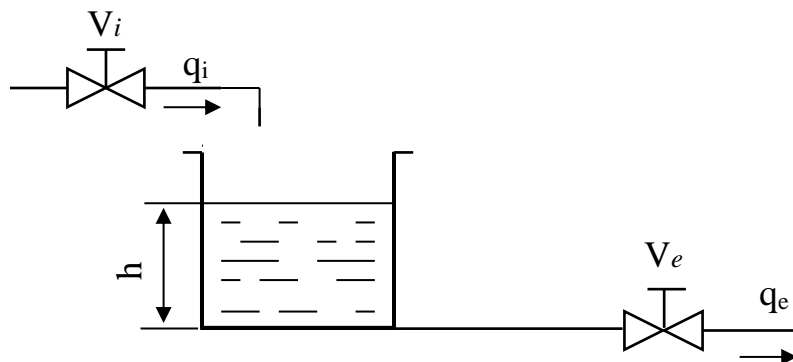


Figura 2.1 Rezervor deschis cu evacuare gravitațională.

Într-un rezervor, având secțiunea constantă A , intră un lichid cu un debit volumic q_i curgând liber, adică conducta de intrare nu intră în lichidul din rezervor. Din rezervor lichidul curge cu un debit volumic q_e . Determinarea modelului matematic și a funcției de transfer se poate obține pe baza bilanțului de material (bilanț masic sau echilibru masic). Ecuația generală a bilanțului de material este expresia legii conservării materiei și poate fi exprimată astfel: cantitatea de material care intră în sistem trebuie să fie regăsită la ieșirea din sistem sau să se acumuleze în sistem.

$$\begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{intrata} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{iesita} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{acumulata} \end{bmatrix}$$

Termenii ecuației reprezintă cantități sau debite, exprimate prin masă sau debitul masic. Diferența:

$$\begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{acumulata} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{intrata} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{iesita} \end{bmatrix}$$

poartă denumirea de acumulare. Pentru procesele continue, în regim staționar, acumularea este nulă astfel că se obține:

$$\begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{intrata} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{cantitatea} \\ \text{iesita} \end{bmatrix}$$

Pentru rezervorul deschis din *Figura 2.1* se poate scrie

$$\frac{dm}{dt} = Q_i - Q_e,$$

unde

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot h \cdot A, \quad Q_i = \rho \cdot q_i, \quad Q_e = \rho \cdot q_e$$

Rezultă în final:

$$\frac{A \cdot dh}{dt} = q_i - q_e \quad (2.4)$$

m reprezintă masa lichidului din rezervor, V - volumul lichidului, Q_i și Q_e - debitele masice de intrare și respectiv ieșire iar ρ - densitatea lichidului.

Relația exprimă creșterea volumului de lichid în rezervor ca fiind egală cu diferența între cantitatea de lichid intrată și aceea ieșită din rezervor în intervalul de timp dt considerat. Din această relație se poate concluziona că viteza de variație a înălțimii unui lichid într-un rezervor este proporțională cu diferența debitelor de intrare și ieșire și invers proporțională cu suprafața rezervorului.

Debitul de ieșire q_e se obține printr-un robinet 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 de intrare - q_i , sau debitul de ieșire - q_e , după cerințele procesului și caracteristicile utilajului.

În rezervoarele deschise și cu ieșire finală la presiunea atmosferică, lichidul curge sub acțiunea greutății proprii, fără să mai existe o altă presiune care să îl influențeze.

Se consideră pentru început cazul în care nu avem robinet pe conducta de ieșire (secțiunea conducerii de ieșire rămâne constantă). În acest caz, pentru curgerea turbulentă relația (2.3) se poate scrie sub forma:

$$q_e = C\sqrt{h}, \quad (2.5)$$

unde C este un coeficient care depinde de dimensiunile conductei de curgere, eventual ale strângării în cazul când există robinetul V_e , și de caracteristicile lichidului din rezervor ($C = K \cdot S \sqrt{2g}$).

În acest caz, ecuația (2.4) se poate scrie sub forma:

$$A \frac{dh}{dt} + q_e = q_i \quad (2.6)$$

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

Presupunând că atât debitul de intrare q_i cât și nivelul h nu variază mult în jurul unor valori de funcționare în regim staționar q_i^0 și h^0 , situație în care $q_i^0 = q_e^0$ și coeficientul C se poate considera constant, se poate liniariza ecuația (2.6) introducând variabilele Δq_i , Δh și Δq_e conform cu relațiile: $q_i = q_i^0 + \Delta q_i$, $h = h^0 + \Delta h$, $q_e = q_e^0 + \Delta q_e$. Pentru variațiile Δq_e și Δh se presupune că au loc după tangenta la curba :

$$q_e = C\sqrt{h}$$

în punctul (q_e^0, h^0) , adică:

$$\Delta q_e = \frac{C}{2\sqrt{h^0}} \cdot \Delta h \quad (2.7)$$

La aceeași relație pentru Δq_e se ajunge și dacă se liniarizează funcția $q_e = C\sqrt{h}$ în jurul punctului de funcționare caracterizat de valorile de regim staționar q_i^0 și h^0 . Dacă se dezvoltă $q_e(h)$ în serie Taylor în jurul lui h^0 și din dezvoltare se rețin primii termeni rezultă:

$$q_e(h) \approx q_e(h_0) + \left. \frac{\partial q_e(h)}{\partial h} \right|_{h=h_0} \cdot \Delta h = q_e^0 + \frac{C}{2\sqrt{h^0}} \cdot \Delta h$$

Revenind la relația (2.6), se obține o ecuație diferențială liniară de ordinul întâi:

$$\begin{aligned} A \frac{d(h_0 + \Delta h)}{dt} + q_e^0 + \Delta q_e &= q_i^0 + \Delta q_i \\ A \frac{d(h_0 + \Delta h)}{dt} + q_e^0 + \frac{C}{2\sqrt{h^0}} \cdot \Delta h &= q_i^0 + \Delta q_i \end{aligned}$$

Deoarece în regim staționar $q_i^0 = q_e^0$ și $d(h^0)=0$, rezultă:

$$T \cdot \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = k \cdot \Delta q_i \quad (2.8)$$

unde T reprezintă constanta de timp a procesului și k_0 factorul de amplificarea al procesului și au valorile:

87942523

$$T = \frac{2A\sqrt{h^0}}{C}, \quad k = \frac{2\sqrt{h^0}}{C} \quad (2.9)$$

Soluția acestei ecuații pentru o mărime de intrare constantă Δq_i^0 aplicată la timpul $t=0$ este:

$$\Delta h(t) = k \cdot \Delta q_i^0 (1 - e^{-t/T}) \quad (2.10)$$

Curba de variație a nivelului într-un rezervor deschis plecând din condițiile inițiale $h=h^0$, $q_i=q_i^0$, pentru o modificare Δq_i^0 a debitului de intrare la $t=0$ este prezentată în *Figura 2.2*.

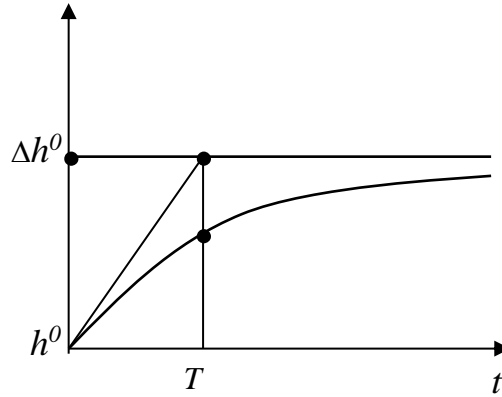


Figura 2.2 Curba de variație a nivelului într-un rezervor deschis

Din ecuația (2.8), aplicând transformata Laplace, se obține cu ușurință funcția de transfer a procesului, considerând ca intrare variația debitului de intrare în rezervor Δq_i iar ca ieșire variația nivelului din rezervor Δh :

$$H(s) = \frac{\mathcal{L}(\Delta h)}{\mathcal{L}(\Delta q_i)} = \frac{k}{Ts + 1} \quad (2.11)$$

Constanta de timp T a procesului este proporțională cu suprafața A a rezervorului, depinde de înălțimea h_0 în jurul căreia are loc variația nivelului reglat și de coeficientul C care caracterizează curgerea în conducta de ieșire.

Întrucât constanta de timp T se modifică în funcție de înălțimea coloanei de lichid - h^0 , sistemul de reglare va trebui să aibă în vedere această dependență dacă procesul poate să se desfășoare pentru diferite mărimi de referință ale nivelului în rezervor. Dacă nivelul variază cu 20-40% în jurul unei valori h^0 , cum se întâmplă cel mai frecvent în practică, o valoare stabilită pentru T corespunzătoare lui h^0 , va putea fi păstrată chiar dacă valoarea prescrisă pentru nivel se va modifica în limitele indicate mai sus. Pe de altă parte T crește cu secțiunea A a rezervorului și scade cu creșterea lui C .

Analizând formula pentru calculul constantei de timp T se poate observa că:

$$T = \frac{2A\sqrt{h^0}}{C} = \frac{2A \cdot h^0}{C \cdot \sqrt{h^0}} = \frac{2A \cdot h^0}{q_e^0} = \frac{2V_0}{q_e^0} \quad (2.12)$$

și deci măsurând debitul de ieșire q_e^0 și h^0 se poate determina cu ușurință T . Pentru un rezervor care se golește la presiunea atmosferică, constanta de timp T este egală cu de două ori timpul de golire al volumului V_0 cu debitul q_e^0 .

Daca se consideră acum cazul în care avem un robinet pe conducta de ieșire (secțiunea echivalentă a conductei de ieșire - S se va modifica prin actionarea robinetului de ieșire), relația (2.3) se poate scrie sub forma :

$$q_e = c \cdot S \cdot \sqrt{h} \quad (2.13)$$

unde c este un coeficient care depinde de caracteristicile lichidului din rezervor ($c = K\sqrt{2g}$).

Pentru liniarizarea unei relații neliniare de forma $F(x_1, x_2, \dots)$ în condițiile unor variații mici în jurul punctului staționar de funcționare se poate utiliza relația:

$$\Delta F = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \right)_0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \right)_0 \Delta x_2 + \dots$$

în care $(\cdot)_0$ reprezintă condițiile inițiale, constante, caracteristice punctului staționar de funcționare considerat, iar $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots$ etc reprezintă variațiile variabilelor considerate.

Pentru liniarizarea relației debitului de evacuare, rezultă:

$$q_e = q_e^0 + \left(\frac{\partial q_e}{\partial S} \right)_{h=h^0} \Delta S + \left(\frac{\partial q_e}{\partial h} \right)_{S=S^0} \Delta h$$

sau

$$\Delta q_e = q_e - q_e^0 = c\sqrt{h^0} \cdot \Delta S + \frac{cS^0}{2\sqrt{h^0}} \Delta h$$

Din relația (2.13) pentru h^0 și S^0 se obține $c \cdot \sqrt{h^0} = \frac{q_e^0}{S^0}$, rezultând apoi:

$$\Delta q_e = \frac{q_e^0}{S^0} \cdot \Delta S + \frac{q_e^0}{2h^0} \Delta h \quad (2.14)$$

În aceste condiții din (2.6), trecând la variațiile variabilelor, rezultă:

$$A \cdot \frac{d(\Delta h)}{dt} + \frac{q_e^0}{S^0} \cdot \Delta S + \frac{q_e^0}{2h^0} \Delta h = \Delta q_i$$

sau

$$\frac{2Ah^0}{q_e^0} \frac{d(\Delta h)}{dt} + \Delta h = \frac{2h^0}{q_e^0} \Delta q_i - \frac{2h^0}{S^0} \Delta S$$

Aplicând transformata Laplace în condiții inițiale nule ($\Delta h(0) = 0$) și considerând $\mathcal{L}\{\Delta h(t)\} = Y(s)$, $\mathcal{L}\{\Delta q_i(t)\} = U_1(s)$ respectiv $\mathcal{L}\{\Delta S(t)\} = U_2(s)$ se obține ecuația:

$$(1 + Ts) \cdot Y(s) = K_q \cdot U_1 + K_s \cdot U_2 \quad (2.15)$$

căreia îi corespunde schema bloc:

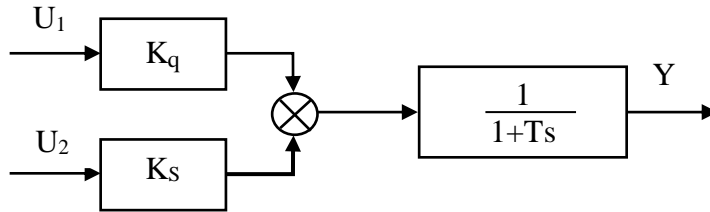


Figura 2.3 Schema funcțională corespunzătoare modelului liniarizat

unde: - constanta de timp a procesului:

$$T = \frac{2Ah^0}{q_e^0} = \frac{2A}{cS^0} \sqrt{h^0} \quad (2.16)$$

- coeficienții de transfer pe cele două căi:

$$K_q = \frac{2h^0}{q_e^0}, \quad K_s = \frac{2h^0}{S^0} \quad (2.17)$$

Constanta de timp a procesului depinde de valoarea de regim staționar a nivelului de lichid, h^0 și de debitul de evacuare, q_e^0 . Aceleași considerații sunt valabile și pentru coeficienții de transfer. Ca atare, odată cu schimbarea regimului staționar se modifică și parametrii modelului procesului și deci vor trebui modificați și parametrii regulatorului de la un regim la altul.

Modelul liniarizat al procesului este necesar pentru acordarea regulatorului atunci când se folosesc metode de acordare bazate pe model. În simularea comportării dinamice a procesului, pentru a obține o cât mai buna concordanță cu comportarea procesului real este necesară utilizarea unui model cât mai exact. Pentru a obține un astfel de model se pleacă din nou de la relațiile (2.4) și (2.5), care se vor scrie de această dată sub forma:

$$q_i - q_e = A \frac{dh}{dt}$$

$$q_e = c \cdot S \cdot \sqrt{h}$$

În acest caz schema bloc a rezervorului de lichid devine:

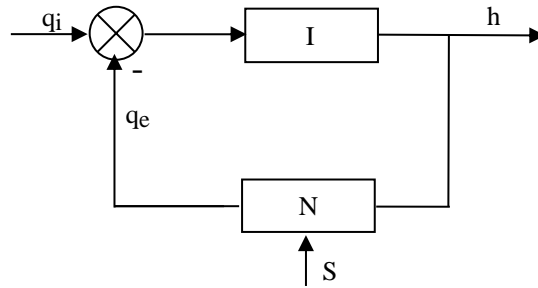


Figura 2.4 Schema bloc a modelului nelinial al rezervorului

Se poate observa că în schema bloc apare un integrator pe calea directă, iar pe reacție un bloc nelinial – N, a cărui ieșire este dată de relația (2.13). Modificarea nivelului se poate realiza prin modificarea debitului de alimentare q_i cât și a debitului de evacuare q_e . Debitul de evacuare se poate modifica acționând asupra robinetului V_e (prin modificarea secțiunii de trecere a robinetului de evacuare - S).

2.2.2 Modelul procesului în cazul unui rezervor deschis și evacuare cu pompă la debit constant

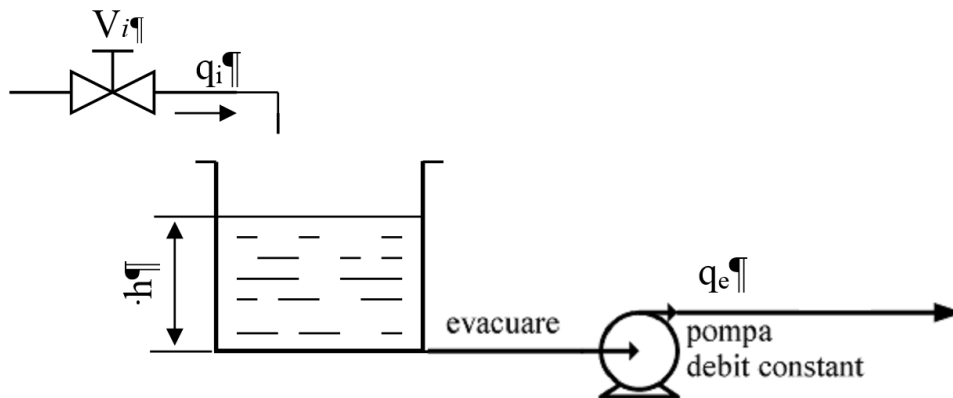


Figura 2.5 Rezervor deschis și evacuare cu pompă la debit constant.

Se consideră un rezervor, având secțiunea constantă A, în care intră lichid cu un debit volumic q_i , curgând liber, iar din rezervor lichidul este evacuat printr-o pompă cu un debit volumic constant q_e . În aceste condiții $\Delta q_e = 0$. Ecuația bilanțului de material se poate scrie sub forma:

$$A \frac{d(h_0 + \Delta h)}{dt} + q_e^0 = q_i^0 + \Delta q_i$$

Dacă se pleacă din regim staționar caracterizat de nivelul h^0 și $q_i^0 = q_e^0$ rezultă:

$$\frac{d\Delta h}{dt} = k_i \cdot \Delta q_i, \quad \text{cu } k_i = \frac{1}{A}$$

Aplicând transformata Laplace, se obține funcția de transfer a procesului de tip integrator:

$$H(s) = \frac{\mathcal{L}(\Delta h)}{\mathcal{L}(\Delta q_i)} = \frac{k_i}{s}. \quad (2.18)$$

Dacă se calculează răspunsul procesului la un semnal de tip treaptă de amplitudine Δq_i , în domeniul timp, se poate scrie:

$$\Delta h(t) = \frac{\Delta q_i}{A} \cdot t$$

adică nivelul crește proporțional cu timpul începând de la valoarea h^0 . Un asemenea proces este un proces fără autoreglare, având un caracter integrator.

2.2.3 Modelul procesului în cazul a două rezervoare deschise conectate în serie sau cascadă

Asemenea cazuri sunt rareori întâlnite în practică. Astfel de proceee sunt întâlnite în special în componența unor standuri didactice pentru că analiza unor astfel de procese permite evidențierea cu ușurință a unor caracteristici comune proceselor cu mai multe constante de timp.

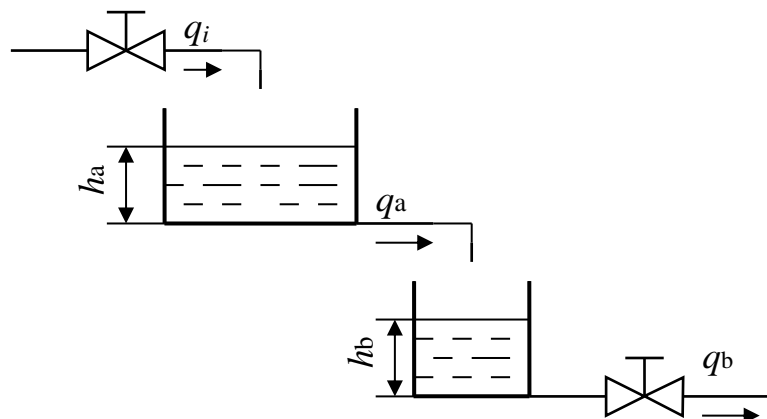


Figura 2.6 Reglarea nivelului într-un proces cu două rezervoare în cascadă

Se consideră pentru început cazul în care cele două rezervoare sunt conectate în cascadă, cum este prezentat și în Figura 2.6. Reglarea nivelului se face în rezervorul al doilea, mărimea de execuție fiind debitul de intrare în primul rezervor. Se poate observa cu ușurință că în acest caz cele două procese parțiale, primul și respectiv cel de-al doilea rezervor, nu interacționează. Funcția de tranfer echivalentă a procesului care înglobează cele două rezervoare se obține înmulțind funcțiile de transfer ale rezervoarelor componente, rezultând o funcție de tranfer echivalentă de ordinul II, cu două constante de timp egale cu cele ale rezervoarelor.

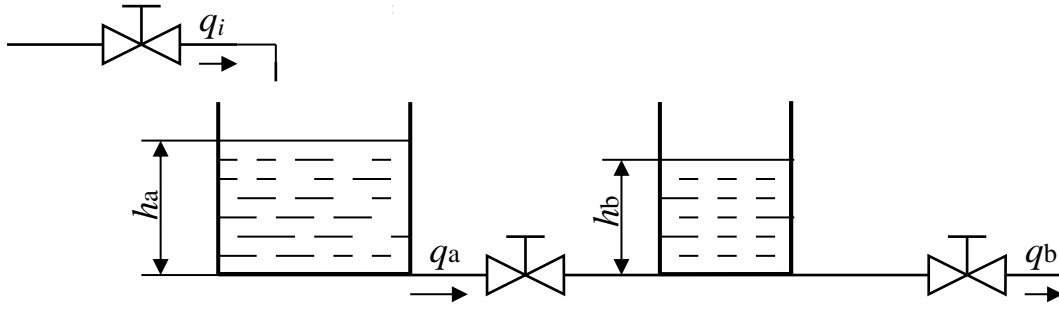


Figura 2.7 Reglarea nivelului într-un proces cu două rezervoare în serie

Situația nu mai este la fel de simplă în cazul în care cele două rezervoare sunt legate în serie, cum este prezentat și în Figura 2.7. Reglarea nivelului se face tot în rezervorul al doilea, mărimea de execuție fiind debitul de intrare în primul rezervor.

Pentru a simplifica descrierea analitică a procesului se va considera curgerea ca fiind laminară, adică debitele proporționale cu căderea de presiune și rezistențele la curgere constante. În felul acesta ecuațiile care descriu desfășurarea procesului sunt:

$$\begin{aligned} S_a \cdot dh_a &= (q_i - q_a)dt \\ S_b \cdot dh_b &= (q_a - q_b)dt \\ q_a &= \frac{h_a - h_b}{R_a} \quad ; \quad q_b = \frac{h_b}{R_b} \end{aligned} \quad (2.19)$$

în care:

h_a, h_b – reprezintă înălțimile lichidului în cele două rezervoare;

S_a, S_b – secțiunea rezervoarelor presupusă constantă;

$q_i, q_a, q_e = q_b$ – debite volumice de lichid;

R_a, R_b – rezistența la curgere, presupusă laminară, între cele două rezervoare, respectiv la ieșirea din al doilea rezervor.

Ieșirea din rezervorul al doilea are loc la presiunea atmosferică. Pentru a se stabili relația între h_b , parametrul reglat și q_i , mărimea de intrare în proces, se va elimina din relațiile de mai sus h_a, q_a și q_b și se obține:

$$T_a T_b \cdot \frac{d^2 h_b}{dt^2} + (T_a + T_b + S_a R_b) \cdot \frac{dh_b}{dt} + h_b = R_b \cdot q_i \quad (2.20)$$

în care:

$T_a = R_a S_a$ - constanta de timp caracteristică primului rezervor;

$T_b = R_b S_b$ - constanta de timp caracteristică rezervorului al doilea.

Dacă se notează rădăcinile ecuației coresunzătoare termenului stâng al relației (2.20) cu α_1 și α_2 se constată că aceste rădăcini sunt reale și negative și deci constantele de timp caracteristice acestui proces sunt: $T_1 = -1/\alpha_1$ și $T_2 = -1/\alpha_2$. Constantele de timp T_1 și T_2 ale procesului format din ansamblul celor două rezervoare legate în serie diferă de constantele de timp individuale T_a și T_b ale fiecărui rezervor luat în parte.

Dacă rezervoarele sunt legate în cascadă atunci termenul $S_a R_b$ din ecuația (2.20) nu mai apare și constantele de timp ale procesului format din cele două rezervoare legate în cascadă vor fi T_a și T_b , adică egale cu constantele de timp ale celor două rezervoare luate separat.

Din cele două cazuri analizate mai sus rezultă o concluzie pe care se bazează calculele practice în stabilirea caracteristicilor proceselor în vederea controlului nautomat al acestora. Dacă un proces este constituit din mai multe procese parțiale și dacă mărimea de ieșire dintr-un proces parțial (q_a în exemplul de mai înainte) nu este influențată de procesul parțial următor, atunci constantele de timp ale procesului total sunt chiar constantele de timp ale proceselor parțiale (adică în cazul precedent T_a și T_b). Deseori în practică se consideră că un proces complex se poate împărți în procese parțiale simple, conectate în serie chiar dacă mărimea de ieșire a unui proces parțial este influențată de prezența procesului parțial următor, dacă s-a constatat experimental că această influență este mică.

Pentru un proces de ordinul II, caracterizat prin două constante de timp, timpul necesar ca mărimea de ieșire, după aplicarea la intrarea procesului a unui salt treaptă, să ajungă la 63,2% din valoarea finală nu are o semnificație deosebită cum este cazul proceselor de ordinul I caracterizate printr-o singură constantă de timp. De obicei, pentru procese cu mai multe constante de timp, în special dacă aceste constante de timp sunt datorate inerției traductoarelor sau elementelor de execuție, se poate considera că sunt caracterizate de o singură constantă de timp și anume egală cu timpul în care răspunsul procesului, la o modificare treaptă a mărimii de intrare, ajunge la 63,2% din valoarea finală.

2.3 Sisteme pentru reglarea automată a nivelului.

În cazul multor procese tehnologice este necesară utilizarea unor sisteme de control automat a nivelului de lichid fie pentru asigurarea unei închideri hidraulice fie pentru stoc constant de lichid în rezervoarele tehnologice. Uneori este necesară reglarea automată a suprafeței de separație dintre două lichide nemiscibile din recipientul tehnologic. Termenul de proces tehnologic este utilizat având sensul de operații care se realizează pentru a se trata cu un anumit scop materia sau energia.

În figura 1.6 este prezentată o modalitate de control manual a nivelului într-un rezervor. Operatorul uman trebuie să aibă un scop sau un obiectiv; în mod normal, aceasta ar fi să nivelul lichidului din rezervor la o anumită valoare impusă. Apoi, el trebuie să obțină informații despre nivelul lichidului, pe care îl poate determina vizual. Bazându-se pe aceste informații, operatorul

trebuie să determine sau să calculeze acțiunea necesară menținerii nivelului la valoarea dorită. În cele din urmă, șoferul trebuie să schimbe poziția robinetului de ieșire cu valoarea calculată pentru a produce corecția necesară asupra nivelului de lichid din rezervor. Prin efectuarea continuă a acestor trei funcții, operatorul poate menține nivelul lichidului din rezervor foarte aproape de valoarea de referință, chiar dacă apar unele perturbații, cum ar fi modificarea debitului la intrare sau modificări ale presiunii în amonte. Toate aceste funcții pot fi realizate în mod automat de către un sistem de reglare automată. În figura 1.7 este prezentată o imagine a dulapului de comandă pentru reglarea nivelului într-un rezervor.

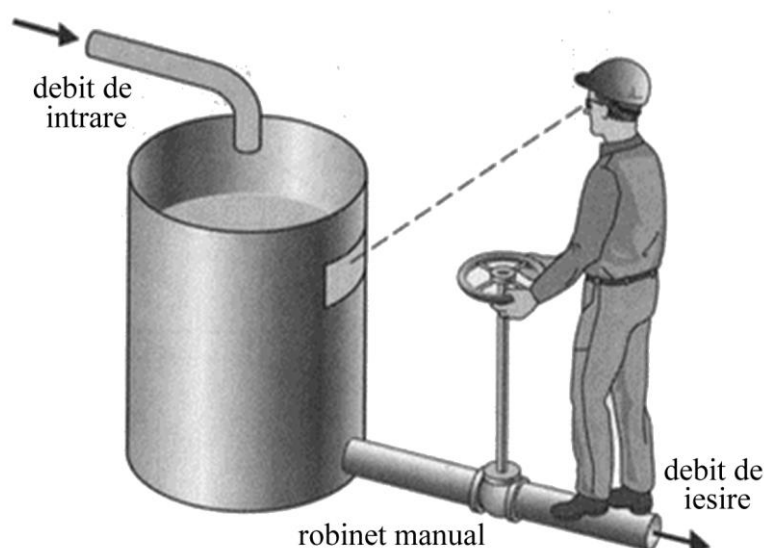


Figura 2.8 Reglarea manuală a nivelului într-un rezervor



Figura 2.9 Dulap de comandă pentru reglarea automată a nivelului într-un rezervor

Sistemele de reglare a nivelului pot fi grupate în două categorii:

- sisteme în care nivelul reprezintă parametrul principal al procesului tehnologic și în care destinația sistemului de reglare constă în stabilirea unui nivel dat în instalație, de obicei constant, indiferent de sarcină.
- sisteme în care parametrul principal nu este nivelul lichidului din recipient și unde nu este necesară reglarea precisă a nivelului, reglarea acestuia fiind astfel realizată încât să se încadreze între două limite prestabilite.

În vederea stabilirii structurii și parametrilor sistemului de reglare, este necesară determinarea caracteristicilor dinamice ale instalației tehnologice. Modelul matematic al instalației poate fi determinat pe două căi:

- în cazuri simple se poate determina modelul matematic și se pot calcula analitic coeficienții funcției de transfer;
- în cazuri mai complicate are loc stabilirea pe cale analitică a structurii modelului urmând ca determinarea coeficienților să se facă experimental.

2.3.1 Tipuri de sisteme de reglare a nivelului.

În funcție de destinația instalației tehnologice, pot exista mai multe situații în reglarea nivelului :

a) evacuarea lichidului din rezervor se face prin cădere liberă, instalația comportându-se ca un element aperiodic de ordinul întâi. Se acționează asupra debitului de intrare în funcție de nivelul lichidului în rezervor - reglare în amonte.

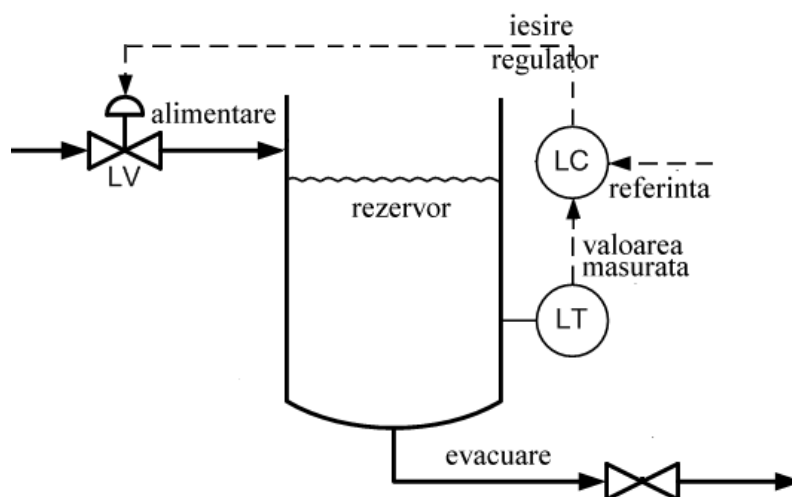


Figura 2.10 Reglare în amonte cu evacuare prin cădere liberă

b) evacuarea lichidului din rezervor se face prin cădere liberă. Mărimea manipulată este debitul de ieșire, a cărui valoare se modifică în funcție de nivelul lichidului în rezervor - reglare în aval.

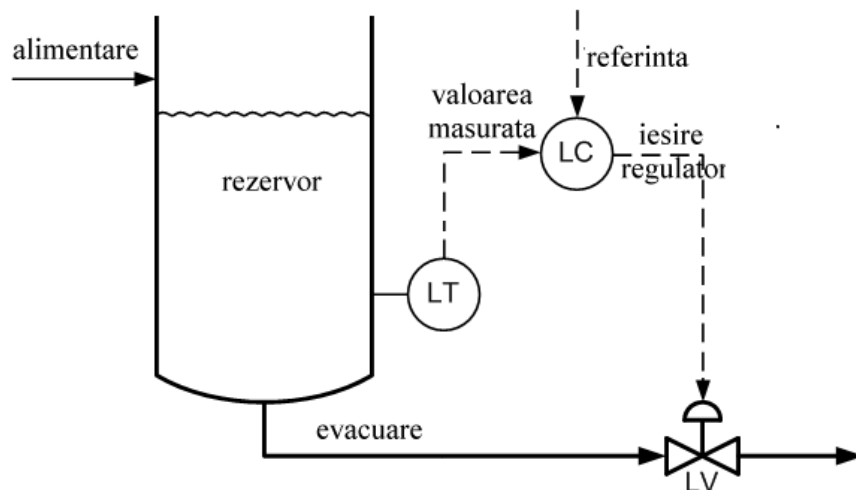


Figura 2.11 Reglare în aval cu evacuare prin cădere liberă

c) evacuarea lichidului din vas se face cu o pompă de debit constant și în acest caz instalația se comportă ca un element integrator. Se acționează asupra debitului de intrare în funcție de nivelul lichidului în rezervor - reglare în amonte.

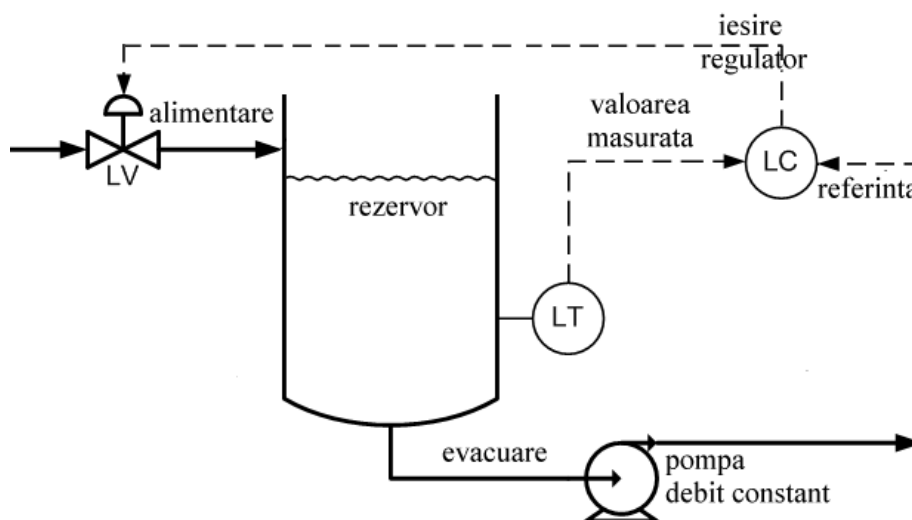


Figura 2.12 Reglare în amonte cu evacuare prin pompă

d) evacuarea lichidului din vas se face cu o pompă de debit constant. Se acționează asupra debitului de ieșire în funcție de nivelul lichidului în rezervor - reglare în aval.

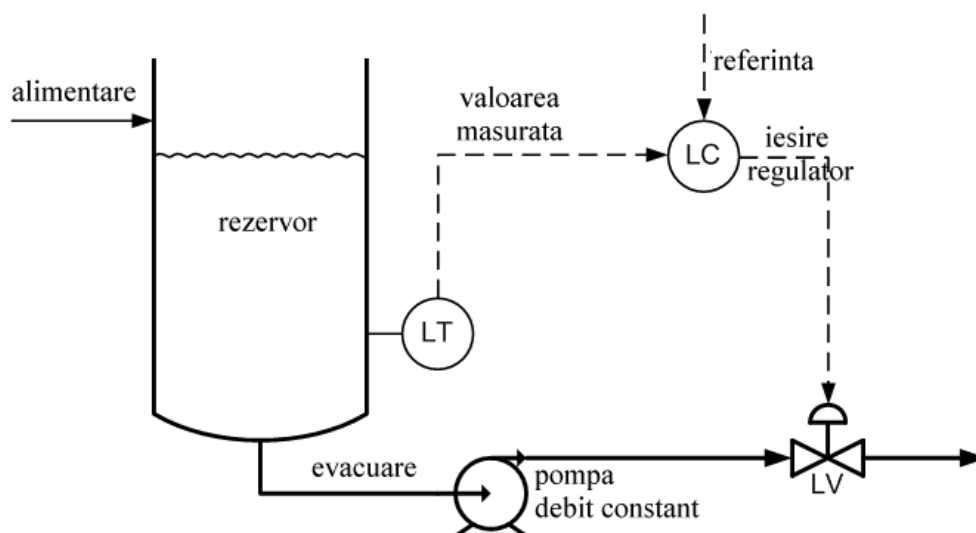


Figura 2.13 Reglare în aval cu evacuare prin pompă

În cazul unor astfel de procese, uneori se impune ca abaterea staționară să fie nulă, caz în care se impune o lege de reglare PI. Deoarece în majoritatea cazurilor se admite ca nivelul în rezervoare să se încadreze între anumite limite, un regulator de tip P este de obicei suficient. Oricum, pentru primele două cazuri de mai sus, modelul procesului se caracterizează printr-o constantă de timp relativ mare (minute în cazul unor rezervoare mici, zeci de minute pentru rezervoare de secțiune mare), în comparație cu cele ale traductoarelor sau elementelor de execuție, comportamentul dinamic al părții fixate fiind echivalent cu al unui sistem de ordinul I. Datorită acestui fapt nu va fi necesară o reglare de tip PI, fiind suficientă una de tip P, cu valori mari ale factorului de proporționalitate, fără a exista pericolul intrării în instabilitate. Pentru ultimele două cazuri, procesul are un caracter integrator, un regulator de tip P fiind suficient. Dacă limitele de reglare sunt mari, se poate utiliza o reglare bipozițională.

Dacă rezervorul este sub presiune, performanțele de control pot fi afectate negativ de variațiile de presiune. În acest caz se poate utiliza o reglare în cascadă, cu un regulator de nivel LC și un regulator de debit FC, pe bucla internă, pentru stabilizarea valorii debitului la valorile date de comanda regulatorului de nivel. Un asemenea tip de reglare în cascadă este util și în cazul unei reglări în aval, în care evacuarea lichidului din rezervor se realizează în prezența unor variații ale presiunii statice pe consumator sau în cazul utilizării unui servorobinet cu caracteristică neliniară.

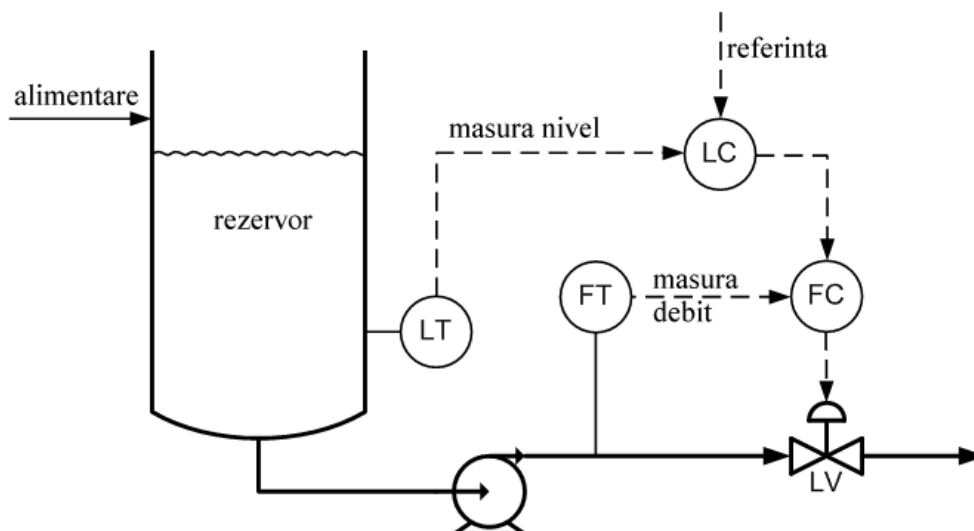


Figura 2.14 Reglare în aval în cascadă cu evacuare prin pompă

Structura de reglare în cascadă poate fi folosită atât în scemele de reglare în aval cât și în amonte. Utilizarea acestei structuri conduce la o îmbunătățire a performanțelor de reglare, asigură o rejectare rapidă a perturbațiilor datorate modificărilor arbitrare ale debitului controlat, cu prețul unui efort financiar suplimentar datorat costului traductorului de debit și regulatorului din bucla secundară.

Măsurarea nivelului poate deveni în multe cazuri o problemă complicată și trebuie tratată cu precauție în special în cazul lichidelor aflate în amestec, agitate cu agitatoare sau aflate în fierbere. În aceste cazuri se recomandă măsurarea nivelului în tuburi de liniștire montate în interiorul rezervorului. Chiar și în aceste cazuri mărimea nivelului este afectată de zgomote semnificative, ce pot ajunge să afecteze semnificativ precizia măsurării. Dacă un asemenea semnal zgomotos este prelucrat într-un regulator de tip P, eventual setat cu o valoare mare a factorului de proporționalitate (din dorința de creștere a preciziei de reglare așa cum s-a arătat mai sus), rezultatul acțiunii regulatorului va fi o comandă bipozițională a ventilului de reglare de la o extremă la alta, continuu, adică în final uzura sa prematură și nedorită. În aceste situații se va utiliza obligatoriu o lege de reglare de tip PI. Aceasta va determina o netezire a zgomotului de măsură și va permite utilizarea unor valori mai mici pentru factorul de amplificare.

2.3.2 Proiectarea sistemelor pentru reglarea automată a nivelului

Deși există numeroase surse bibliografice în care sunt prezentate metode empirice pentru alegerea și acordarea reglatoarelor în sistemele de reglare a nivelului, un inginer automatist ar trebui să folosească metode mai riguroase de sinteză a sistemului și analiza performanțelor. În continuare vor fi discutate câteva variante posibile.

În cazul în care evacuarea lichidului din rezervor se face prin cădere liberă, procesul se comportă ca un element aperiodic de ordinul întâi, motiv pentru care se numește proces cu

autoreglare. În subcapitolul anterior, pentru acest tip de proces a fost determinat un model liniar sub forma unei funcții de transfer de ordinul I:

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

Traductoarele de nivel au inerție foarte mică, constanta de timp a acestora se poate neglija și rămâne astfel o funcție de transfer echivalentă a părții fixate care include doar constanta de timp a procesului și a elementului de execuție :

$$H_f(s) = \frac{k_f}{(T_p s + 1)(T_E s + 1)} \quad (2.21)$$

cu $k_f = k_p k_E k_T$, k_E —amplificarea elementului de execuție, k_T — amplificarea traductorului și T_E constanta de timp a elementului de execuție.

În Tertisco M., Popescu D., Jora B., Russ I., *Automatizari industriale continue*, E.D.P., Bucuresti, 1991, este prezentată o metodă, la o primă privire interesantă, pentru acordarea regulatorului. Dacă pentru controlul acestui proces se folosește un regulator PI, se poate impune ca procesul în buclă închisă să aibă o comportare specifică unui sistem de ordinul II, caracterizat prin funcția de transfer standard :

$$H_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.22)$$

în care parametrii ω_n și ξ rezultă din performanțele impuse sistemului în buclă închisă (timp de răspuns, suprareglaj). În această situație se poate determina funcția de transfer echivalentă pentru sistemul în buclă deschisă:

$$H_{de}(s) = \frac{\omega_n}{2\xi} \frac{1}{s \left(\frac{1}{2\xi\omega_n} s + 1 \right)}. \quad (2.23)$$

Funcția de transfer pe calea directă a sistemului fizic va fi:

$$H_d(s) = H_R(s)H_f(s) = k_R \frac{T_I s + 1}{T_I s} \frac{k_f}{(T_p s + 1)(T_E s + 1)}. \quad (2.24)$$

Dacă se compensează constanta de timp a procesului cu constanta de timp de integrare a regulatorului, adică dacă se consideră $T_I = T_p$, rezultă:

$$H_d(s) = H_R(s)H_f(s) = \frac{k_R k_f}{T_p} \frac{1}{s(T_E s + 1)}. \quad (2.25)$$

Din identificarea formei funcției de transfer pe calea directă din (2.23) și (2.25) rezultă relația:

$$\frac{k_R k_f}{T_p} = \frac{\omega_n}{2\xi};$$

Care permite determinarea factorului de amplificare a regulatorului :

$$k_R = \frac{\omega_n T_p}{2\xi k_f}; \quad (2.26)$$

La o analiză mai atentă, se observă că în identificarea formei funcției de transfer pe calea directă din (2.23) și (2.25) s-a omis precizarea unei a doua relații care rezultă de aici:

$$T_E = \frac{1}{2\xi\omega_n} \quad (2.27)$$

Utilizând o expresie acoperitoare pentru durata regimului tranzitoriu a răspunsului unui sistem de ordinul II:

$$t_r \cong \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (2.28)$$

și înlocuind în relația (2.27) se obține:

$$t_r = 8T_E. \quad (2.29)$$

În aceste condiții metoda propusă permite impunerea unor performanțe în buclă închisă doar în ceea ce privește suprareglajul, timpul de răspuns obținut fiind dat de relația (2.29). Din valoarea impusă suprareglajului se poate determina valoarea factorului de amortizare, ξ . Parametrii regulatorului se vor determina utilizând relațiile:

$$k_R = \frac{T_p}{4\xi^2 k_f T_E}; \quad (2.30)$$

$$T_I = T_p$$

Metoda propusă se pare că asigură aceleași performanțe în ceea ce privește timpul de răspuns ca și metoda modulului propusă de Kessler, metoda modulului având însă fixată valoarea suprareglajului ($\sigma=4.3\%$) corespunzător unei valori a factorului de amortizare $\xi=0.7$.

Dacă notăm cu T_Σ suma tuturor constantelor de timp parazite care sunt mult mai mici decât constantele predominante, respectiv în cazul nostru $T_\Sigma = T_E$, utilizând metoda modulului se obține un regulator PI, cu parametrii de acordare dați de relațiile:

$$k_R = \frac{T_p}{2k_f T_E}; \quad (2.31)$$

$$T_I = T_p$$

Se obține de asemenea o funcție de transfer pe calea directă

$$H_d(s) = \frac{1}{2T_\Sigma s(T_\Sigma s + 1)}$$

și o funcție de transfer a sistemului în buclă închisă

$$H_0(s) = \frac{1}{2T_\Sigma^2 s^2 + 2T_\Sigma s + 1}$$

Se poate observa că:

$$\omega_n \cong \frac{1}{\sqrt{2}T_\Sigma}, \quad \xi = \frac{1}{T_\Sigma} \frac{1}{2\omega_n} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.7$$

În aceste condiții:

$$t_r \cong \frac{4}{\xi\omega_n} = 8T_\Sigma$$

iar în relația (2.30) dacă se înlocuiește $\xi=0.7$ se obține pentru k_R aceeași expresie ca în (2.31)

Dacă se neglijează inerția traductorului și a elementului de execuție, funcția de transfer a părții fixate va fi de ordinul I, de forma:

$$H_f(s) = \frac{k_f}{(T_p s + 1)}$$

Pentru acordarea regulatorului se impune ca procesul în buclă închisă să aibă o comportare specifică unui sistem de ordinul I, respectiv se impune timpul de răspuns în buclă închisă. Comportarea sistemului în buclă închisă va fi dată de :

$$H_o(s) = \frac{I}{T_o s + I}$$

unde, constanta de timp corespunzătoare sistemului în buclă închisă, T_o poate fi calculată în funcție de timpul de răspuns: $T_o = t_r / 2.3$ dacă se consideră ca timp de răspuns intervalul de timp după care ieșirea atinge 90% din valoarea de regim staționar, $T_o = t_r / 3$ pentru un procent de 95% și respectiv $T_o = t_r / 3.9$ pentru un procent de 98%. Aceste relații sunt valabile numai pentru sisteme de ordinul I în care ieșirea evoluează exponențial la modificări de tip treaptă ale intrării.

Funcția de transfer a sistemului în buclă închisă este dată de relația:

$$H_o(s) = \frac{H_p H_R}{1 + H_p H_R}$$

rezultând funcția de transfer a regulatorului

$$H_R(s) = \frac{H_o}{H_p (1 - H_o)} = \frac{I}{H_p T_o s} = \frac{T_p}{k_f T_o} + \frac{I}{k_f T_o s}$$

și relațiile pentru calculul parametrilor

$$k_R = \frac{T_p}{k_f T_o};$$

$$T_I = T_p$$

În cazul în care se folosește o pompă pentru evacuarea lichidului, procesul se comportă ca un element integrator și în acest caz va fi un proces fără autostabilizare. În subcapitolul anterior, pentru acest tip de proces a fost determinat un model liniar sub forma unei funcții de transfer:

$$H_p(s) = \frac{k_p}{T_p s}.$$

Dacă nu se neglijează constanta de timp a elementului de execuție vom avea:

$$H_f(s) = \frac{k_f}{T_p s (T_E s + 1)} \quad (2.32)$$

cu $k_f = k_p k_E k_T$, k_E –amplificarea elementului de execuție, k_T – amplificarea traductorului și T_E constanta de timp a elementului de execuție.

Pentru a obține în buclă închisă o comportare specifică unui sistem de ordinul II, cu parametrii ω_n și ξ calculați din performanțele impuse sistemului (se poate impune doar valoarea suprareglajului, pentru timpul de raspuns rămâne valabila condiția $t_r = 8T_E$) rezultă un regulator de tip P având :

$$k_R = \frac{\omega_n T_p}{2\xi k_f};$$

Dacă se neglijează constanta de timp a elementului de execuție, pentru a obține în buclă închisă o comportare specifică unui sistem de ordinul I, cu T_0 impus prin timpul de răspuns, se

obține un regulator P cu $k_R = \frac{T_p}{k_f T_0}$.

2.4 Studiu de caz – stand didactic pentru reglarea nivelului



Figura 2.15 Standul experimental Festo

Standul didactic Festo este o instalație compactă și este proiectat pentru a satisface diferite necesități de instruire orientată pe industrie și o bună cunoaștere a conținutului hardware a componentelor 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.

2.4.1 Descrierea instalației

Schema P&ID pentru standul de control al nivelului este prezentată în *Figura 2.16*, și o schemă funcțională simplificată a procesului și a sistemului de control este prezentată în *Figura 2.17*.

Sistemul conține două rezervoare de apă, cu aceeași secțiune transversală, situate unul deasupra celuilalt (*Figura 2.15*) astfel încât minimul în rezervorul de sus este la același nivel cu maximum din rezervorul de jos. Rezervorul pentru reglarea nivelului este poziționat în partea de sus iar rezervorul tampon în partea de jos. 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. În instalație cantitatea de lichid este egală cu volumul unui rezervor. Pentru nivelul minim în

rezervorul principal, rezervorul tampon este plin, suprafața apei în acest caz în cele două rezervoare fiind aproximativ pe același nivel.

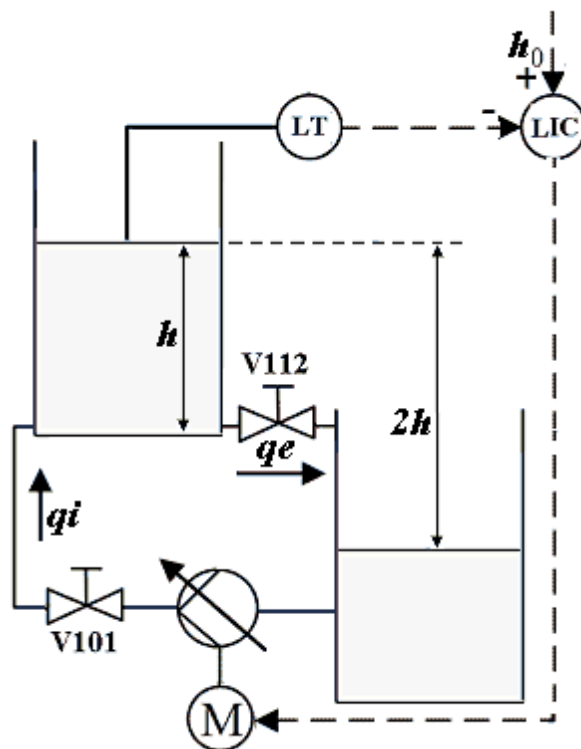


Figura 2.16 Schema P&ID a sistemului de reglare a nivelului

Aria secțiunii transversale a rezervorului pentru reglarea nivelului este de 332.5cm^2 . Pentru ca nivelul apei în rezervorul tampon să nu coboare sub nivelul conductei de aspirație a pompei, nivelul apei în rezervorul pentru reglarea nivelului nu trebuie să depășească 20 cm.

Alte componente ale stației Festo utilizate pentru controlul nivelului sunt: senzor ultrasonic de nivel cu ieșire în curent unificat, 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.

Regulatorul de nivel este implementat pe un PLC din seria Simatic S7-300, 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. Valoarea dată de senzor este valoarea curentă 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 acestui studiu de caz este modelarea și calibrarea modelului procesului, proiectarea și implementarea unor variante de sistem pentru reglarea automată a nivelului din rezervorul principal. Se are în vedere implementarea unor 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 în rezervorul principal. Perturbațiile pot apărea prin modificarea poziției robinetului V101 (pentru perturbația pe debitul de intrare) sau modificarea robinetului V112 (pentru perturbația pe debitul de ieșire).

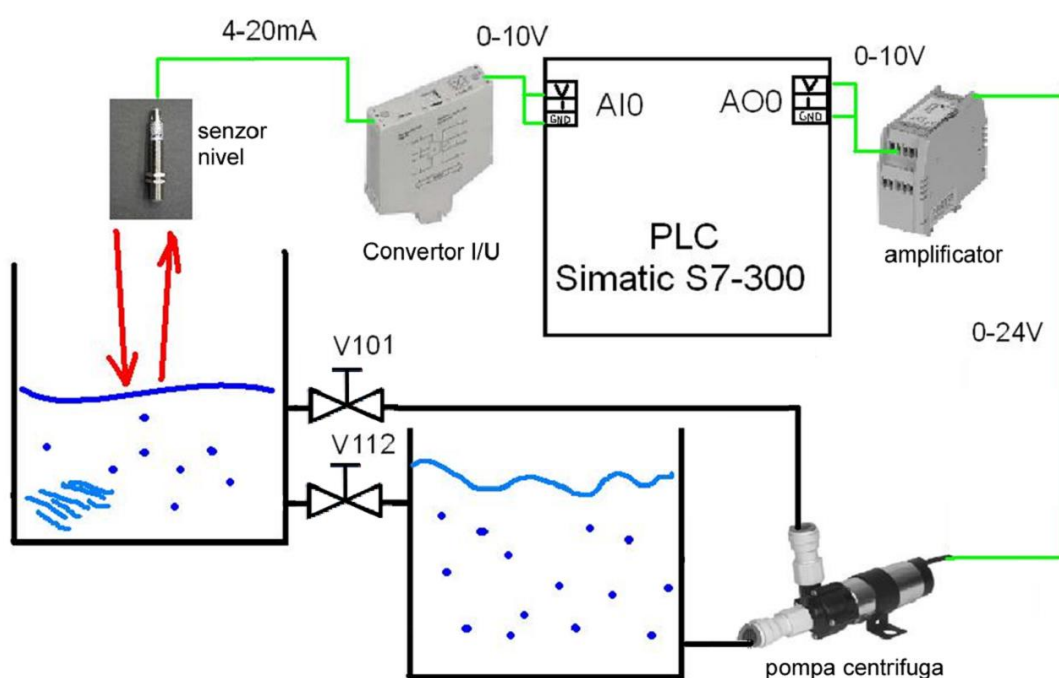


Figura 2.17 Schema simplificată a sistemului de reglare a nivelului

În Figura 2.18 Figura 2.5 este prezentată o schemă bloc detaliată a instalației și a sistemului de control. Partea de instalație pentru reglarea nivelului cuprinde: amplificatorul pentru alimentarea motorului pompei (AP), pompa centrifugă (PC), ce include motorul de curent continuu și pompa, rezervorul principal în care se reglează nivelul (RP), traductorul de nivel constituit din senzorul de nivel (LS) și convertorul curent-tensiune (CI/V). Sistemul de control (RA), implementat în PLC-ul din panoul de control aferent instalației, cuprinde blocul regulatorului (PID) și convertoarele analog-numeric (CAN) și numeric-analogic (CNA). Pe schemă sunt reprezentate atât blocurile pentru elementele componente cât și domeniul de variație a mărimilor de la intrarea și ieșirea acestor elemente.

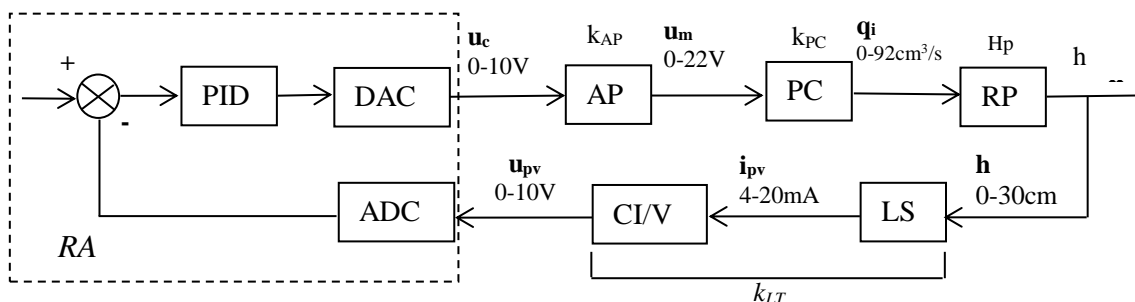


Figura 2.18 Schema bloc a instalatiei și sistemului de reglare a nivelului

2.4.2 Modelarea instalației

În Figura 2.19 este prezentată schema bloc generală a instalației pentru partea de proces. Aceasta cuprinde: amplificatorul pentru alimentarea motorului pompei (AP), pompa centrifugă (PC - include pompa și motorul de curent continuu), rezervorul principal în care se reglează nivelul (RP).

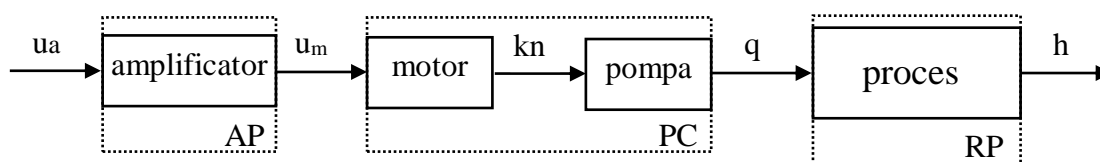


Figura 2.19 Schema bloc a instalației de reglare a nivelului

Pentru a obține modelul întregii instalații este necesară dezvoltarea modelelor matematice pentru fiecare din părțile componente. Modelul final al procesului va fi compus din modelele individuale pentru fiecare bloc component.

Pentru determinarea parametrilor modelelor matematice și calibrarea acestora au fost realizate măsurători în instalație, în cadrul unor experimente specifice fiecărui element component. Corelarea cunoștințelor teoretice cu rezultatele măsurătorilor a permis determinarea caracteristicilor statice și/sau a modelului dinamic pentru fiecare din elementele componente ale instalației.

Pentru realizarea măsurătorilor de presiune s-a montat un traductor de presiune la ieșirea pompei centrifuge. Pentru măsurătorile de debite (intrare și ieșire din rezervorul principal), pe lângă debitmetrul existent la ieșirea din pompă (debitmetru cu turbină și ieșire în impulsuri) a mai fost montat un debitmetru suplimentar la ieșirea din rezervorul principal (debitmetru electromagnetic cu ieșire analogică). Pentru debitmetrul cu ieșire în impulsuri, un convertor frecvență tensiune transformă ieșirea în impulsuri a debitmetrului într-o mărime analogică în tensiune. Valorile furnizate de debitmetre au fost comparate cu cele calculate prin măsurarea nivelului de lichid în rezervor și calculul variației volumului din rezervor în unitatea

de timp. A fost posibilă astfel și compensarea neliniarității traductorului de debit cu turbină de la intrarea în rezervorul principal (mult mai mare decât în datele de catalog).

Amplificatorul pentru controlul pompei (AP)

Variabila de intrare în amplificator este reprezentată de tensiunea dată de regulatorul automat, u_c (0-10V), iar variabila de ieșire din amplificator, tensiunea u_m (0-24V).

Amplificatorul permite controlul motorului ce antrenează pompa, asigurând la ieșire o tensiune (u_m) între 0 și maxim 24 Vcc. Capetele de scală pot fi reglate cu ajutorul a două potențiometre de pe modulul amplificatorului. În situația reală, deși amplificatorul a fost configurat pentru domeniul maxim, valoarea maximă a tensiunii de ieșire este limitată la 22V.

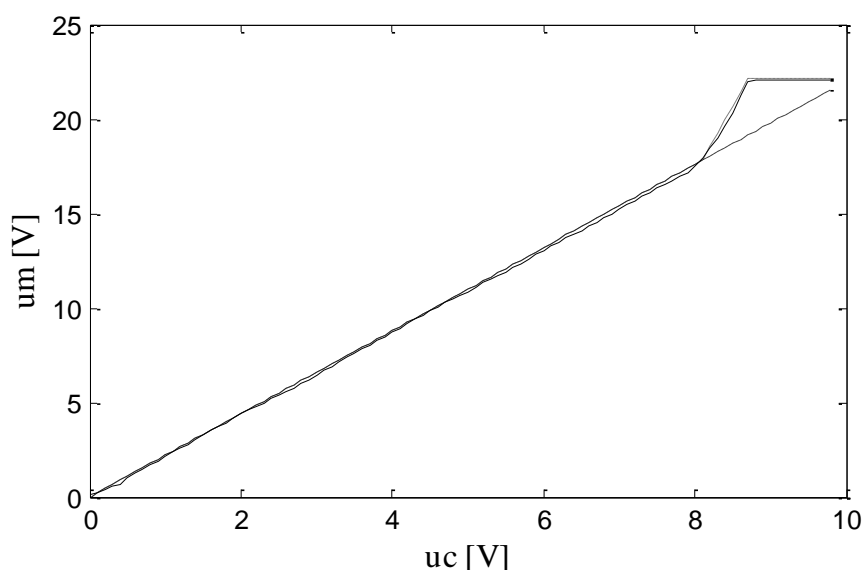


Figura 2.20 Caracteristica statică a amplificatorului

Caracteristica amplificatorului determinată din măsurători este prezentată în *Figura 2.20* cu linie continuă. Caracteristica liniarizată pe tot domeniul de funcționare poate fi aproximată cu relația:

$$u_m = 2.2 \cdot (u_c - 0.2) \quad (2.33)$$

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 8.2 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 8.2 V caracteristica este exprimată cu relația:

$$u_m = 2.2 \cdot (u_c - 0.2) + 5(u_c - 8.2) \quad (2.34)$$

Tot din caracteristica statică rezultată din măsurători se observă și faptul că deși, teoretic, valoarea tensiunii de ieșire este între 0-24V, practic, tensiunea de ieșire este între 0-22 V. Valoarea maximă de saturație a tensiunii de ieșire este 22 V. Rezultă astfel caracteristica din *Figura 2.20* cu linie punctată, foarte apropiată de caracteristica măsurată.

Pentru realizarea modelului neliniar în Simulink se pot utiliza blocuri de tip Math Function sau Embedded Matlab Function pentru implementarea relațiilor specifice fiecărui element sau se pot construi pentru fiecare element subsisteme utilizând blocuri elementare Simulink. O posibilitate de implementare a modelului amplificatorului, realizat din blocuri elementare este prezentată în *Figura 2.21*. Pentru ca schema Simulink să funcționeze corect trebuie alese valoarea de prag (Threshold) 8.2 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.

După realizarea schemei din partea stângă se marchează toate componentele schemei, apoi se alege din meniul *Edit* comanda *Create Subsystem* și rezultă blocul din partea dreaptă, după care se editează denumirea acestuia – *amplif*.

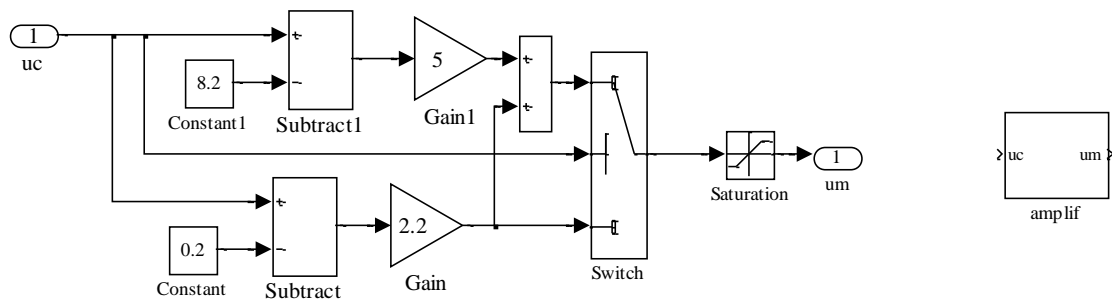


Figura 2.21 Implementarea amplificatorului în Simulink

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-0.2);
if um<0; um=0; end
if uc>8.2; um=um+5*(uc-8.2); end
if um>22; um=22; end
```

Motorul pentru antrenarea pompei

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

$$\begin{aligned} u_m &= R_m i_m + e_m \\ m &= m_r \end{aligned} \quad (2.35)$$

unde:

$$e_m = k_m \cdot n$$

$$m = k_m \cdot i_m$$

R_m reprezintă rezistența înfășurării rotorice a motorului, i_m este curentul absorbit de motor, e_m tensiunea contraelectromotoare dezvoltată de motor, m cuplul activ dezvoltat de motor iar m_r cuplul rezistent. Tensiunea contraelectromotoare este proporțională cu turația motorului, constanta k_m depinzând de construcția mașinii. Cuplul dezvoltat de motor este proporțional cu valoarea curentului prin motor, constanta de proporționalitate k_m fiind aceeași cu cea de la tensiunea contraelectromotoare.

În cazul de față nu ne interesează explicit valoarea turației astfel că vom considera ca ieșire termenul $k_m \cdot n$ care se poate exprima astfel:

$$k_m n = e_m = u_m - R_m i_m \quad (2.36)$$

Valoarea rezistenței rotorului este de 3Ω iar tensiunea de alimentare este mărimea de intrare. Din păcate, calculul valorii curentului rotoric este mai dificilă - poate fi calculată în funcție de nivelul din rezervor, debitul pompei și randamentul pompei.

Implementarea Simulink pentru modelul motorului este prezentată în *Figura 2.22*. Pentru a evita determinarea constantei de proporționalitate k_m se va considera în continuare că ieșirea motorului nu este direct turația n , ci termenul $k_m \cdot n$. Constanta de proporționalitate k_m notată simplificat cu k în schema Simulink, va fi inclusă în modelul pompei și apoi determinată experimental împreună cu celelalte constante din modelul pompei. 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.

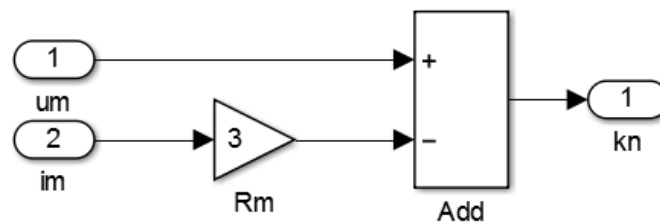


Figura 2.22 Implementarea modelului motorului în Simulink

Pompa centrifugă

Varibilele de intrare în acest bloc este proporțională cu turația motorului - $k_m n$, iar variabila de ieșire este debitul de intrare în rezervorul principal q_i .

Pentru a calcula debitul dat de pompă la intrarea în rezervorul de reglare a nivelului trebuie să determinăm mai întâi 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 $f(q, P_p, n) = 0$ care aproximează cel mai bine caracteristica reală este un paraboloid hiperbolic de ecuație:

$$P_p = k'_1 n^2 + k'_2 nq + k_3 q^2$$

unde P_p reprezintă presiunea creată de pompă, n turația pompei și q 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 ompei n ci doar pentru $k_m n$, înlocuind această expresie în relația de mai sus vom obține:

$$P_p = k_1 n^2 + k_2 nq + k_3 q^2 \quad (2.37)$$

cu constantele $k_1 = k'_1 k_m^2$ și $k_2 = k'_2 k_m$.

Valorile coeficienților k_1 , k_2 , k_3 vor fi determinate experimental.

Pentru scopuri practice, caracteristica generalizată a pompei se transpune în caracteristici parțiale definite la turație constantă (P_p -- Figura 2.23).

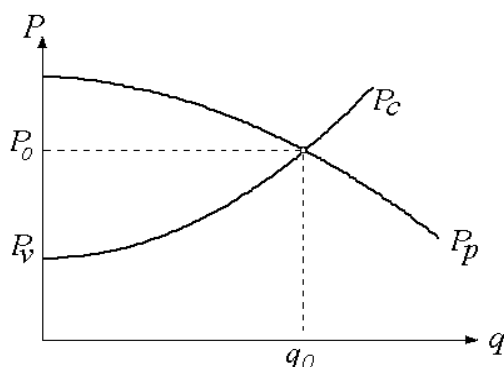


Figura 2.23 Determinarea grafică a punctului de funcționare al pompei

Comportarea instalației, $P_c(q)$, cuprinzând caracteristicile tuturor consumatorilor (conduce, coturi, ramificații, robineți etc.) poate fi definită prin relația:

$$P_c = P_v + kq^2 \quad (2.38)$$

unde P_v reprezintă presiunea statică a consumatorului, iar termenul kq^2 căderea de presiune pe conducte, robineți etc.

Punctul static de funcționare al procesului, punctul de coordonate (q_0, P_0) , se poate determina grafic, fiind dat de intersecția caracteristicilor P_p și P_c , sau analitic pentru $P_p = P_c$, respectiv:

$$P_v + kq^2 = k_1 n^2 + k_2 nq + k_3 q^2$$

$$k_1 n^2 + k_2 n q + (k_3 - k) q^2 - P_v = 0$$

de unde:

$$q = \frac{k_2 n + \sqrt{[k_2^2 + 4(k - k_3)k_1]n^2 - 4(k - k_3)P_v}}{2(k - k_3)} \quad (2.39)$$

Dacă $P_v = 0$ (contrapresiunea este nulă), atunci:

$$q = \frac{k_2 + \sqrt{[k_2^2 + 4(k - k_3)k_1]}}{2(k - k_3)} n \quad (2.40)$$

ceea ce evidențiază o dependență liniară a debitului față de turație.

În cazul instalației noastre rezervorul principal și rezervorul tampon au aceeași secțiune transversală. Asta 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 statica a pompei este reprezentată de presiunea exercitată de o coloană de apă cu înălțimea de valoare dublă față de nivelul lichidului în rezervorul principal, adică $P_v = 2h$. Se obține din (2.39):

$$q = \frac{k_2 n + \sqrt{[k_2^2 + 4(k - k_3)k_1]n^2 - 4(k - k_3) \cdot 2h}}{2(k - k_3)} \quad (2.41)$$

$$k_{11} = k_2^2 + 4(k - k_3)k_1$$

$$k_{12} = 8(k - k_3)h$$

$$k_{13} = 2(k - k_3)$$

$$q = \frac{k_2 n + \sqrt{[k_{11}n^2 - k_{12}]}}{k_{13}} \quad (2.42)$$

Subsistemul pentru modelul pompei centrifuge se obține implementând ecuația (2.42) în Simulink după cum se vede în *Figura 2.24*.

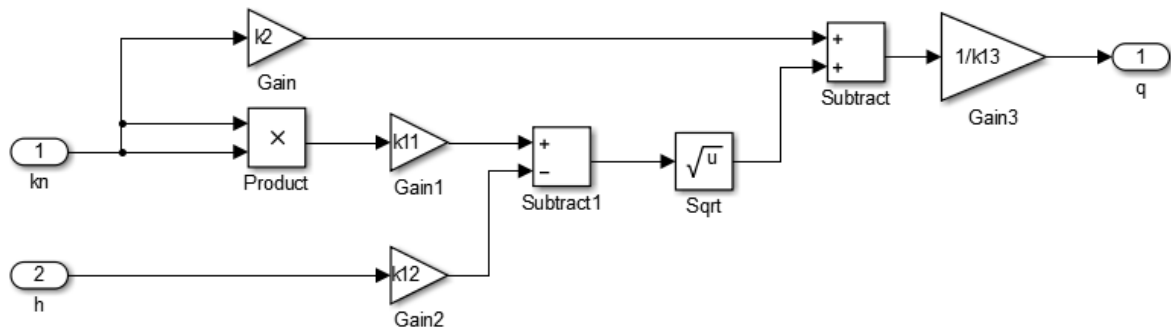


Figura 2.24 Implementarea modelului pompei în Simulink

Valorilor pentru constantele k_{11} , k_{12} , k_{13} trebuie inițializate într-un fișier .m în Matlab. După rularea fișierului, numele variabilelor împreună cu valorile atribuite vor apărea în workspace. Atunci când se rulează fișierul cu modelul procesului în 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 (3.37) și caracteristica instalației (3.38) s-a luat în considerare un set de măsurători pentru presiunea la ieșirea din pompă (P_p), debitul dat de pompă (q) și nivelul în rezervor la mai multe valori ale tensiunii de alimentare a pompei. Pe baza măsurătorilor de nivel s-a calculat presiunea statică în instalație (P_v). Pentru coeficienții k_1 , k_2 , k_3 au fost determinate următoarele valori:

$$k_1 = 0.624, \quad k_2 = -0.015, \quad k_3 = -0.0006 \quad (2.43)$$

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

$$k = \frac{P_{po} - P_v}{q^2}$$

rezultând:

$$k = 0.035 \quad (2.44)$$

Rezultatele experimentelor realizate sunt prezentate în figurile următoare. În *Figura 2.25* (stânga), curba cu linie continuă reprezintă caracteristica pompei pentru o tensiune de alimentare de 24V din măsurătorile experimentale pentru diferite valori ale debitului pompei. Cu linie întreruptă s-a trasat caracteristica pompei utilizând valorile date în manualul de utilizare pentru trei puncte de funcționare, iar cu linie punctată caracteristica pompei calculată cu relația (2.37) și valorile determinate pentru constantele k_1 , k_2 , k_3 și k .

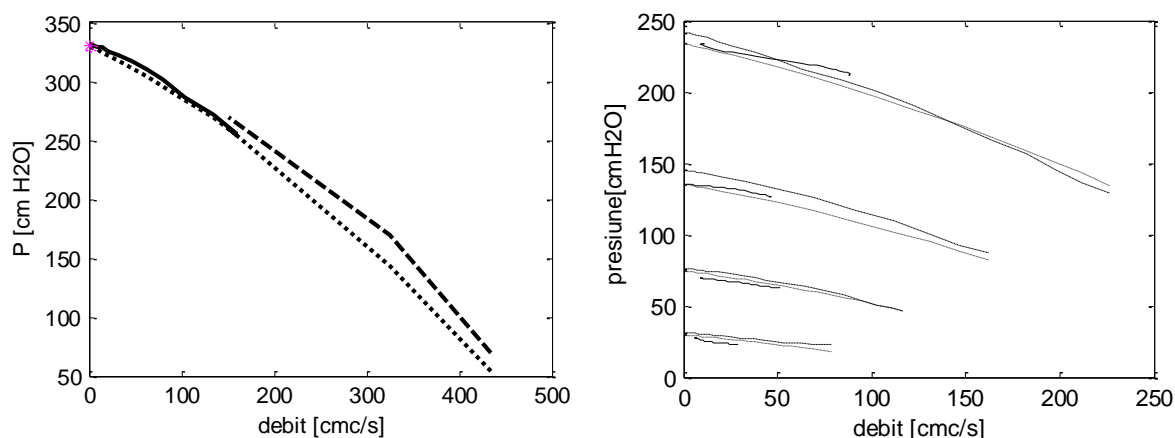


Figura 2.25 Caracteristicile pompei pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare

Se constată că domeniul de variație a debitului în instalație (*Figura 2.25*, curbele cu linie continuă), acoperă valori scăzute față de posibilitățile pompei. Funcționarea pompei în instalația de laborator la valori scăzute ale debitului față de datele de catalog este datorată căderilor mari de presiune dinamică pe debitmetrul de la ieșirea din pompă, pe coturi, pe robineți și pe conducte (s-a folosit conductă de DN12 în loc de DN20 cum este recomandat în datele de catalog ale pompei). Din păcate, în funcționarea instalației pe această porțiune a caracteristicii pompei 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 se ajunge la valori mai mari ale debitului pompei s-a demontat temporar debitmetrul și s-au refăcut măsurătorile.

În *Figura 2.25* (dreapta) 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 (uc). Cu linie continuă s-a reprezentat caracteristica pompei conform măsurătorilor în instalație cu debitmetrul montat, cu linie întreruptă conform măsurătorilor după demontarea debitmetrului iar cu linie punctată caracteristica pompei conform următoarei relații, obținută din (3):

$$P_p = 0.624 \cdot n^2 - 0.015 \cdot nq - 0.0006 \cdot q^2 \quad (2.45)$$

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 cm³/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.

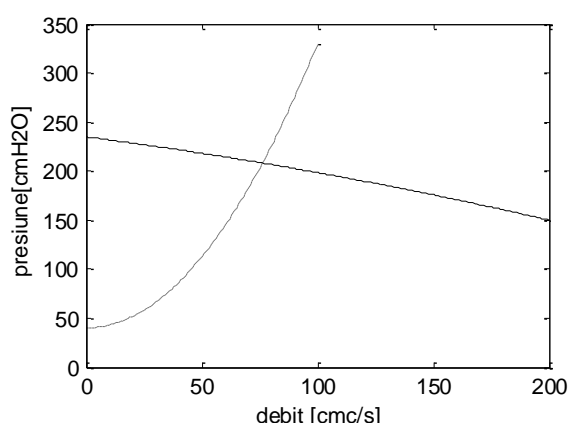


Figura 2.26 Determinarea grafică a punctului de funcționare al instalației

Intersecția celor două caracteristici (P_p) și (P_c) reprezentând punctul static de funcționare, pentru o valoare a tensiunii de intrare a amplificatorului de 10 V și nivelul în rezervor de 20 cm este prezentată în **Error! Reference source not found..**

În *Figura 2.27* sunt prezentate rezultatele a două experimente de umplere a rezervorului, cu robinetul de ieșire închis complet și valori ale tensiunii de comandă de 4v (graficul din stânga) și respective 7V (graficul din dreapta). Cu linie continuă este reprezentat debitul și cu linie întreruptă nivelul în rezervor. Pe aceleași grafice, cu linie punctată s-au reprezentat valorile debitului calculate conform relației (2.41).

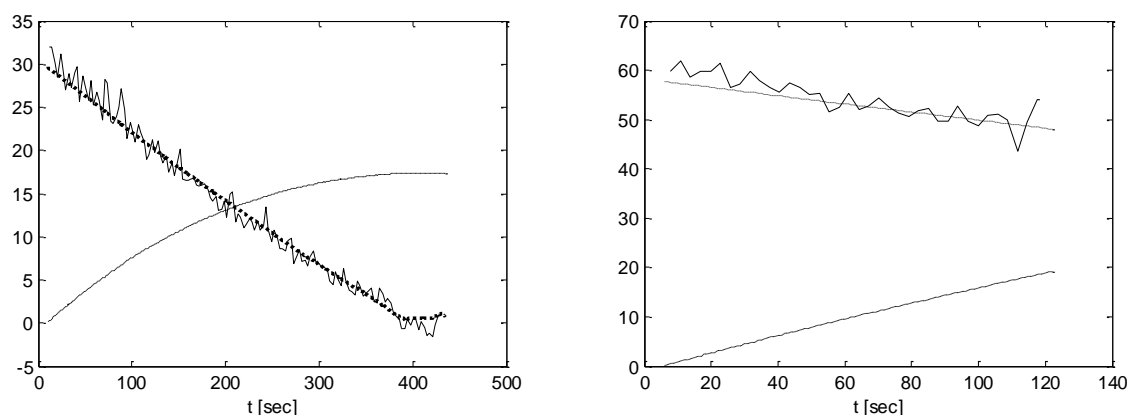


Figura 2.27 Rezultate comparative debit măsurat debit calculat la umplerea rezervorului

Curbele din Figura 2.28.a) reprezintă variația debitului în funcție de tensiunea de alimentare a pompei, având ca parametru nivelul lichidului în rezervor. Se poate observa că pentru înălțime $h=0\text{cm}$, dependența dintre q și u este liniară, reprezentată de dreapta care pleacă din origine așa cum arată și relația (2.40).

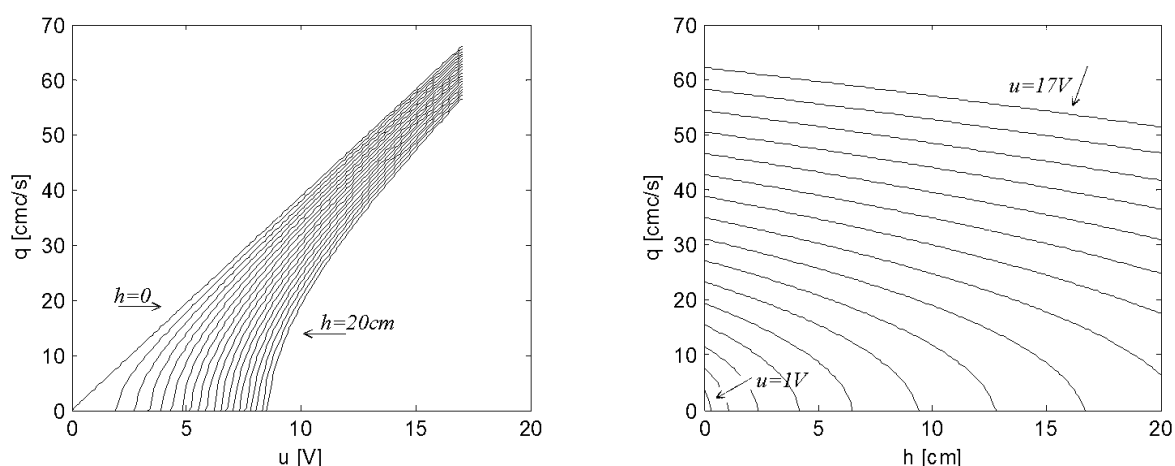


Figura 2.28 a) Dependența debit-tensiune;

b) Dependența debit-nivel

În Figura 2.28.b) se poate observa că la aceeași tensiune de alimentare debitul scade odată cu creșterea nivelului în rezervor. Pe domeniul de lucru al nivelului în rezervor, respectiv $h=0-20\text{cm}$, se poate observa o dependență liniară a debitului în funcție de nivel (ne situăm pe porțiunea relativ liniară a caracteristicii) la alimentarea pompei cu tensiuni de peste 11V. Odată cu scăderea tensiunii de alimentare a pompei se face simțit caracterul neliniar, întreaga caracteristică $q=f(h)$ încadrându-se în domeniul de lucru pentru h .

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):

$$\eta = \frac{P_H}{P_E} \quad (2.46)$$

în care:

$$P_E = u_a \cdot i_a \text{ [W]}, \quad P_H = q \cdot \rho \cdot g \cdot P_p \text{ [W]}$$

unde: q – debitul pompei [m^3/s],

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]

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 (2.46) pe baza măsurătorilor efectuate pe standul de laborator la valoarea maximă a tensiunii pe motorul pompei ($u_m=24\text{V}$) dată de la o sursă stabilizată. Reprezentând grafic valorile obținute în funcție de debit s-a obținut curba punctată din *Figura 2.29.a* *Figura 2.5 Rezervor deschis și evacuare cu pompă la debit constant..* Se poate observa că domeniul de variație a debitului în instalație este relativ restrâns ($q_{\max}=92\text{cm}^3/\text{s}$), 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 2.29.a* *Figura 2.5 Rezervor deschis și evacuare cu pompă la debit constant..* 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 2.29.a* *Figura 2.5 Rezervor deschis și evacuare cu pompă la debit constant..* 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).

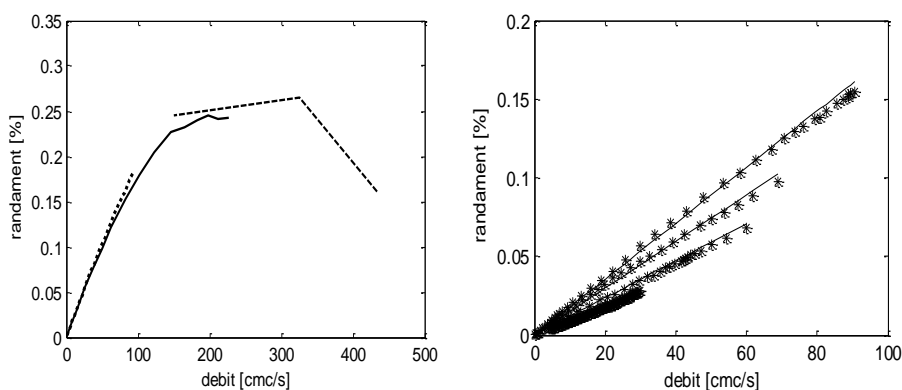


Figura 2.29 a) Randamentul pompei centrifuge ; b) Liniarizarea randamentului

Funcționarea pompei în instalația de laborator la valori scăzute ale debitului aduce totuși

și un avantaj: pe această porțiune a caracteristicii variația randamentului în funcție de debit este 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):

$$\eta = k_\eta u_m q \text{ c } \text{ cu } k_\eta = 8 * 10^{-5} \quad (2.47)$$

În *Figura 2.29.b* **Error! Reference source not found.** s-au reprezentat cu * rezultatele calculelor bazate pe măsurători conform cu relația (2.46) iar cu linie continuă reprezentarea rezultatelor obținute cu relația (2.47), pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare. Se poate observa că relația de calcul a randamentului (2.47) dă rezultate satisfăcătoare fiind în același timp o relație simplă care să permită calculul randamentului dacă se cunoaște debitul pompei (q) și tensiunea de alimentare (u_m).

În *Figura 2.30* este prezentată schema Simulink pentru modelarea blocului care calculează randamentul pompei conform relației (2.47).

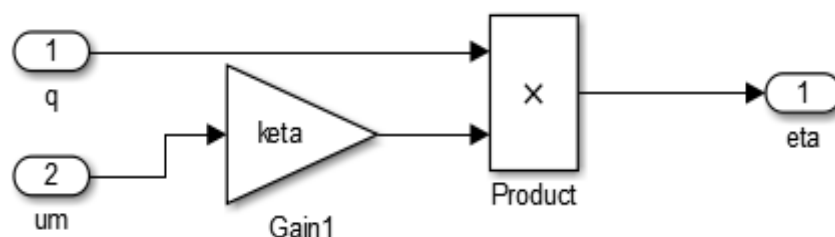


Figura 2.30 Schema bloc corespunzătoare relației de calcul a randamentului pompei

Curentul eotoric

Valoarea curentului rotor, i_m , se poate obține pe baza ecuațiilor randamentului pompei (2.46). 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:

$$i_m = \frac{P_H}{u_m \eta} = \frac{q \rho g P_P}{u_m \eta} \quad (2.48)$$

Debitul q fiind exprimat în m^3/s . În formula (2.48), constantele $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ și $g = 10 \frac{m}{s^2}$ vor fi înlocuite de valorile lor. Trebuie considerat faptul că debitmetrul din sistem măsoară debitul având unitatea de măsură cm^3/s . Pentru a trece de la mărimile exprimate în unitățile sistemului internațional la cele folosite în acest model sunt necesare câteva schimbări ale unităților de măsură. Astfel pentru debitul q este necesară transformarea 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 coloană de apă în cm ($P_p [cm] = P_p [m] * 10^{-2}$). În aceste condiții ecuația (2.48) devine:

$$i_m = \frac{q * 10^{-6} * 1000 * 10 * P_p * 10^{-2}}{u_m \eta} \quad (2.49)$$

Intrucât, debitul dat de pompă este debitul de intrare în rezervorul principal, q_i , și considerând $P_p = P_c$, pe baza relației (2.38), cu $P_v = 2h$ se poate rescrie:

$$i_m = \frac{P_H}{u_m \eta} = \frac{q(2h + kq^2)}{10^4(u_m \eta)} \quad (2.50)$$

În *Figura 2.31* 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*.

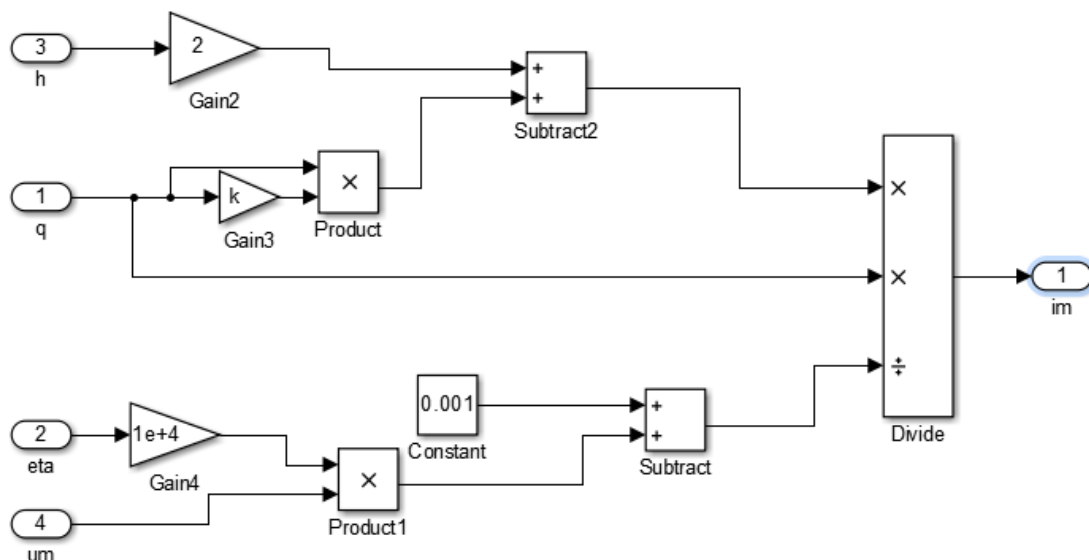


Figura 2.31 Schema Simulink pentru calculul curentului rotor

Rezervorul principal

Pentru determinarea unui model neliniar al procesului care să poată fi implementat cu ușurință în Simulink, vom considera din nou ecuația (2.4):

$$\frac{A \cdot dh}{dt} = q_i - q_e \quad (2.4)$$

scrisă de această dată sub forma:

$$h = \int \frac{1}{A} (q_i - q_e) dt$$

Pentru calcularea debitului de ieșire din rezervor se utilizează relația (2.5):

$$q_e = C\sqrt{h} \quad (2.5)$$

rezultând pentru relația anterioară:

$$h = \int \frac{1}{A} (q_i - C\sqrt{h}) dt \quad (2.51)$$

relație care pune în evidență neliniaritatea procesului, N (*Figura 2.4*).

Pentru calcularea debitului de ieșire din rezervor se poate utiliza formula (2.5) 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 **Error! Reference source not found.** (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 (2.5) pentru $C = 9$ sunt reprezentate cu linie punctată. Se poate observa că rezultatele calculate și cele măsurate sunt apropiate.

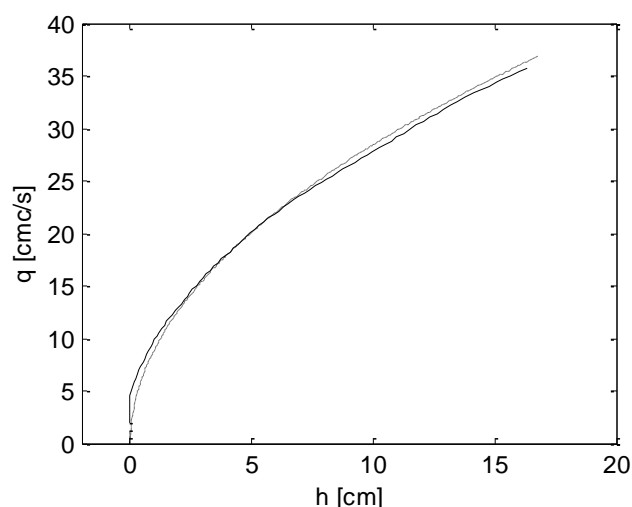


Figura 2.32 Debitul de ieșire din rezervor în funcție de nivel

În aceste condiții schema bloc a modelului rezervorului în Simulink devine:

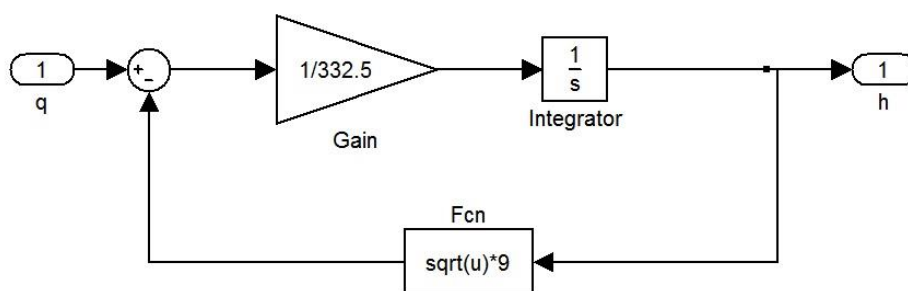


Figura 2.33 Schema bloc Simulink corespunzătoare rezervorului

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

măsurătorilor a fi liniară pe domeniul în care este utilizat în instalație, astfel că nivelul în rezervor se poate calcula cu formula:

$$h = k_{SN} \cdot u_{PV}, \text{ unde, } k_{SN} = 30\text{cm}/10\text{V} = 3 \text{ cm}/\text{V} \quad (2.52)$$

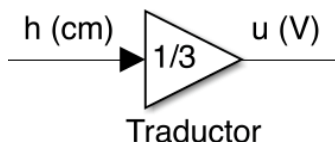


Figura 2.34 Schema bloc corespunzătoare modelului traductorului

Modelul complet al instalației

Pentru a obține modelul întregii instalații este necesară dezvoltarea modelelor matematice pentru fiecare din părțile componente. Modelul final al procesului va fi compus din modelele individuale pentru fiecare bloc component.

După descrierea detaliată a fiecărui bloc în parte, modelul final al întregii instalații se poate obține prin interconectarea corespunzătoare a modelelor individuale pentru fiecare bloc component. Schema bloc a modelului Simulink este prezentată în Figura 2.35.

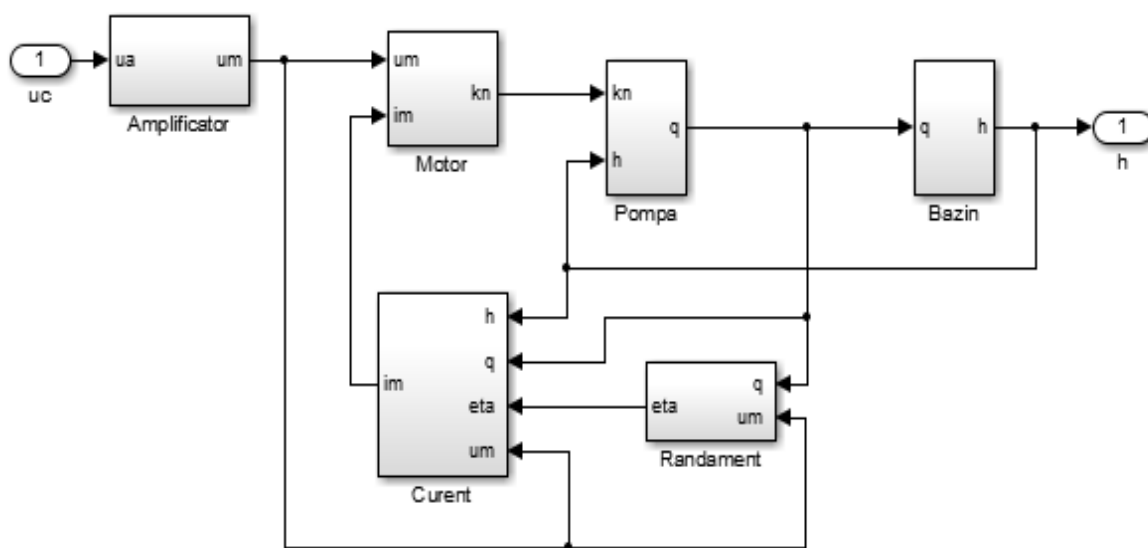


Figura 2.35 Schema bloc a modelului instalației

Implementarea acestui model în Simulink și rularea lui va genera o eroare din cauza existenței unei bucle algebrice. Această eroare apare la prima perioadă 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. Cea mai simplă rezolvare a acestei probleme este introducerea unui bloc

de întârziere (filtru de ordinul 1). Deoarece în necesară simularea cu diferite valori pentru condițiile inițiale, trebuie aleasă o variantă constructivă care permite introducerea de condiții inițiale, astfel, blocul filtru sub forma unei funcții de transfer de ordinul 1, va fi realizat cu un integrator pe calea directă și reacție negativă.

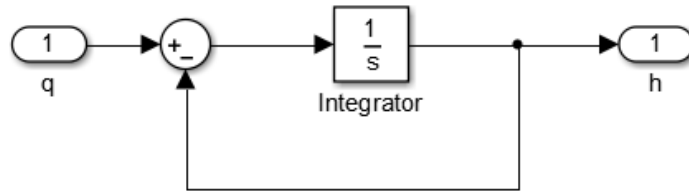


Figura 2.36 Blocul filtru

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 care a fost neglijată în obținerea modelului (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 echivalentă a blocului filtru H_f se calculează din formula sistemului în buclă închisă pentru sistemul din Figura 2.36 **Error! Reference source not found..**

$$H_f(s) = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s}} = \frac{1}{s+1} \quad (2.53)$$

Modelul final care include și blocul filtru este prezentat în **Error! Reference source not found..** 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.

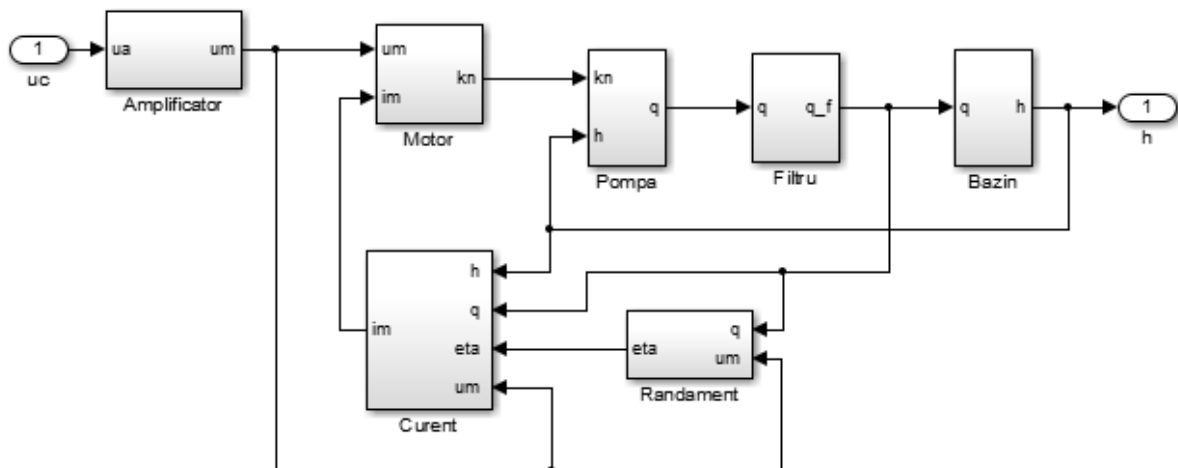


Figura 37 Schema bloc finală a modelului instalației

2.4.3 Calibrarea și validarea modelului instalației

Cel mai important beneficiu al dezvoltării unui model neliniar cât mai exact al procesului îl reprezintă faptul că acesta permite o mai bună înțelegere asupra fenomenelor care au loc la nivelul procesului real și permite analiza a diferite regimuri de funcționare într-un timp mult mai scurt comparativ cu timpul de desfășurare a diferite experimente pe procesul real. Din punct de vedere al controlului automat, un model care descrie cu acuratețe dinamica procesului real poate fi folosit cu succes pentru testarea a diferite scheme, structuri sau algoritmi de reglare automată.

Calibrarea și validarea modelului trebuie să asigure că rezultatele obținute prin simulare se potrivesc în mod rezonabil cu datele obținute din măsurătorile din proces în condiții de funcționare identice. Calibrarea modelului presupune ajustarea valorilor unor constante sau parametri ai modelului astfel încât rezultatele obținute să reflecte cât mai exact situația reală.

Modelul liniar al instalației

Schema bloc a instalației de reglare a nivelului este prezentată în figura 6. Pentru proiectarea analitică a regulatorului automat avem nevoie de modelul matematic al instalației sau altfel spus al părții fixate și performanțele impuse sistemului de reglare.

Se consideră u_c - tensiunea de comandă la ieșirea regulatorului, respectiv intrarea părții fixate și u_{pv} - semnalul de tensiune reprezentând măsura variabilei de proces adică a nivelului în rezervorul principal. Ne interesează determinarea modelului liniar de tip funcție de transfer al instalației. Așa cum am mai precizat, se neglijează dinamica amplificatorului, a pompei și motorului sau a senzorului de nivel. Constantele de timp ale acestor componente, chiar dacă există sunt neglijabile în comparație cu constanta de timp a rezervorului principal.

Modelul liniar bazat pe datele constructive ale instalației.

Pentru determinarea funcției de transfer a procesului (rezervor principal: intrare q , ieșire h) se fixează punctul de funcționare pentru o valoare a nivelului $h_0=13.5\text{cm}$. Pe graficul din figura 16 se determină valoarea debitului q_0 corespunzătoare nivelului h_0 iar cu formula $c = q_0 / \sqrt{h_0}$ se poate determina valoarea constantei c . Aria secțiunii transversale a rezervorului este de 332.5cm^2 . Parametrii funcției de transfer pentru rezervor se calculează conform relației (12) rezultând $T_p=271$ și $k_p=0.814$. Amplificarea celorlalte componente ale schemei se poate determina din raportul dintre domeniul ieșirii și domeniul intrării. Valorile acestor domenii pot fi observate în figura 6. În aceste condiții funcția de transfer a părții fixate va fi de ordinul întâi, constanta de timp fiind egală cu constanta de timp a procesului și factorul amplificare:

$$k_f = k_{AP} \cdot k_{PC} \cdot k_p \cdot k_{LT} = 2.2 \cdot \frac{92}{22} \cdot 0.814 \cdot \frac{10}{30} = 2.2 \cdot 4.182 \cdot 0.814 \cdot 0.333 = 2.5$$

Rezultă astfel:

$$H_f(s) = \frac{2.5}{271 \cdot s + 1} \quad (22)$$

Modelul obținut prin identificare experimentală aplicând la intrare un semnal de tip treaptă.

Experimental, pentru $u_c = 5V$ se așteaptă până procesul ajunge în regim staționar apoi se aplică o treaptă de $0.5V$. Utilizând măsurătorile realizate în acest experiment pentru u_{pv} (figura 17 linie continuă) s-a identificat următorul model de ordinul întâi al părții fixate:

$$H_f(s) = \frac{1.71}{162 \cdot s + 1} \quad (23)$$

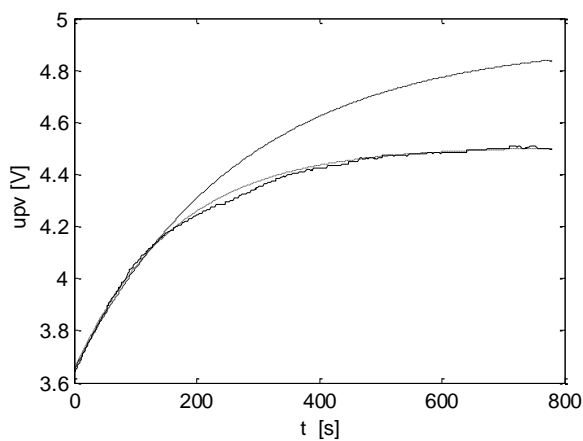


Figura 17. Raspunsul la treaptă al părții fixate – model liniar

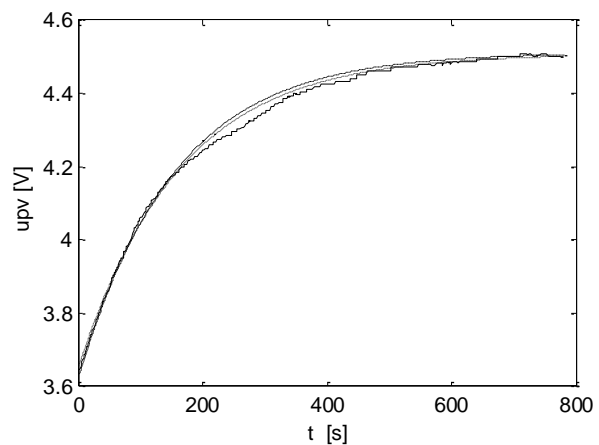


Figura 18. Raspunsul la treaptă al părții fixate – model neliniar

Graficele din figurile 17 și 18 permit compararea rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulare. Rezultatele din măsurători sunt reprezentate cu linie continuă. În figura 17, rezultatele simulării utilizând funcția de transfer determinată analitic (22) sunt reprezentate cu linie întreruptă iar pentru simularea conform funcției de transfer rezultată din identificare experimentală (23) cu linie punctată. În figura 18, rezultatele simulării utilizând funcția de transfer rezultată din identificare experimentală (23) cu linie punctată iar rezultatele simulării utilizând modelul neliniar sunt reprezentate cu linie întreruptă. În figura 17, diferența mare dintre răspunsul modelului determinat experimental și cel al modelului analitic este datorată în special faptului că în modelul liniar al pompei nu se ia în considerare influența nivelului de lichid din rezervor asupra debitului pompei.

Datorită soluției constructive adoptată în cazul acestui stand, nivelul lichidului din rezervorul principal influențează presiunea la ieșirea pompei iar nivelul din rezervorul tampon intrarea în pompă, cumulându-se efectele. Cele două rezervoare au aceleași dimensiuni. Odată cu creșterea (scăderea) nivelului în rezervorul principal, nivelul în rezervorul secundar scade

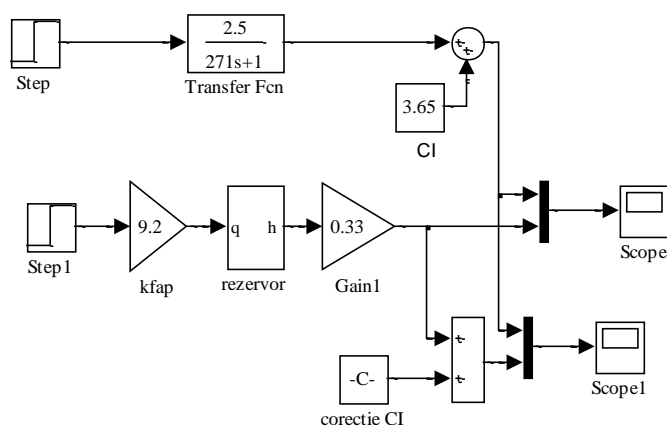
(crește) cu aceeași valoare. Astfel o problemă simplă de reglare a nivelului, se poate vedea ca devine complicată, neliniaritatea procesului fiind foarte pronunțată.

Considerarea neliniarității rezervorului.

Plecând de la schema de principiu a modelului neliniar prezentată în figura 5 se poate realiza modelul neliniar al rezervorului. Celelalte componente (amplificator, pompa, senzor) rămân în variantă liniară cu o valoare a amplificării data de:

$$k_{fAP} = k_{AP} \cdot k_{PC} = 2.2 \cdot \frac{92}{22} = 2.2 \cdot 4.182 = 9.2; \quad k_{LT} = 0.333$$

Schema Simulink pentru aceste două variante de model discutate până acum este prezentată în figura următoare.



Nici această variantă de model nu rezolvă însă neliniaritatea debitului pompei față de nivelul din rezervor. Valoarea maximă pentru debitul pompei, $q_{max}=92\text{cm}^3/\text{s}$ a fost determinată pentru un nivel minim al apei în rezervor. În experimentul pentru identificarea procesului descris mai sus, pentru $u_c=5\text{V}$ (adică jumătate din valoarea maximă a comenzii) s-a obținut în regim staționar o valoare a nivelului $h_0=11\text{cm}$ iar valoarea de regim staționar a debitului dat de pompă este egală cu a debitului de ieșire din rezervor, adică cca $30\text{cm}^3/\text{s}$. Deoarece în timpul experimentelor, valoarea nivelului în rezervorul principal nu va depăși 20cm pentru a împiedica scăderea nivelului în rezervorul tampon sub nivelul conductei de aspirație a pompei am putea considera pentru q_{max} o valoare medie de $66\text{cm}^3/\text{s}$. Se ajunge astfel la un factor de amplificare a părții fixate de 1.78 , apropiat ca valoare de cel rezultat prin identificare experimentală. Dacă însă experimentele se realizează pentru un alt punct staționar de funcționare iarăși apar diferențe semnificative între model și rezultate experimentale. Pentru a rezolva acest inconvenient se va încerca în continuare dezvoltarea unui model care să ia în considerare toate neliniaritățile instalației.

Modelul neliniar al instalației

În capitolele anterioare au fost determinate relațiile matematice care descriu exact sau aproximează comportarea fiecărui element component al sistemului de control. Pentru realizarea modelului neliniar în Simulink se pot utiliza blocuri de tip Math Function sau Embedded Matlab Function pentru implementarea relațiilor specifice fiecărui element (figura 19) sau se pot construi pentru fiecare element subsisteme utilizând blocuri elementare Matlab (figura 20). În tabelul 1 sunt prezentate principalele blocuri ale modelului, denumirea, intrări, ieșiri și relația ce descrie funcționarea fiecăruia.

Tabelul 1.

bloc	intrări	ieșiri	relația utilizată
amp	u_c	u_m	15, 16
ccmot	i_m, u_m	$k_m n$	2
pompa	$k_m n, h$	q	5, 18, 20
randament	q, u_m	η	17
curent	q, h, η, u_m	i_m	7

Pentru exemplificare sunt prezentate cele două variante utilizate pentru implementarea modelului pompei și calculul debitului în funcție de turația motorului și nivelul în rezervor (figura 21 și 22).

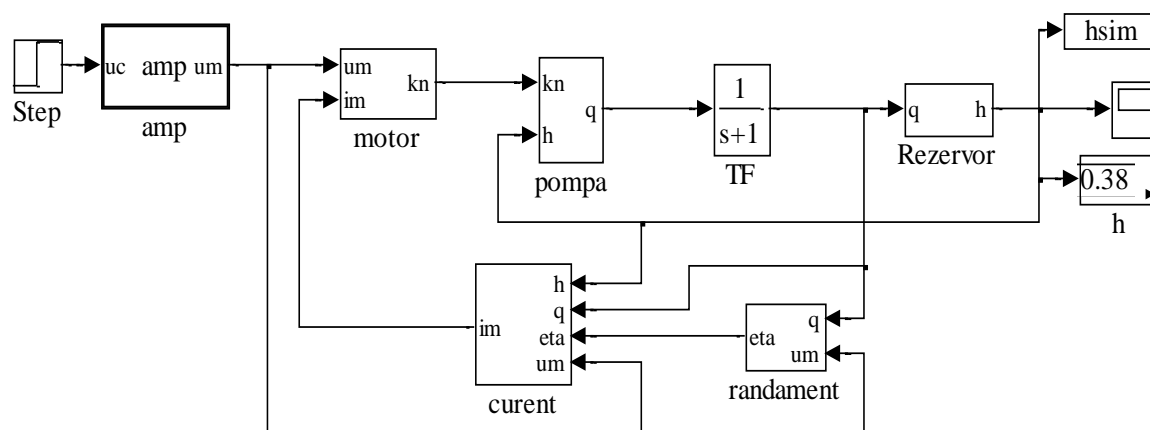
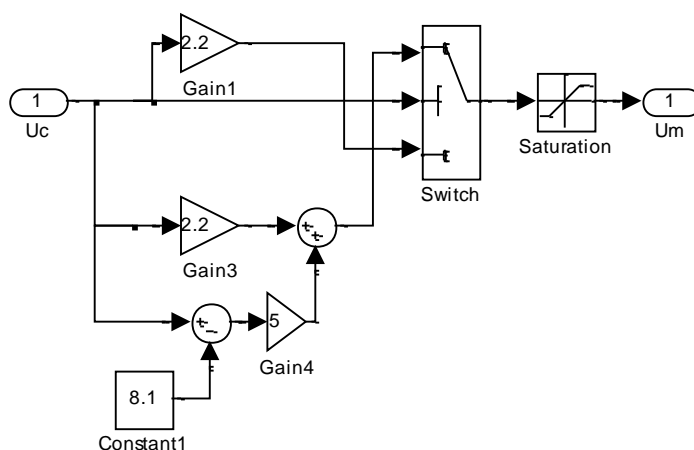
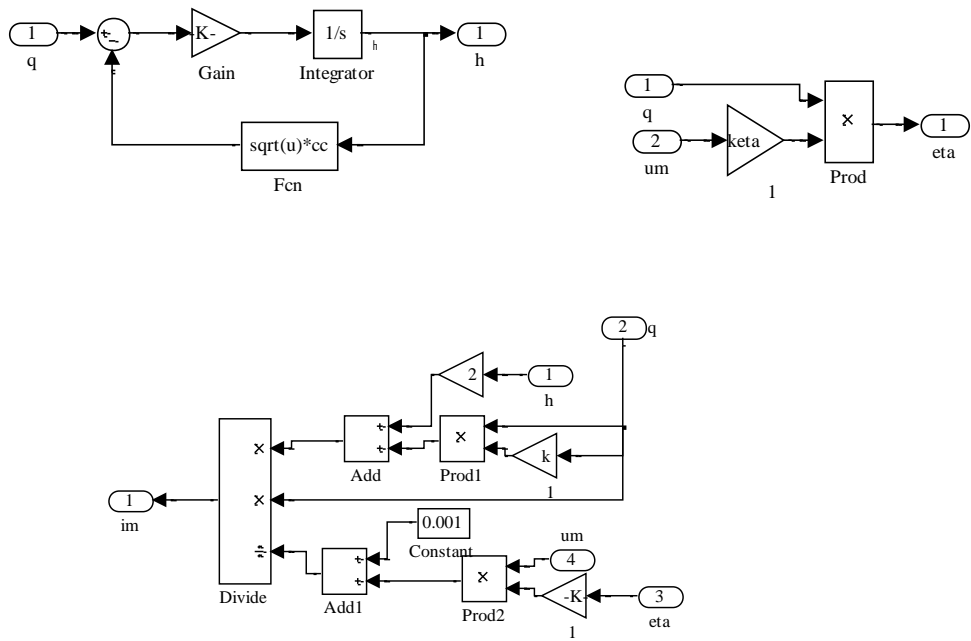


Figura 19. Modelul neliniar bazat pe subsisteme ce utilizează blocuri elementare





45

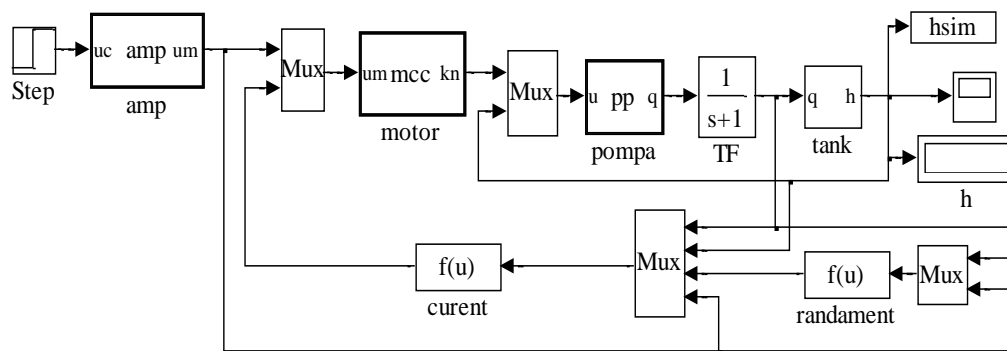


Figura 20. Modelul neliniar bazat pe Math Function sau Embedded Matlab Function

```
function q = pp(u)
% u(1)- kn aplicat la pompa
% u(2)- h inaltimea coloanei de apa in rezervor
k1=0.6241; k2=-0.015; k3=-0.0006; k=0.035;
radical=(k2^2+4*(k-k3)*k1)*u(1)^2-4*(k-k3)^2*u(2);
if radical>0
    q=(k2*u(1)+sqrt(radical))/(2*(k-k3));
else
    q=0;
end
```

```
function kn = mcc(um)
%
kn=um(1)-3*um(2)-0.3/(um(2)+0.2);
if kn<0; kn=0; end
```

```
function um = amp(uc)
%
um=2.2*(uc);
if um<0; um=0; end
if uc>8.2; um=um+5*(uc-8.2); end
if um>22.1; um=22.1; end
```

```

f(u)- curent
u[1]*(2*u[2]+k*u[1])/(u[3]*u[4]*1e4+0.1)
f(u)- randament
keta*u[1]*u[2]
```

Bibliografie

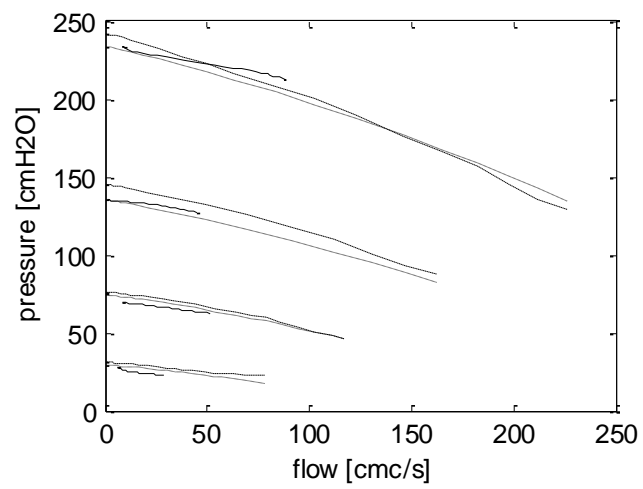
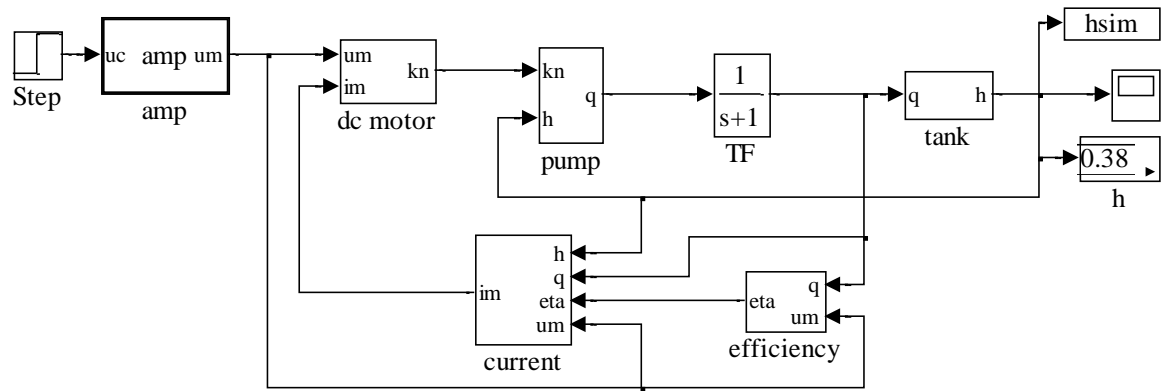
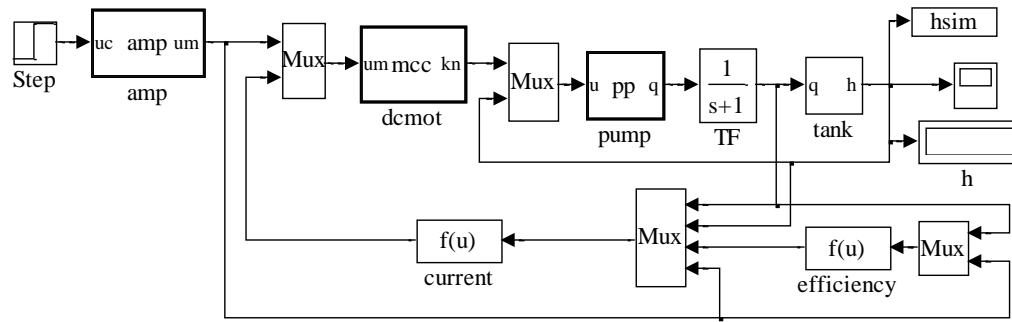
B. Wayne Bequette, Process Control: Modeling, Design and Simulation, 2002, Prentice Hall, ISBN: 0133536408

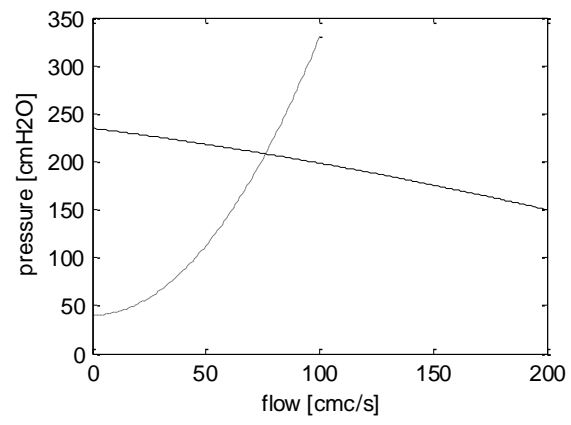
Girdhar, Paresh Moniz, Octo, Practical centrifugal pumps: design, operation and maintenance, Newnes, Elsevier, 2005, ISBN 0 7506 6273 5

Petr Horacek, Laboratory experiments for control theory courses: A survey, Annual Reviews in Control, 2000, pages 151-162

Jacek F. Gieras, Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications, CRC Press, 2009, ISBN: 9781420064407

Wellstead, P.E. 1990. "Teaching control with laboratory scale models." *IEEE Transactions on Education*, vol. 33 (August), pp 285-290.





Programul „randament”

load testfaradebitmetru10v0; % masuratori: presiune, nivel, curent pentru testarea caracteristicii pompei la o tensiune pe pompa de comanda la intrareaa amplificatorului de 10V

i=6; j=length(presiune)-1;

figure (1)

plot(tout,presiune,'m',tout,nivel,'g',tout,curent,'b')%grafic cu marimile masurate, in volti (0-10V)

%presiune

p8=(presiune(i:j)./0.48-4)/16*0.64;% domeniu senzor 0.64 barcu iesire in curent 4-20mA pe o rezistenta de 480ohmi

figure (2)

plot(p8)

pause

%debit cm3/sec

nsec=2; ku_cm=3; aria=19*17.5;

t=tout(i:j);

h=nivel(i:j)*ku_cm; % scalare nivel domeniu 0-30 cm, semnal 0-10V 3=30/10

hd=decimate(h,nsec);

td=decimate(t,nsec);

dhu=diff(hd); %pentru a calcula debitul prin inmultirea ariei cu variatia inaltimii

debitc=aria*dhu./nsec;

[nz,dz]=c2dm(1,[2 1],1);

fdebitc=filtfilt(nz,dz,debitc);% filtrare debit

hold on

plot(td(1:end-1),debitc,'k',td(1:end-1),fdebitc,'m')

hold off

pause

%randament=Ph/Pel

% $Ph[W]=q[m^3/h]*\rho[kg/m^3]*g[m/s^2]*H[m]/(3.6*10^3)$

p8d=decimate(p8,nsec);

fp8d=filtfilt(nz,dz,p8d); % filtrare presiune

Ph=3600/1000000*fdebitc.*1000*9.8.*fp8d(2:end)*10/(3.6*1000); %calcul putere hidraulica

i8d=decimate(curent(i:j),nsec); % s-a inseriat cu motorul pompei o rezistenta de 1 ohm pentru masurarea curentului (u=i)

fi8d=filtfilt(nz,dz,i8d);

Pel=21*fi8d(2:end);

figure(1)

eta=Ph./Pel;

%ea=eta*21;

plot(fdebitc,eta,'k','LineWidth',1.5)

% fisa tehnica pompa

p=[0.1 0.2 0.3]; % presiunea in bar

q=[26 19.5 9]*1000/60; % debit in l/min

ia=[1.1 1 0.75]; % curent in A la 24V tensiune pe pompa

hold on

Ph=3600/1000000*q.*1000*9.8.*p*10/(3.6*1000); %

$Ph[W]=q[m^3/h]*\rho[kg/m^3]*g[m/s^2]*H[m]/(3.6*10^3)$

Pel=24*ia;% alimentarea pompei la tensiune nominala 24V de la sursa

eta=Ph./Pel;

plot(q,eta,'k--','LineWidth',1.5)

pause

```

load randament10v; i=7;j=length(presiune);
%presiune
p8=(presiune(i:j)./0.48-4)/16*0.64;

%debit cm3/sec
t=tout(i:j);
h=nivel(i:j)*ku_cm;
hd=decimate(h,nsec);
td=decimate(t,nsec);
dhu=diff(hd);
debitc=aria*dhu./nsec;
[nz,dz]=c2dm(1,[2 1],1);
fdebitc=filtfilt(nz,dz,debitc);
hold on

%randament
p8d=decimate(p8,nsec);
fp8d=filtfilt(nz,dz,p8d);
Ph=3600/1000000*fdebitc.*1000*9.8.*fp8d(2:end)*10/(3.6*1000);
i8d=decimate(curent(i:j),nsec);%i8d=decimate(tensiune(i:j),nsec);
fi8d=filtfilt(nz,dz,i8d);
Pel=21*fi8d(2:end);
eta=Ph./Pel;
plot(fdebitc,eta,'k','LineWidth',1.5 )
hold off
ylabel('randament [%]');xlabel('debit [cmc/s]')

```