

CAPITOLUL 6

Studiul si elaborarea unor legi de conducere care sa satisfaca cerintele de performanta pentru procesele de epurare biologica – Obiectivul VII

6.1 Introducere

In cadrul acestui capitol au fost testate, atat in regim de simulare numerica, cat si in conditii reale pe statia pilot, o serie de legi de conducere, in scopul imbunatatirii indicatorilor de performanta a proceselor de epurare biologica a apelor reziduale din industria alimentara (producerea laptelui si a berii). In proiectarea legilor de control au fost utilizate modele matematice ale procesului de epurare biologica indentificate in capitolul 4. Au fost investigate doua metode de control a nivelului substantelor organice din apa uzata, si anume: controlul indirect al substratului organic, prin intermediul reglarii concentratiei de oxigen dizolvat si a concentratiei de biomasa din bioreactorul aerat, si controlul direct al nivelului substratului organic. Nivelul inferior de control (buclele de temperatura, pH, nutrienti) au fost tratate in cadrul etapei anterioare a grantului.

Activitatea VII.1:

Elaborarea unor legi de conducere care sa satisfaca cerintele de performanta pentru procesele de epurare biologica cu validare in regim de simulare numerica

In cadrul acestei activitati au fost testate prin simulare numerica o serie de metode clasice si avansate pentru controlul principalelor marimi din cadrul proceselor de epurare biologica a apelor uzate. Astfel, au fost investigate: control utilizand regulator de tip PI, controlul robust utilizand metoda QFT, controlul predictiv, controlul liniarizant exact si adaptiv.

6.2 Controlul concentratiei de oxigen dizolvat in bazinul aerat

6.2.1 Controlul clasic utilizand regulator de tip PI

a) Aspecte teoretice

In controlul concentratiei de oxigen dizolvat din bioreactorul aerat se va utiliza un regulator de tip PI (proportional – integrator) ce are functia de tranfer:

$$H(s) = K_p \frac{1}{T_I s} + 1 \quad (6.1)$$

unde K_p se numește factor de proportionalitate, iar T_I se numește constanta de timp de integrare

În cazul utilizării unui regulator de tip PI una din probleme ce trebuie realizată este implementarea unei tehnici anti-saturare (anti-windup). În cazul instalațiilor tehnologice elementele de execuție au o comandă limitată într-un domeniu de variație, așa cum este prezentat și în Figura 6.1. Atunci când se utilizează un regulator de tip PI, în momentul saturării comenzii componenta integrală continuă să integreze, deși comanda este limitată. Aceasta face ca starea integratorului să atingă valori foarte mari, conducând la obținerea unor întârzieri în dinamica răspunsului regulatorului. Pentru eliminarea acestui neajuns se folosesc scheme anti-windup. Una din metodele clasice anti-windup este de oprire a acțiunii integrale atunci când elementul de execuție se află în saturare, iar schema Simulink de implementare a ei este prezentată în Figura 6.2. În această schemă în momentul în care între comanda calculată și cea care se aplică procesului (după ce trece prin elementul de saturare) se observă o diferență (comanda a intrat în saturare), componentei integrale i se aplică valoarea 0. În acest caz componenta integrală își va păstra aceeași valoare ca aceea la momentul intrării comenzii în saturare.

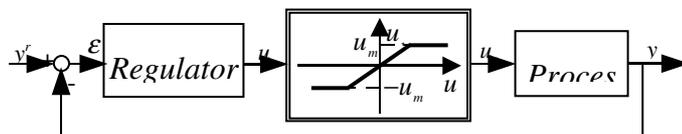


Fig. 6.1. Bucla de reglare cu saturarea comenzii

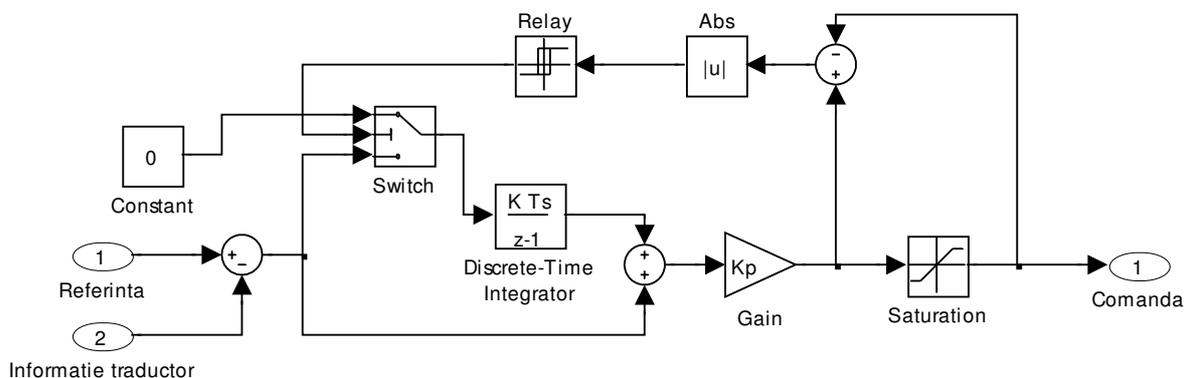


Fig. 6.2. Schema unui regulator PI cu mecanism de anti-windup

b) Controlul concentratiei de oxigen dizolvat in bazinul aerat in regim de simulare numerica

Pentru sinteza unui regulator de tip PI a fost necesara identificarea buclei debit de aer – concentratie de oxigen dizolvat cu un element liniar. Astfel in cadrul Experimentului Nr. 5, efectuat pe apa uzata provenita din industria laptelui, a fost aplicata o treapta negativa asupra marimii de intrare (debitul de aer), reprezentata in Figura 6.3, urmarindu-se evolutia marimii de iesire (concentratia de oxigen dizolvat), reprezentata in Figura 6.4. Din Figura 6.4 se observa ca evolutia concentratiei de oxigen dizolvat in cazul aplicarii unei trepte asupra marimii de intrare este asemanatoare cu a unui element aperiodic. In aceste conditii, bucla debit aer – concentratie de oxigen dizolvat va fi identificata cu o functie de transfer de ordinul 1 de forma:

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (6.2)$$

unde K este factorul de amplificare, iar T este constanta de timp a elementului.

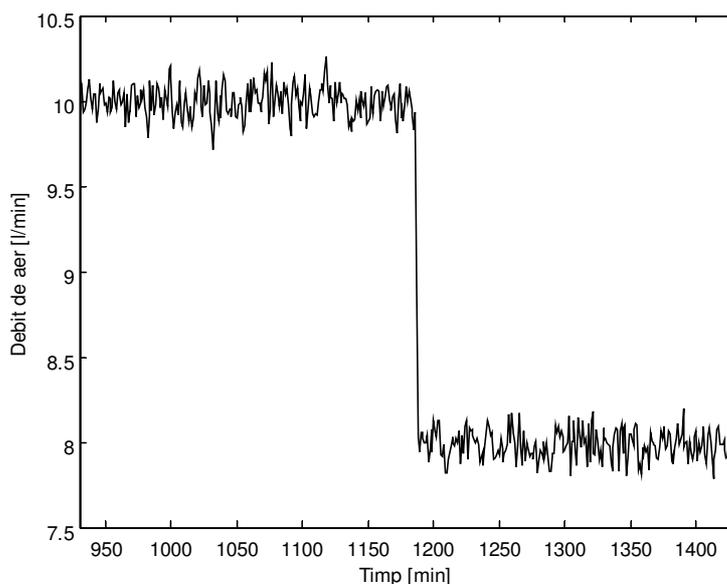


Fig. 6.3. Aplicarea unei trepte negative asupra debitului de aer

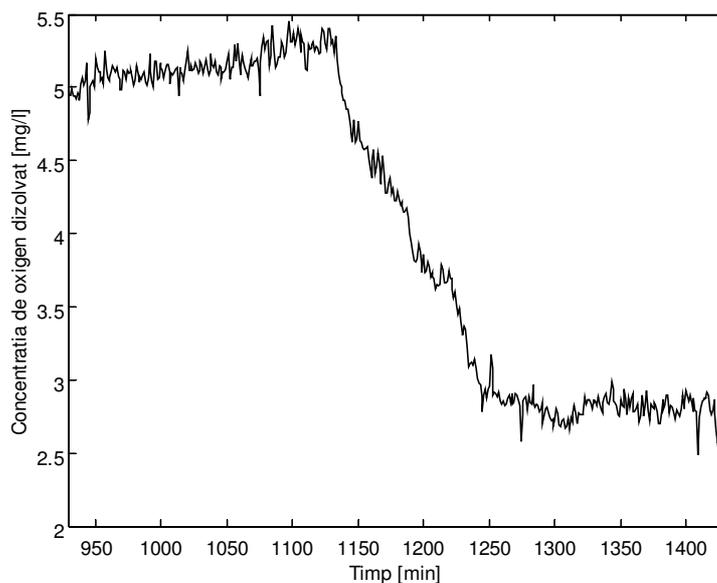


Fig. 6.4. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat in urma aplicarii unei trepte negative de debit de aer

Cele doua constante se determina din evolutia marimii iesire si ele au fost determinate ca fiind: $K = 1.1$, $T = 2100$ sec .

Utilizand interfata grafica *rttool* din MATLAB, pentru elementul linear identificat anterior, a fost proiectat un regulator de tip PI cu parametrii: $K_p = 5$ si $T_I = 0.002$. Acest regulator a fost testat in simulare pe elementul de ordinul 1, element ce descrie evolutia oxigenului dizolvat. Rezultatele de simulare obtinute sunt prezentate in Figurile 6.5 – 6.6. In Figura 6.5 este prezentata cu linie continua evolutia concentratiei de oxigen dizolvat, iar cu linie punctata referinta impusa. Din figura se observa ca bucla proiectata are o comportare foarte buna, suprareglarea fiind aproximativ 16%, iar timpul de raspuns de aproximativ 1900 secunde. In Figura 6.6 este prezentata evolutia comenzii (debitul de aer).

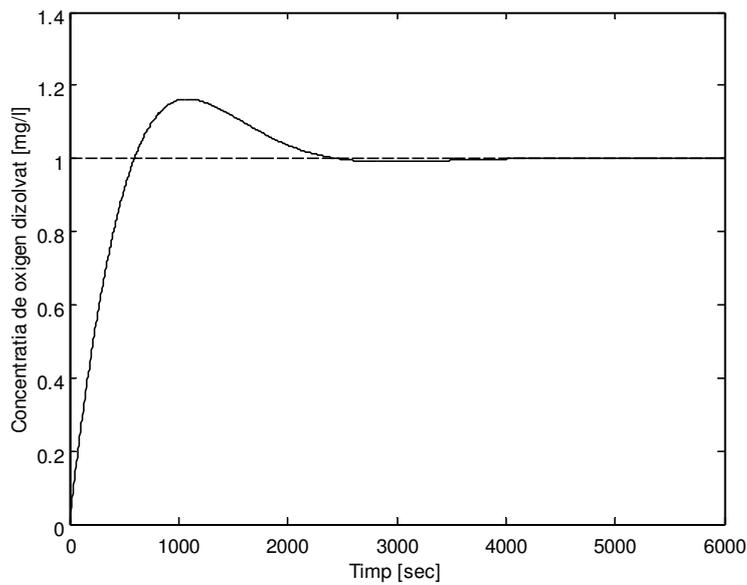


Fig. 6.5. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat (linie continua) in raport cu referinta (linie intrerupta)

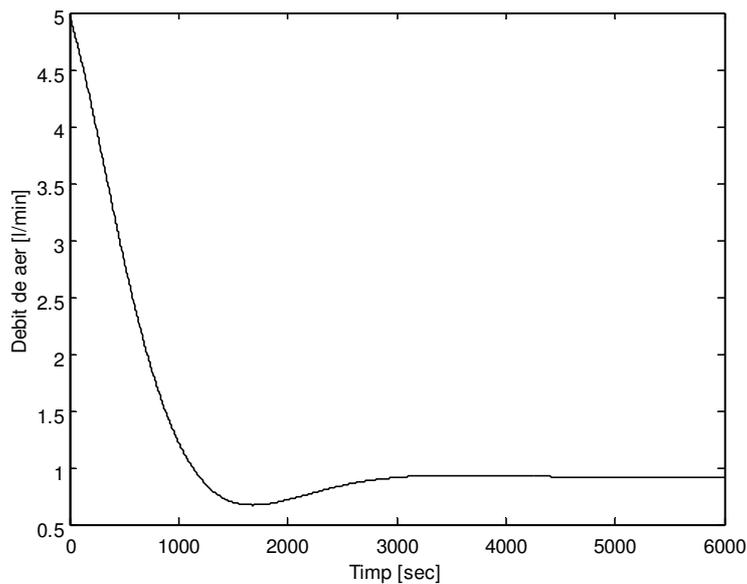


Fig. 6.6. Evolutia marimii de comanda

Pentru a vedea importanta mecanismului anti-windup s-au realizat doua simulari in care comanda intra in saturatie. In prima dintre simulari regulatorul PI nu are mecanism wind-up, in timp ce in cea de a doua s-a prevazut un astfel de mecanism. Rezultatele simularii sunt prezentate in Figurile 6.7 – 6.8. Din Figura 6.7 se observa ca datorita lipsei unui mecanism antiwind-up marimea de iesire are o intarziere in dinamica si, deasemenea, se obtine o suprareglare peste limitele acceptabile. In Figura 6.8 este prezentata evolutia comenzii, observandu-se ca in cazul prezentei mecanismului wind-up comanda ramane saturata o perioada mult mai scurta, deci dinamica buclei in acest caz va fi mai buna comparativ cu bucla in care lipseste acest mecanism.

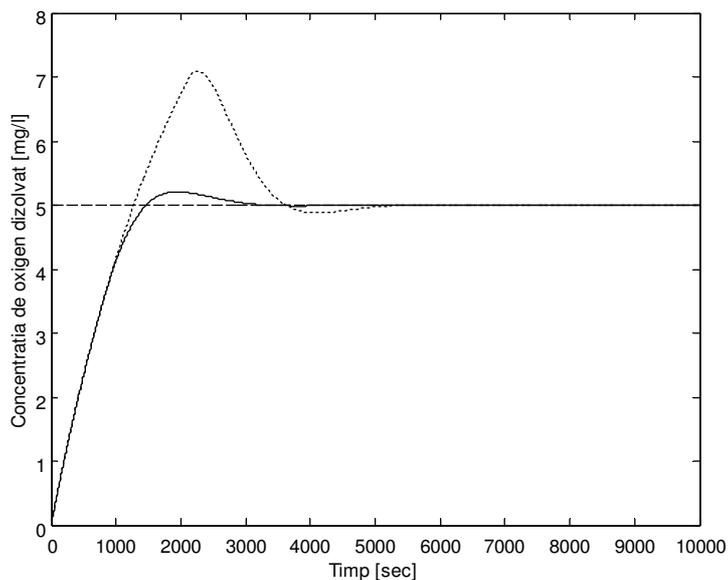


Fig. 6.7. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat: linie continua – in prezenta unui mecanism anti-windup, linie punctata – fara mecanism anti-windup

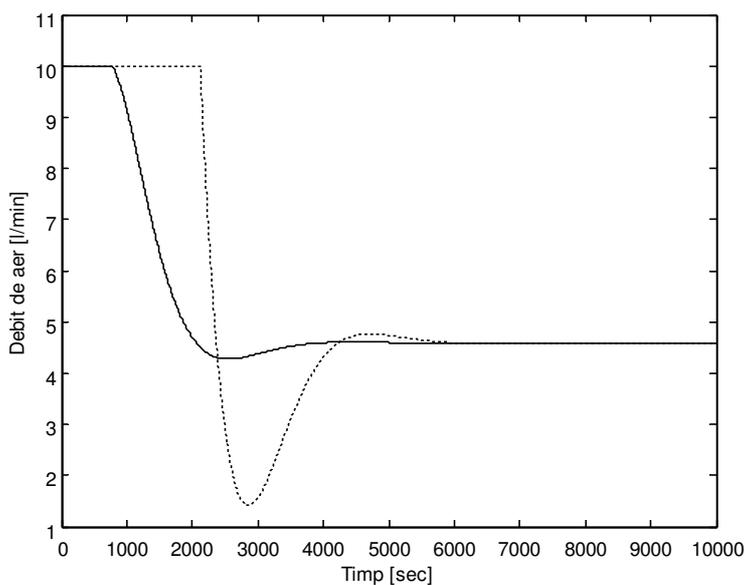


Fig. 6.8. Evolutia marimii de comanda: linie continua – in prezenta unui mecanism anti-windup, linie punctata – fara mecanism anti-windup

6.2.2 Controlul robust utilizand metoda QFT

a) Aspecte teoretice

QFT (Quantitative Feedback Theory) este o metoda de control robust propusa in 1973 de catre Profesorul Horowitz și conceputa pentru controlul proceselor descrise prin modele

liniare cu parametri variabili [Hor73]. QFT este o tehnică frecvențială ce utilizează caracteristicile Nichols pentru asigurarea unei proiectări robuste asupra unei zone specificate de incertitudine a procesului. Metoda poate fi aplicată și în cazul proceselor neliniare prin liniarizare acestora în jurul a mai multe puncte de funcționare. Rezultă un model liniar cu parametri variabili ce descrie comportarea procesului neliniar în fiecare punct din cadrul domeniului de funcționare. Limitele de variație ale parametrilor modelului liniar obținut pot fi lărgite pentru a încorpora și efectul incertitudinilor parametrice ce afectează procesul neliniar. Pentru acest model liniar se proiectează apoi un controler robust utilizând metoda QFT.

Pentru a ilustra proiectarea robustă cu metoda QFT se consideră un sistem cu funcția de transfer:

$$H(s) = \frac{Ka}{s(s+a)} \quad (6.3)$$

unde parametrii K și a variază, datorită condițiilor de operare, astfel: $K \in [K_{\min}, K_{\max}]$ și $a \in [a_{\min}, a_{\max}]$. În zona de operare, variația parametrilor modelului procesului condus este prezentată în Figura 6.9. Zona hașurată reprezintă zona incertitudinilor parametrice structurate. Sistemul poate fi reprezentat prin 4 funcții de transfer liniare și invariante.

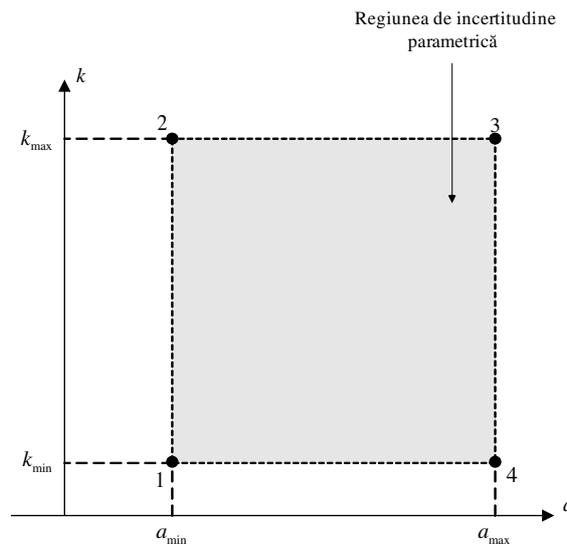
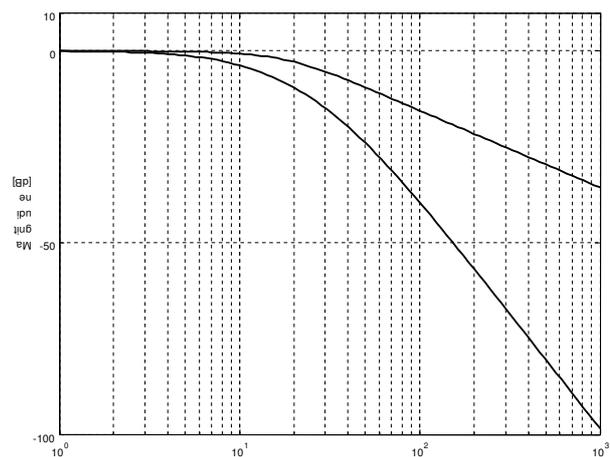
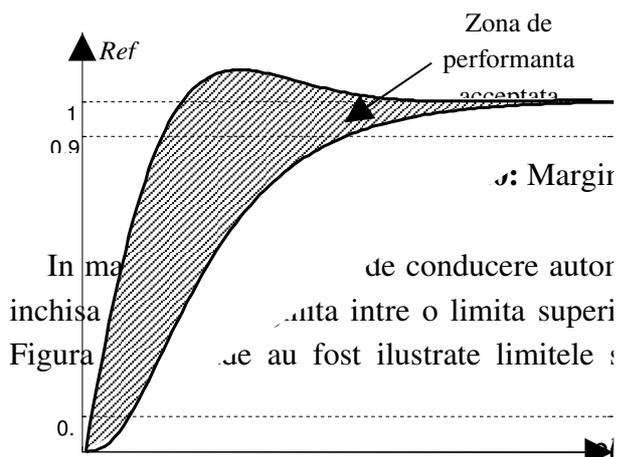


Figura 6.9: Regiunea incertitudinii parametrice



semnal treaptă. Similar, tot în Figura 6.10 au fost reprezentate, în domeniul frecvenței, aceleași limite ale specificațiilor de performanță ale buclei de reglare.

Se consideră sistemul prezentat în Figura 6.11, unde $G(s)$ este compensatorul, $F(s)$ este un prefiltru, iar $P(s)$ este procesul. Metoda QFT constă în sintetizarea unui compensator $G(s)$ și a unui prefiltru $F(s)$ astfel încât comportarea sistemului în buclă închisă să se încadreze între marginile impuse sistemului.

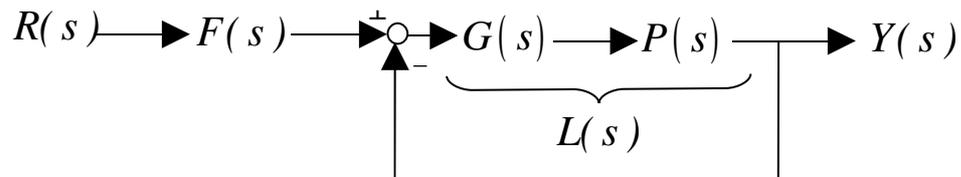


Figura 6.2.11: Sistem liniar compensat

Etapile proiectării robuste utilizând metoda QFT pentru o problemă de urmărire sunt [Hou99]:

- # **Pas 1:** Sintetizarea modelului de urmărire dorit.
- # **Pas 2:** Descrierea procesului liniarizat printr-un set de N modele liniare, invariante, care definesc incertitudinea parametrică a modelului.
- # **Pas 3:** Obținerea șabloanelor, la frecvențe specificate, ce descriu grafic regiunea de incertitudine parametrică a procesului pe caracteristica Nichols.
- # **Pas 4:** Selectarea procesului nominal $P_0(s)$.
- # **Pas 5:** Determinarea conturului de stabilitate – conturul U – pe caracteristica Nichols.
- # **Pas 6:** Determinarea marginilor de urmărire robustă pe caracteristica Nichols.
- # **Pas 7:** Determinarea marginilor optime pe caracteristica Nichols.
- # **Pas 8:** Sintetizarea transmisiei buclei nominale $L_0(s) = G(s)P_0(s)$ care satisface conturul de stabilitate și marginile de urmărire.
- # **Pas 9:** Sintetizarea prefiltrului $F(s)$.

În continuare sunt prezentați pașii următori pentru aplicarea metodei QFT.

Sintetizarea modelului de urmărire

Sintetizarea modelului de urmărire constă din definirea specificațiilor de performanță prin două funcții de transfer liniare și invariante, care delimitează limitele superioară și inferioară de proiectare. În acest mod se impun o serie de performanțe sistemului în buclă închisă ce va rezulta în urma proiectării. Performanțele se referă la timpul de creștere, timpul de răspuns și

Universitatea „Dunarea de Jos” Galati – Capitolul 6: Studiul și elaborarea unor legi de conducere care să satisfacă cerințele de performanță pentru procesele de epurare biologică suprareglare.

Specificatiile de urmărire robustă se referă la sistemul de urmărire care, în buclă închisă, are funcția de transfer:

$$H_u(s) = \frac{F(s)G(s)P(s)}{1+G(s)P(s)} = \frac{F(s)L(s)}{1+L(s)} \quad (6.4)$$

Deoarece parametrii modelului liniar se modifică în funcție de regimul de funcționare, caracteristicile sistemului în buclă închisă vor avea anumite variații. Se dorește ca aceste variații să se încadreze între anumite limite, definite de o caracteristică de amplificarea „superioară” și una „inferioară”:

$$|H_{ri}(j\omega)| \quad |H_u(j\omega)| \quad |H_{rs}(j\omega)| \quad (6.5)$$

în care, de obicei, modelul superior de urmărire corespunde răspunsului unui sistem de ordinul doi cu suprareglare, în timp ce modelul de urmărire inferior corespunde unui răspuns aperiodic. Astfel, $H_{ri}(s)$ și $H_{rs}(s)$ au expresiile de forma:

$$H_{rs}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6.6)$$

$$H_{ri}(s) = \frac{a_1 a_2}{(s + a_1)(s + a_2)} \quad (6.7)$$

unde trebuie ținut cont de restricția privind coeficientul static de transfer, ce trebuie să fie întotdeauna egal cu 1. Astfel, la fiecare frecvență ω_i se asigură o bandă de trecere $\delta_u(j\omega_i)$, așa cum se prezintă și în Figura 6.12.

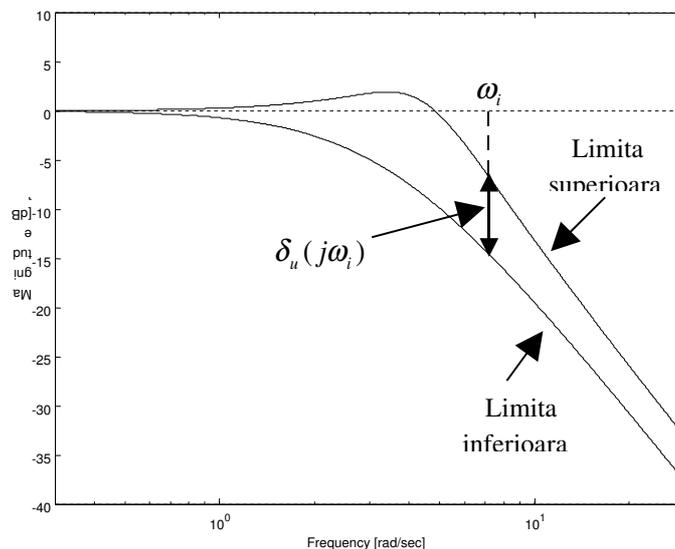


Figura 6.12: Caracteristicile Bode ale limitelor superioară și inferioară

În funcția de transfer a limitei superioare se poate introduce un zero situat în apropierea originii și cu efect cât mai mic asupra timpului de răspuns. Acest zero are rolul de a mări banda de trecere $\delta_u(j\omega_i)$ la frecvențe mari. Banda poate fi mărită și mai mult prin adăugarea unui pol apropiat de origine și care nu modifică semnificativ timpul de răspuns în funcția de transfer a limitei inferioare. Prin introducerea acestor elemente suplimentare se urmărește încadrarea mai ușoară a incertitudinilor parametrice în zona frecvențelor mari și, deci, o simplificare a problemei de sinteză a prefiltrului $F(s)$. Noile funcții de transfer obținute sunt:

$$H_{rs}(s) = \frac{(\omega_n^2 / a_1)(s + a_1)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6.8)$$

$$H_{ri}(s) = \frac{a_1 a_2 a_3}{(s + a_1)(s + a_2)(s + a_3)} \quad (6.9)$$

Mărirea benzii de trecere la frecvențe mari poate fi observată și din Figura 6.13, în care s-au reprezentat atât limitele inițiale date de ecuațiile (6.6)-(6.7) (cu linie punctată), cât și cele noi, date de ecuațiile (6.8)-(6.9) (cu linie continuă).

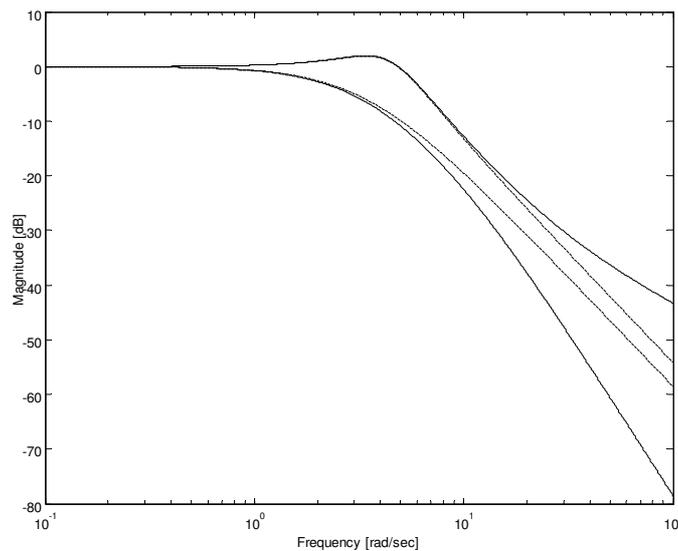


Figura 6.13: Caracteristicile Bode ale limitelor superioară și inferioară (linie punctată – limitele inițiale, linie continuă – noile limite)

N modele liniare invariante

Se descrie procesul liniarizat printr-un set de N modele liniare, invariante, care definesc incertitudinea parametrică a modelului. Limitele de variație ale modelului liniar sunt determinate de plaja regimurilor de funcționare și de incertitudinile parametrice ale modelului neliniar (Figura 6.9). Se definește variația amplificării datorată incertitudinii parametrice și pe diagramele Bode ale celor N modele liniare.

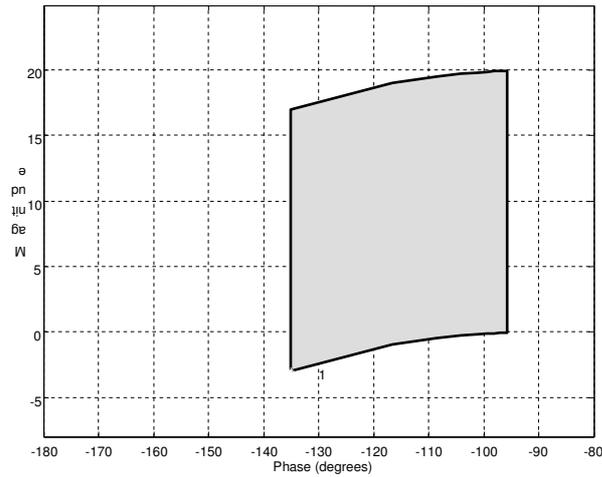


Figura 6.14: Șablonul modelului pentru $\omega = 1$ rad/sec

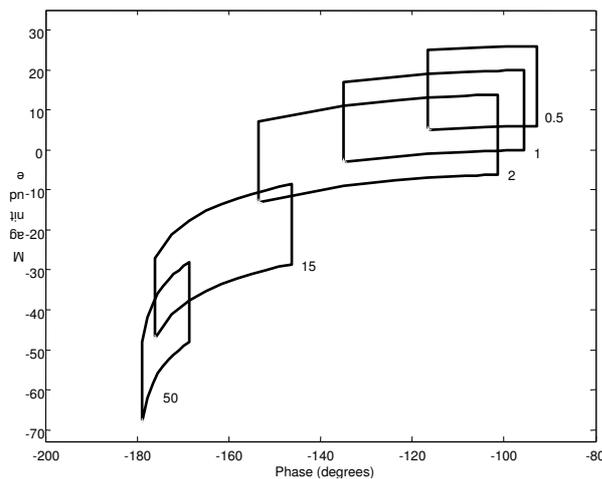


Figura 6.15: Șabloanele modelului pentru diferite frecvențe de interes ($\omega = [0.5 \ 1 \ 2 \ 15 \ 50]$ rad/sec)

Șabloanele procesului

Cele N caracteristici (amplificare și faza) ale modelelor considerate se reprezintă pe diagrama Nichols, pentru fiecare valoare a frecvenței. Aceste N puncte definesc un contur închis, denumit *șablon*, care delimitează plaja de variație a incertitudinii parametrice. În Figura 6.14 este prezentat un șablon al modelului pentru o frecvență ($\omega = 1$ rad/sec), iar în Figura 6.15 sunt prezentate șabloanele modelului rezultate pentru diferite frecvențe din domeniul de interes.

Procesul nominal $P_0(s)$

Deși poate fi ales orice proces, în practică se alege procesul al cărui punct de pe caracteristica Nichols reprezintă colțul din stanga jos al șabloanelor, pentru toate frecvențele utilizate.

Conturul de stabilitate – conturul U

Specificatiile de performanță referitoare la stabilitate și urmărirea robustă definesc limitele între care poate varia funcția de transfer a sistemului de urmărirea, atunci când modelul liniar variază în regiunea de incertitudini. Stabilitatea buclei de reacție, indiferent de modul cum variază parametrii modelului în regiunea de incertitudini, este asigurată de specificatiile de stabilitate. Funcția de transfer a buclei închise este:

$$H_0(s) = \frac{G(s)P(s)}{1+G(s)P(s)} = \frac{L(s)}{1+L(s)} \quad (6.10)$$

Se dorește ca, în banda de frecvențe considerată, caracteristicile de amplificarea aferente funcției de transfer în bucla închisă să nu depășească o valoare limită superioară, α_B :

$$|H_0| = \left| \frac{GP}{1+GP} \right| M_L \quad (6.11)$$

În aceste condiții, pe caracteristica Nichols se stabilește o zonă care nu poate fi penetrată de șabloane și de funcțiile de transmisie ale buclei $L(j\omega)$, oricare ar fi frecvența ω . Această zonă este mărginită de conturul M_L ($LmM_L = 20\log_{10} M_L$). În figura 6.16 porțiunea *efag* reprezintă conturul M_L . Astfel, conturul *efa*, determinat pornind de la conturul M_L , devine parte a conturului de stabilitate, numit și conturul U .

Pentru o largă clasă de probleme, atunci când ω se obține ca:

$$\lim_{\omega} [P(j\omega)] = \frac{K'}{\omega^\lambda} \quad (6.12)$$

unde λ reprezintă excesul poli-zero-uri al procesului $P(s)$. Șablonul corespunzător unei astfel de clase de probleme este dat de o linie verticală egală cu:

$$\Delta = \lim_{\omega} [LmP_{\max} - LmP_{\min}] = LmK'_{\max} - LmK'_{\min} = V \text{ dB} \quad (6.13)$$

În aceste condiții porțiunea *bcd* din conturul U se obține prin translatarea în jos a porțiunii *age* a conturului M_L cu V dB (Figura 6.16). Acest lucru va asigura practic ca toate cele N procese considerate, inclusiv cele aflate la extrem, din punct de vedere al amplificării, nu intersectează conturul de stabilitate. Porțiunile *ab* și *ed* din conturul U , care nu sunt neapărat linii drepte, trebuie să satisfacă și cerințele de stabilitate și pe cele de urmărirea robustă, iar determinarea lor va fi prezentată în cadrul paragrafului continuând determinarea marginilor de urmărirea.

De obicei, $M_L < 2dB$, iar, in continuare, valoarea aleasa va fi: $M_L = 1.6dB$. Marginile de stabilitate se determina utilizand un vector de pulsatii care sa cuprinda zona de interes. Aceste margini difera de la o pulsatie la alta. In figura 6.17 au fost ilustrate marginile de stabilitate ale modelului liniar dat prin ecuatiea (6.3).

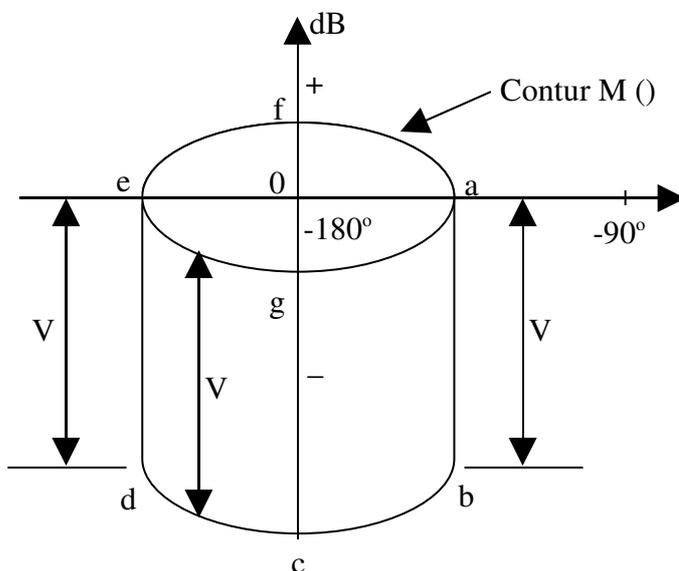


Figura 6.16: Construirea conturului de stabilitate

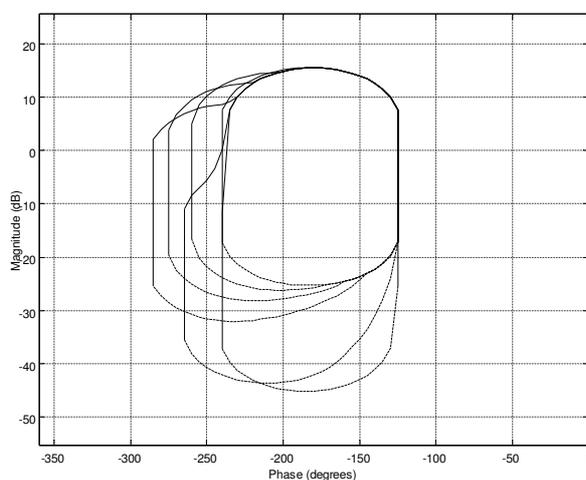


Figura 6.17: Contururile de stabilitate corespunzatoare modelului dat prin ecuatiea (6.3)

Marginile de urmarire robusta

Marginile de urmarire robusta trebuie sa asigure, la fiecare frecventa aleasa, ca plasarea transmisiei buclei pe aceasta margine sau deasupra ei asigura respectarea conditiei de urmarire robusta impusa prin ecuatiea (6.5), ceea ce inseamna practic ca, pentru fiecare

frecvență, diferența dintre amplificarea punctelor extreme de pe șablonul procesului trebuie să fie mai mică sau cel mult egală cu banda de trecere $\delta_u(j\omega_i)$.

Determinarea unui punct al marginii de urmărire se face pe baza pașilor prezentați mai jos și este prezentată grafic în Figura 6.18:

- Se trasează șablonul procesului pe caracteristica Nichols continuând și conturul M_L stabilit pentru marginea de stabilitate;
- Se selectează punctul A, aflat în colțul din stânga jos al șablonului, care reprezintă procesul nominal;
- Se plasează șablonul deasupra liniei corespunzătoare unui unghi, de exemplu unghiul -90° ;
- Se deplasează șablonul în sus sau jos până când diferența $\Delta LmT_u(j\omega_i)$ dintre două valori ale unor contururi M (în $Lm \alpha$ și $Lm \beta$) este egală cu valoarea $\delta_u(j\omega_i)$;
- Punctul A devine punct al marginii de urmărire;
- Procedura se repetă pentru liniile corespunzătoare fiecărui unghi sau până când șablonul devine tangent la conturul M_L .
- Prin reunirea acestor puncte rezultă marginea de urmărire robustă corespunzătoare unei anumite frecvențe. Procedura se reia pentru fiecare din frecvențele de interes, reuniunea acestora determinând marginile de urmărire robuste.

Dacă șablonul ar fi mutat la stânga, el ar intersecta conturul M_L , violând practic conturul de stabilitate. Punctul rezultat la tangenta dintre șablon și conturul M_L (punctul A') face parte din segmentul ab al conturului de stabilitate. Similar se determină și segmentul ed al conturului U.

În Figura 6.19 au fost ilustrate marginile de urmărire robuste ale modelului liniar dat de ecuația (6.3) și pentru care s-au considerat următoarele modele limita:

$$H_{rs}(s) = \frac{0.6584(s+30)}{s^2+4s+19.753} \quad (6.14)$$

$$H_{ri}(s) = \frac{120}{(s+3)(s+4)(s+10)} \quad (6.15)$$

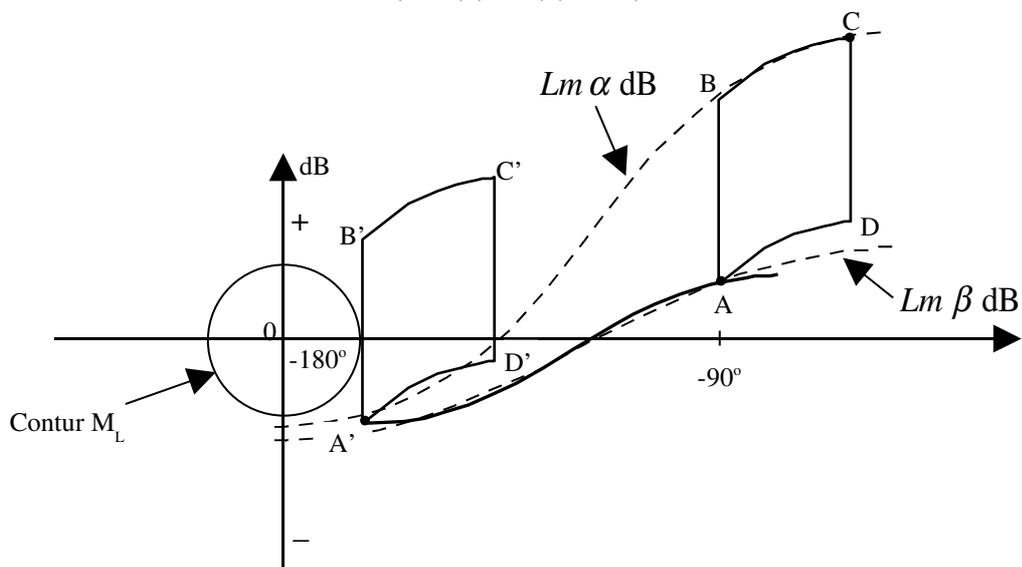


Figura 6.18: Construirea marginilor de urmărire robustă

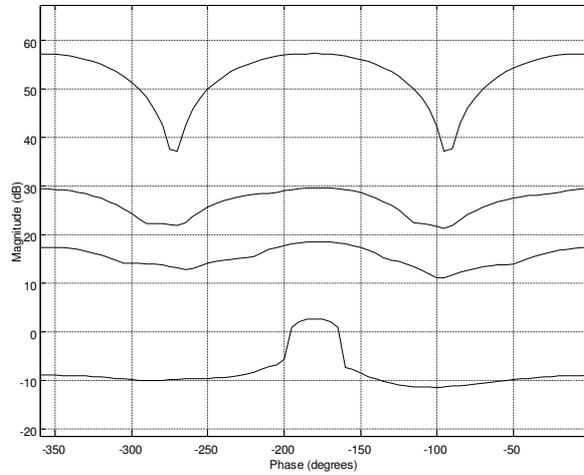


Figura 6.19: Marginile de urmărire robustă corespunzătoare modelului dat prin ecuația (6.3)

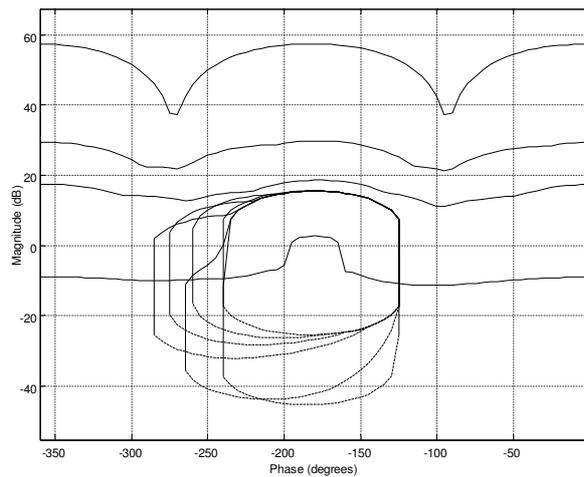


Figura 6.20: Suprapunerea marginilor de urmărire și a conturilor de stabilitate
Marginile de urmărire optime

Mai întâi are loc suprapunerea conturilor de stabilitate și a marginilor de urmărire robuste pentru frecvențele considerate de interes (Figura 6.20). Marginile de urmărire optime se obțin din intersecția celor două tipuri de contururi stabilite la fiecare frecvență, ținând cont de restricțiile ce se impun transmisiei buclei. Astfel, conturul de stabilitate rezultat la o anumită frecvență nu poate fi violat, deci vor fi considerate doar porțiunile din marginea de urmărire ce nu se află în interiorul conturului de stabilitate (Figura 6.21). Determinarea conturilor de stabilitate, a marginilor de urmărire robustă și a marginilor de urmărire optime s-a făcut utilizând toolboxul QFT din Matlab®.

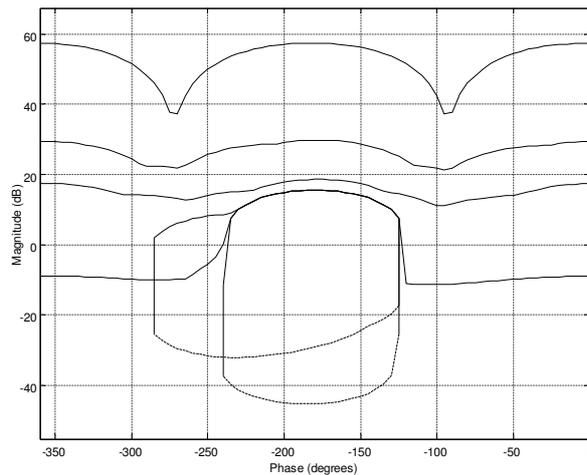


Figura 6.21: Marginile de urmarire optime

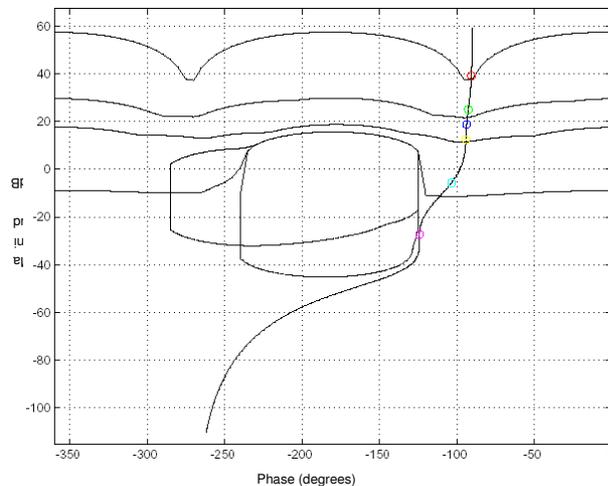


Figura 6.22: Sintetizarea regulatorului $G(s)$

Sintetizarea regulatorului robust

Pornind de la marginile de urmarire optime, pe diagrama Nichols, se reprezinta și transmisia pe bucla nominala, $L_0(s) = G(s) P_0(s)$, corespunzatoare modelului nominal $P_0(s)$, plecandu-se de la o expresie initiala a regulatorului $G(s)$. Transmisia pe bucla se sintetizeaza astfel incat sa nu penetreze contururile de stabilite, iar valorile amplificarii trebuie sa se gaseasca pe sau deasupra marginilor de urmarire robusta corespunzatoare pulsatiei considerate.

In figura 6.22 sunt reprezentate marginile optime și transmisia pe bucla nominala, care a fost obtinuta in forma ei finala. Se observa ca valorile transmisiei in bucla, pentru cele șase pulsatii considerate, sunt marcate distinct, respectandu-se conditia ca primele patru sa se afle deasupra marginilor de urmarire corespunzatoare.

Sinteza prefiltrului

În Figura 6.23 este prezentată caracteristica Bode în buclă închisă fără filtru. Se observă că banda definită de limitele de urmărire ale sistemului în buclă închisă (liniile continue) este mai îngustă decât banda definită de limitele specificațiilor de performanță (liniile punctate), dar caracteristica Bode evoluează și în afara limitelor impuse de specificațiile de performanță.

Pentru a aduce sistemul în interiorul anvelopei definite de limitele specificațiilor de performanță se folosește filtrul $F(s)$. În Figura 6.24 este prezentată caracteristica Bode în buclă închisă cu compensator și filtru. Se observă că sistemul respectă atât specificațiile de performanță ale urmăririi (banda definită de liniile continue este mai mică decât banda definită de liniile punctate), cât și cele de stabilitate robustă (anvelopa definită de liniile continue se află în interiorul anvelopei definite de liniile punctate). Astfel, sistemul de urmărire în buclă închisă respectă specificațiile de stabilitate și urmărire robustă în plaja de variație a incertitudinilor parametrice ale modelului.

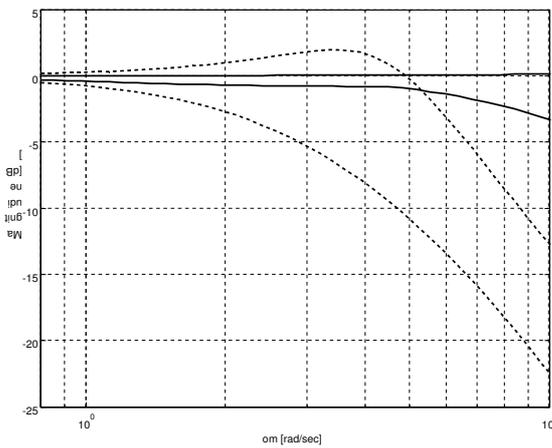


Figura 6.23: Răspunsul sistemului în buclă închisă cu compensator

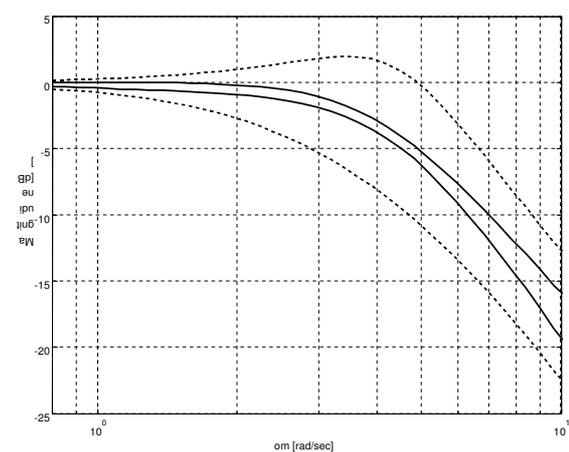


Figura 6.24: Răspunsul sistemului în buclă închisă cu compensator și filtru

b) Controlul concentrației de oxigen dizolvat în bazinul aerat în regim de simulare numerică utilizând metoda robustă QFT

Metoda robustă QFT permite controlul proceselor liniare cu parametri variabili. În cazul buclei de oxigen dizolvat a proceselor de tratare a apelor uzate cu namol activ principala incertitudine este cauzată de activitatea microorganismelor din bazinul aerat, aceasta putând varia în raport cu diverși parametri: debitul și concentrația influentului, temperatura, pH etc. În aceste condiții, s-a considerat că procesul de aerare va fi descris printr-un proces liniar de

ordinul 1, precum cel din ecuația (6.2), dar în care parametrii acestuia variaza în raport cu punctul de funcționare în care se afla procesul. Limitele de variație ale parametrilor au fost luate simetric față de parametrii identificați experimental în cadrul paragrafului 6.2.1. Astfel se considera următoarele limite de variație pentru parametrii procesului: K [0.8 1.4], T [1700 2500].

Ținând cont de limitele de variație ale parametrilor modelului liniar considerat mai sus, au fost stabilite cele două modele de urmărire (marginile inferioară și superioară):

$$H_{rs} = \frac{10(s+0.1)}{(s+0.007-j0.007)} \quad (6.16)$$

$$H_{ri} = \frac{1}{(300s+1)(310s+1)(30s+1)} \quad (6.17)$$

Pe baza modelului liniar cu parametri variabili considerat și a modelelor de urmărire, date de ecuațiile (6.16) și (6.17), au fost determinate: conturul de stabilitate (Figura 6.25), marginile de urmărire robustă (Figura 6.26), suprapunerea conturilor de stabilitate și a marginilor de urmărire (Figura 6.27), iar, în final, marginile de urmărire optime (Figura 6.28) ce vor fi utilizate în proiectarea regulatorului $G(s)$.

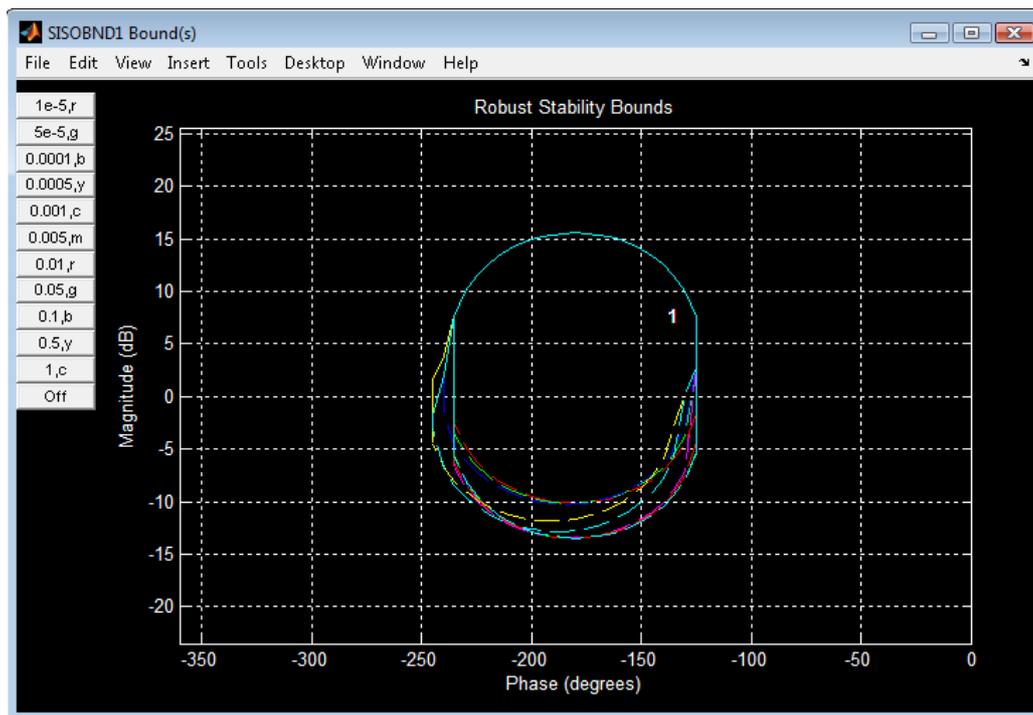


Figura 6.25: Contururile de stabilitate

Figura 6.29 prezintă rezultatul proiectării controlerului $G(s)$. Din figura se poate observa cum caracteristica Black-Nichols a sistemului în buclă deschisă respectă contururile de stabilitate și marginile de urmărire pentru fiecare frecvență considerată în proiectarea controlerului. Funcția de transfer a controlerului este următoarea:

$$G(s) = \frac{0.22143 (s + 0.00039)}{s (s + 0.01217)} \quad (6.18)$$

În Figura 6.30 sunt prezentate rezultatele obținute în urma proiectării prefiltrului. Din figura se poate observa că modelele considerate în procedura de proiectare QFT sunt încadrate de modelele de urmărire (limitele inferioară și superioară). Funcția de transfer a prefiltrului este următoarea:

$$F(s) = \frac{0.0068}{(s + 0.0068)} \quad (6.19)$$

Toolboxul QFT din Matlab® permite, de asemenea, verificarea condițiilor de stabilitate. Astfel, în Figura 6.31 este prezentat rezultatul verificării condiției de stabilitate pentru sistemul în buclă închisă cu controlerul obținut anterior. În figura specificația de stabilitate este dată cu linie punctată, în timp ce caracteristica Bode a sistemului în buclă închisă apare cu linie continuă. Din figura se observă că regulatorul proiectat anterior îndeplinește condiția de stabilitate.

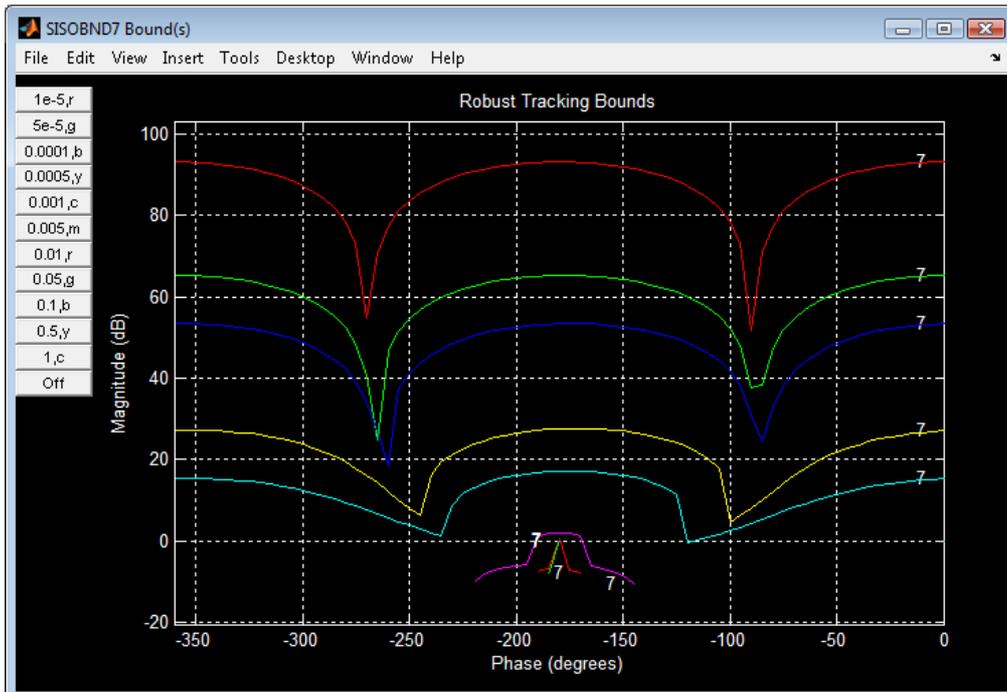


Figura 6.26: Marginile de urmărire robustă

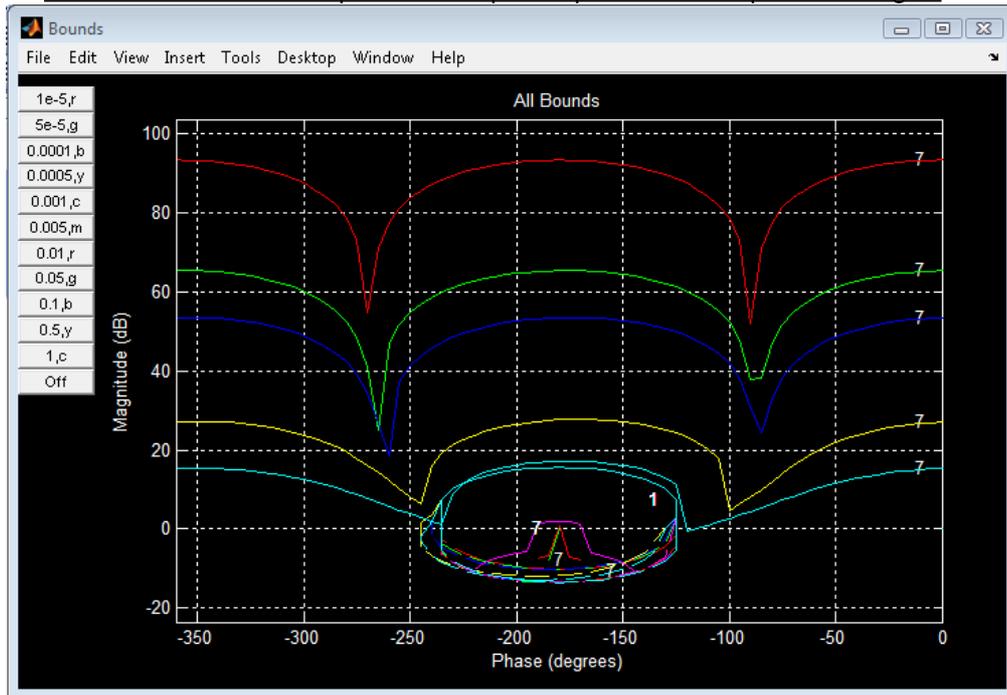


Figura 6.27: Suprapunerea marginilor de urmarire și a conturilor de stabilitate

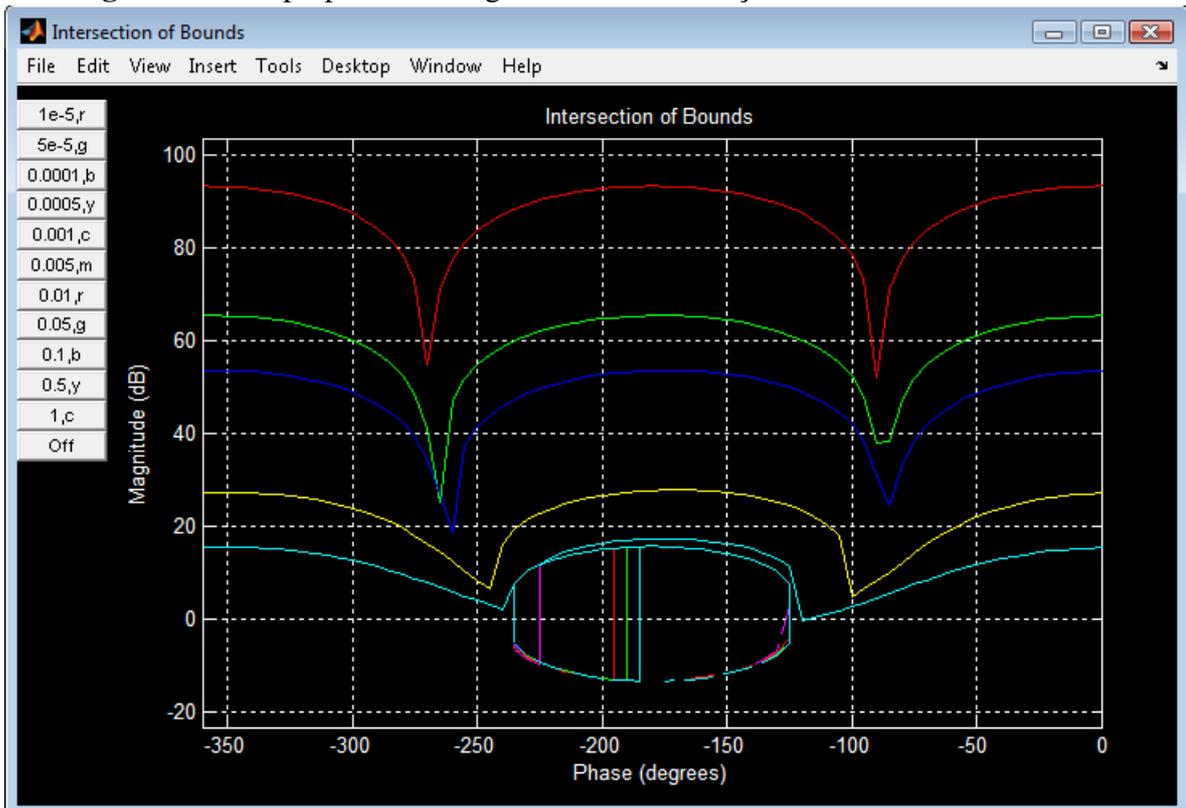


Figura 6.28: Marginile de urmarire optime



Figura 6.29: Sintetizarea regulatorului $G(s)$

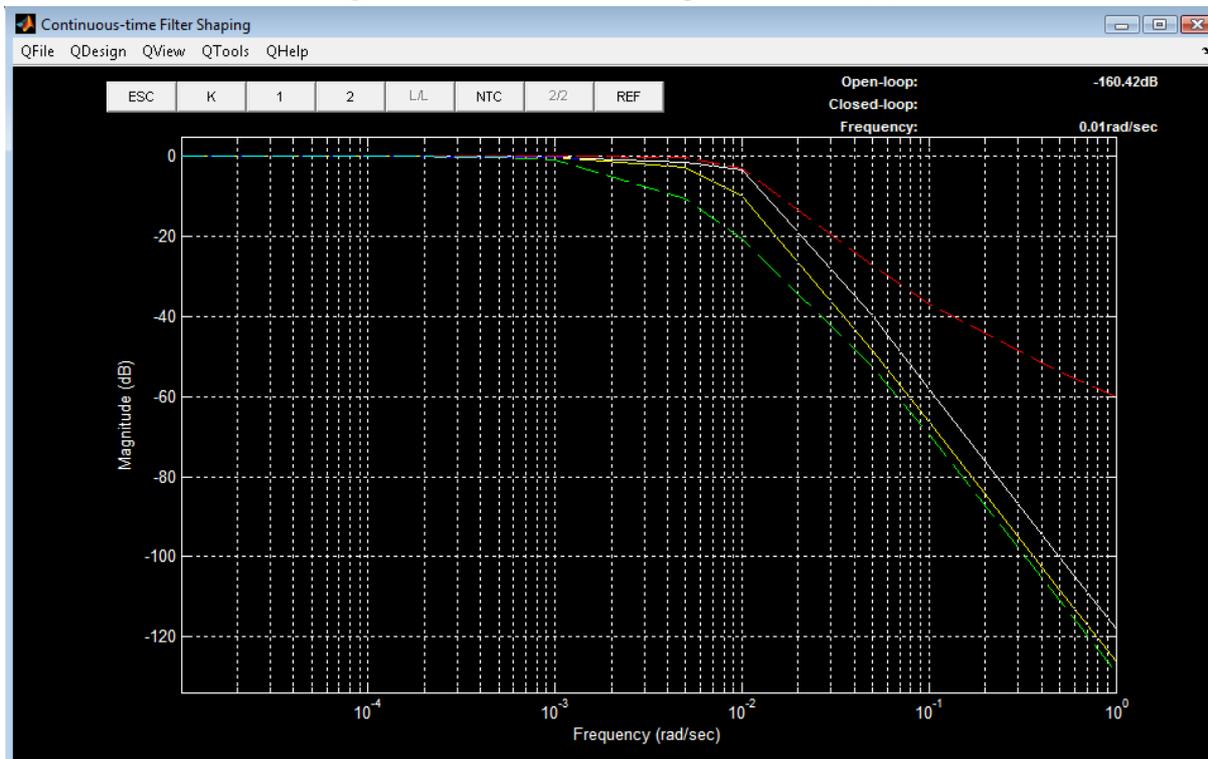


Figura 6.30: Sintetizarea prefiltrului $F(s)$ (modele impuse – linie punctata, procesul in bucla inchisa și cu prefiltru – linie continua)

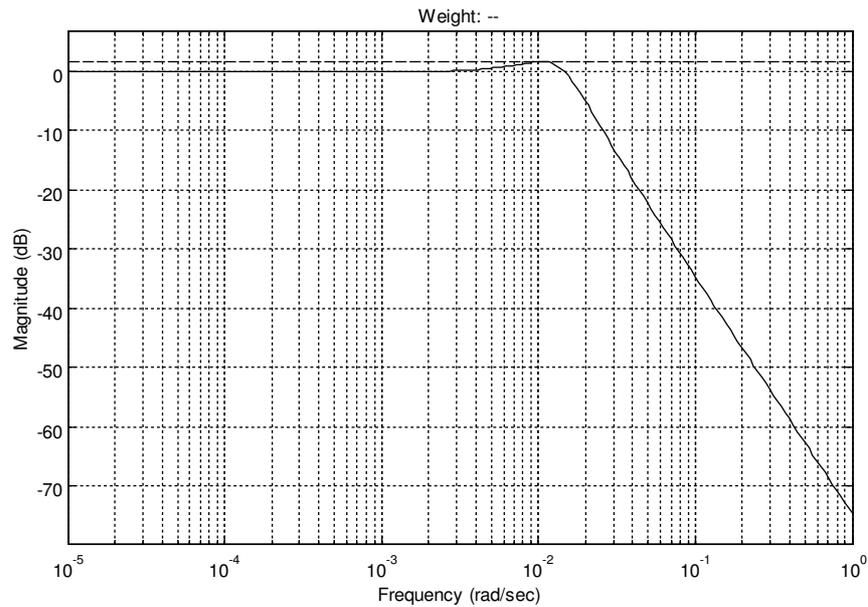


Figura 6.31: Verificarea conditiei de stabilitate

Pentru validarea regulatorului robust propus a fost realizata o simulare utilizand cele 4 colturi ce caracterizeaza zona de incertitudine considerata (Figura 6.9). Rezultatele simularii sunt prezentate in Figurile 6.32 și 6.33. In Figura 6.32 este prezentata evolutia marimii de iesire care urmareste referinta impusa (2 mg/l) in toate cele 4 cazuri, iar in Figura 6.33 este prezentata evolutia comenzii. Cum cele 4 cazuri sunt cazurile extreme de incertitudine parametrica, rezulta ca toate cazurile intermediare se vor incadra intre aceste limite, respectand specificatiile de proiectare impuse.

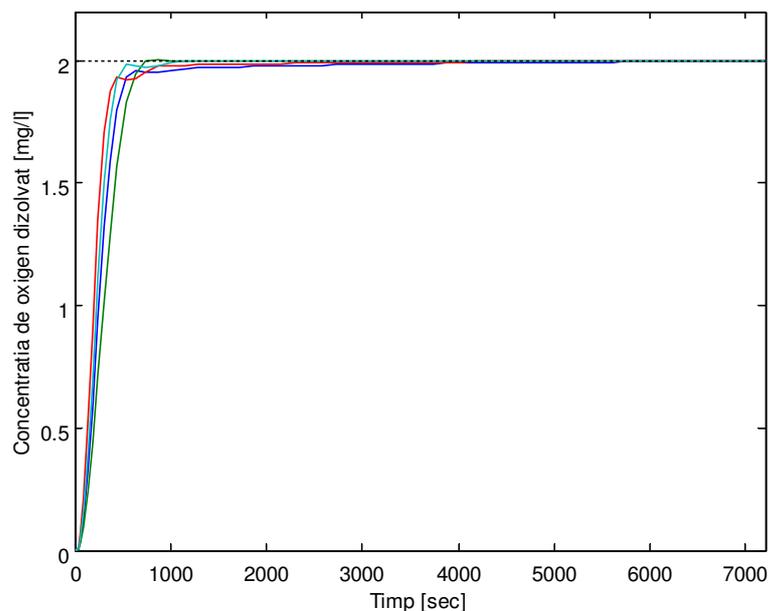


Fig. 6.32. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat (linie continua) in raport cu referinta (linie intrerupta)

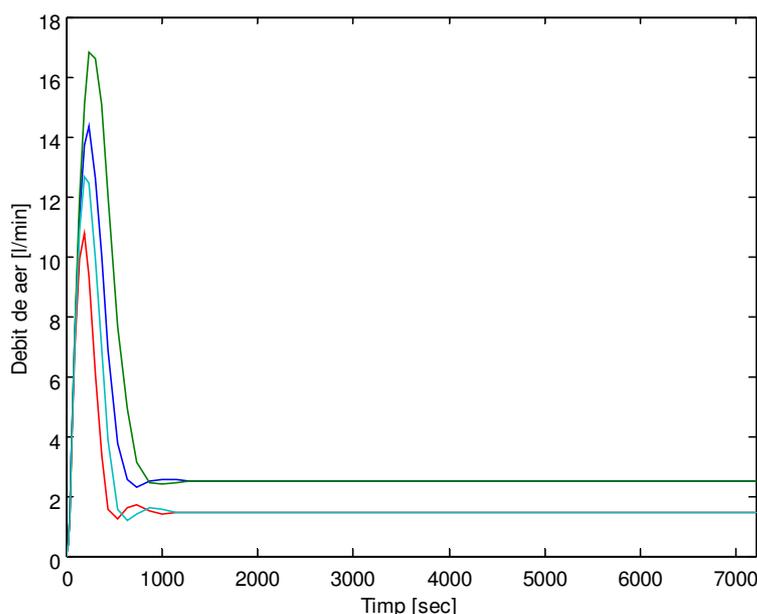


Fig. 6.33. Evolutia marimii de comanda

6.3 Controlul concentratiei de substrat organic

6.3.1 Control MBPC (Model-Based Predictive Control)

a) Aspecte teoretice

Algoritmii de control predictiv apartin clasei de strategii de conducere de tip MBPC si utilizeaza un model in scopul predictiei comportarii procesului. Indiferent de tipul de model utilizat, principiul conducerii MBPC este urmatorul (la fiecare moment de timp t , se realizeaza pasii):

- folosind modelul se realizeaza predictia iesirii procesului pe orizontul de predictie N_2 , adica $\{y(t+k/t), k=1 \dots N_2\}$, pe baza istoriei procesului (intrari si iesiri);
- se calculeaza, pe baza minimizarii unui indicator de cost si luand in calcul eventualele restrictii ale comenzii, secventa de comanda optimala $\{u(t+k/t), k=0 \dots N_u-1\}$, unde N_u se numeste orizont de comanda;
- se aplica in proces numai prima componenta a vectorului de comanda si se reia procedura cu primul pas.

Algoritmul de control predictiv este prezentat, din punct de vedere conceptual, in figura 6.1.

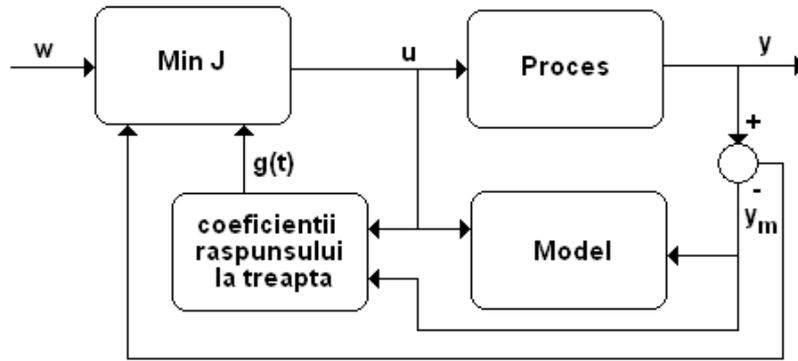


Fig. 6.34. Structura algoritmului de control predictiv

La fiecare moment de esantionare t , se calculeaza incrementul marimii de comanda $\Delta u(t)$, minimizand functia cost

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} \delta^2(k) \cdot [w(t+k/t) - y(t+k/t)]^2 + \sum_{k=0}^{N_u-1} \lambda^2(k) \cdot [\Delta u(t+k/t)]^2 \quad (6.20)$$

unde $w(t+k/t)$ este predictia referintei; $\delta(k)$ si $\lambda(k)$ – coeficienti de ponderare a erorii de predictie si a incrementelor intrarii de comanda. Pentru a calcula predictia iesirii, trebuie determinat raspunsul procesului la semnal treapta (modelul procesului utilizat pentru predictie). Pentru aceasta se admite ca modelul poate fi liniarizat in jurul punctului nominal de operare. In continuare se poate scrie ca

$$y(t+k/t) = y_{free}(t+k/t) + y_{forced}(t+k/t) \quad (6.21)$$

unde $\{y_{free}(t+k/t), k=1 \dots N_2\}$ este iesirea modelului produsa de secventa de intrare $\{u(t+k/t) = u(t-1), k=0 \dots N_2\}$ si

$$y_{forced}(t+k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \cdot \Delta u(t+k-i/t) \quad (6.22)$$

cu $\{g_i, i=1 \dots N_2\}$ coeficientii raspunsului la treapta. In notatie matriceala ecuatiile (6.21) devine

$$Y = GU + Y_{free} \quad (6.23)$$

unde

$$Y = [y(t+1/t), y(t+2/t), \dots, y(t+N_2/t)]^T \quad (6.24)$$

$$U = [\Delta u(t/t), \Delta u(t+1/t), \dots, \Delta u(t+N_u-1/t)]^T \quad (6.25)$$

$$Y_{free} = [y_{free}(t+1/t), \dots, y_{free}(t+N_2/t)]^T \quad (6.26)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N_2} & g_{N_2-1} & \dots & g_{N_2-N_u-1} \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

Utilizand modelul (6.23) in expresia fuctiei cost (6.20) se obtine o relatie patratica in raport cu U :

$$J = [\Delta \cdot W - \Delta \cdot (GU + Y_{free})]^T \cdot [\Delta \cdot W - \Delta \cdot (GU + Y_{free})] + (\Lambda U)^T (\Lambda U) \quad (6.28)$$

unde

$$W = [w(t+1/t), \dots, w(t+N_2/t)]^T \quad (6.29)$$

$$\Delta = \text{diag}[\delta(1), \dots, \delta(N_2)] \quad (6.30)$$

$$\Lambda = \text{diag}[\lambda(1), \dots, \lambda(N_u)] \quad (6.31)$$

Prin minimizarea lui J se obtine:

$$U = (G^T \cdot \Delta^2 \cdot G + \Lambda^2 \cdot I)^{-1} \cdot \Delta \cdot G(W - Y_{free}) \quad (6.32)$$

Numai prima componenta a vectorului U , $\Delta u(t/t) \equiv \Delta u(t)$, se ca marime de comanda la pasul de esantionare curent. La urmatorul moment de esantionare, intrega procedura se repeta.

b) Rezultate obtinute prin simulare numerica

Obiectivul aplicarii algoritmului de control predictiv a fost controlul indirect al substratului organic prin intermediul reglarii concentratiei de oxigen dizolvat la o valoare impusa, asa cum se prezinta in figura 6.35).

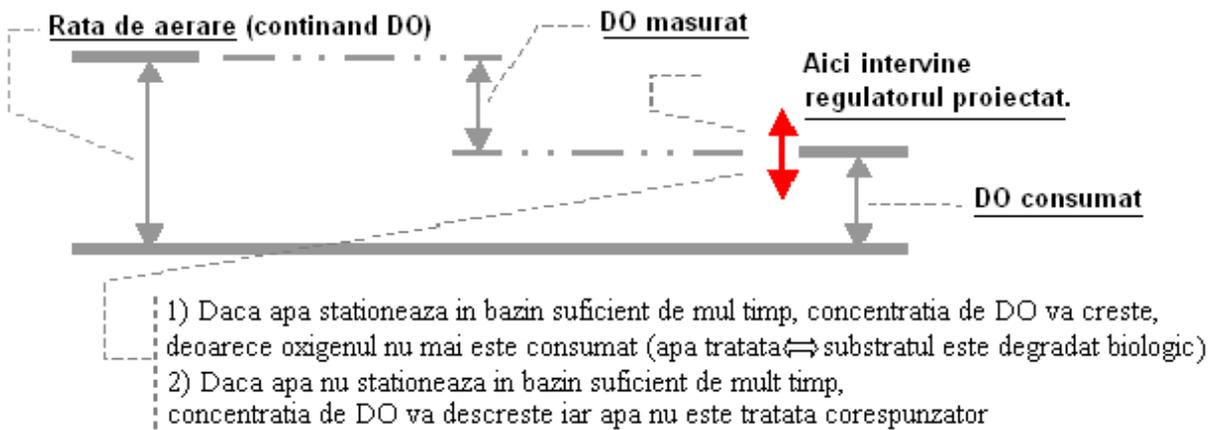


Fig. 6.35. Principiul controlului procesului de epurare biologica prin intermediul reglarii concentratiei de oxigen dizolvat

Figura 6.35 ilustreza principiul controlului predictiv pentru procesul de epurare biologica. Controllerul predictiv calculeaza rata de dilutie, care va forta concentratia de oxigen dizolvat

sa urmareasca referinta, aceasta avand un efect benefic asupra scaderii concentratiei de substrat organic.

Ca model intern al procesului a fost utilizata o retea neuronală cu urmatoarea structura (3 straturi): primul strat contine 15 neuroni, al doilea 7 neuroni iar al treilea 4 neuroni. Reteaua neuronală predictieaza marimile $X(t)$, $S(t)$, $X_r(t)$ si $DO(t)$ ca functii de:

$$\begin{aligned}
 &D(t-1), D(t-2), D(t-3), \\
 &W(t-1), W(t-2), W(t-3), \\
 &X(t-1), X(t-2), X(t-3), X(t-4), \\
 &S(t-1), S(t-2), S(t-3) \\
 &X_r(t-1), X_r(t-2), X_r(t-3), X_r(t-4), \\
 &DO(t-1), DO(t-2), DO(t-3).
 \end{aligned}$$

Pentru instruirea rețelei neuronale au fost folosite date obtinute prin integrarea ecuatiilor modelului Nejjari, considerand pentru rata de dilutie o variatie aleatoare in intervalul $[0, 0.1]$, iar pentru rata de aerare o variatie aleatoare in intervalul $[0, 100]$. Inainte de instruire, datele au fost scalate in intervalul $[0, 1]$. In acelasi mod, a fost generat un al doilea set de date, utilizat pentru validarea modelului neuronal (Figura 6.36).

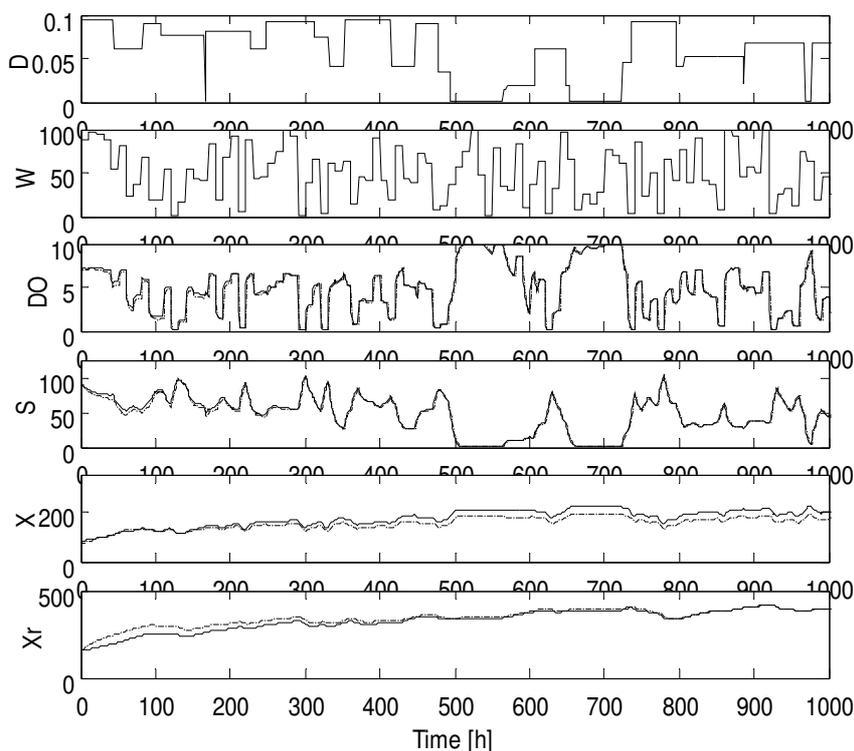


Fig. 6.36. Validarea modelului neuronal
(date proces – linie continua, model – linie intrerupta)

Rezultatele obtinute aplicand controlul predictiv al concentratiei de oxigen dizolvat sunt prezentate in figurile 6.37 – 6.39.

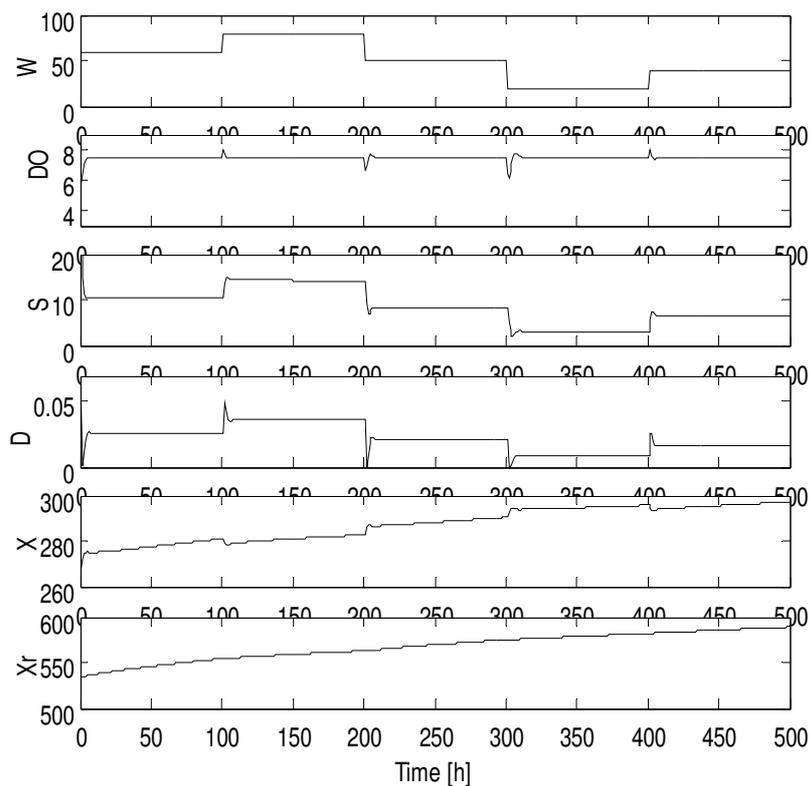


Fig. 6.37. Rezultate ale controlului predictiv pentru $DO_{Setpoint} = 7.5$

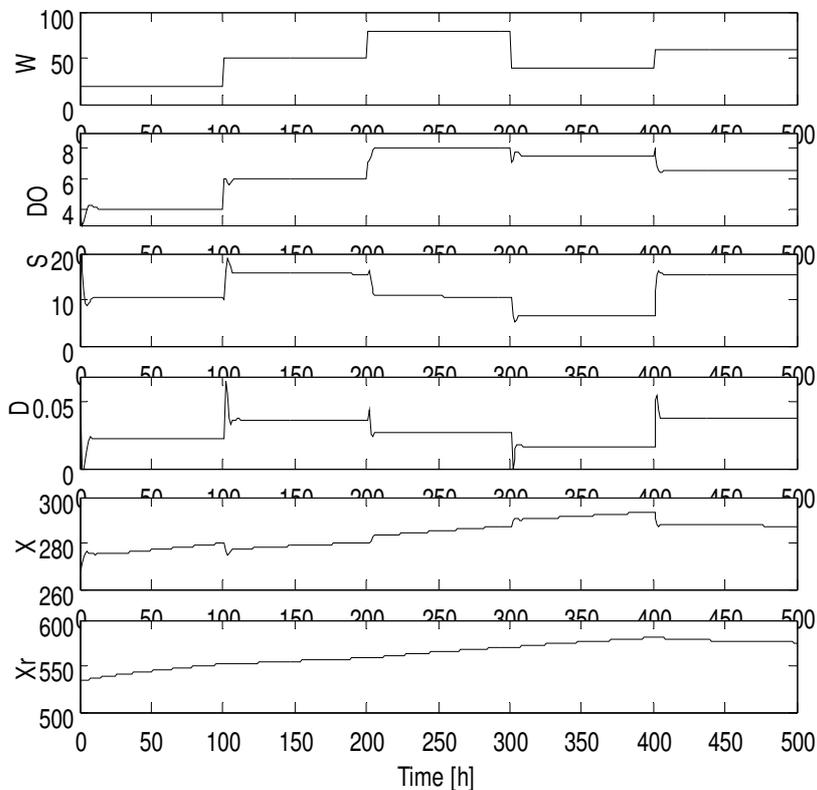


Fig. 6.38. Rezultate ale controlului predictiv pentru referinta variabila a oxigenului dizolvat

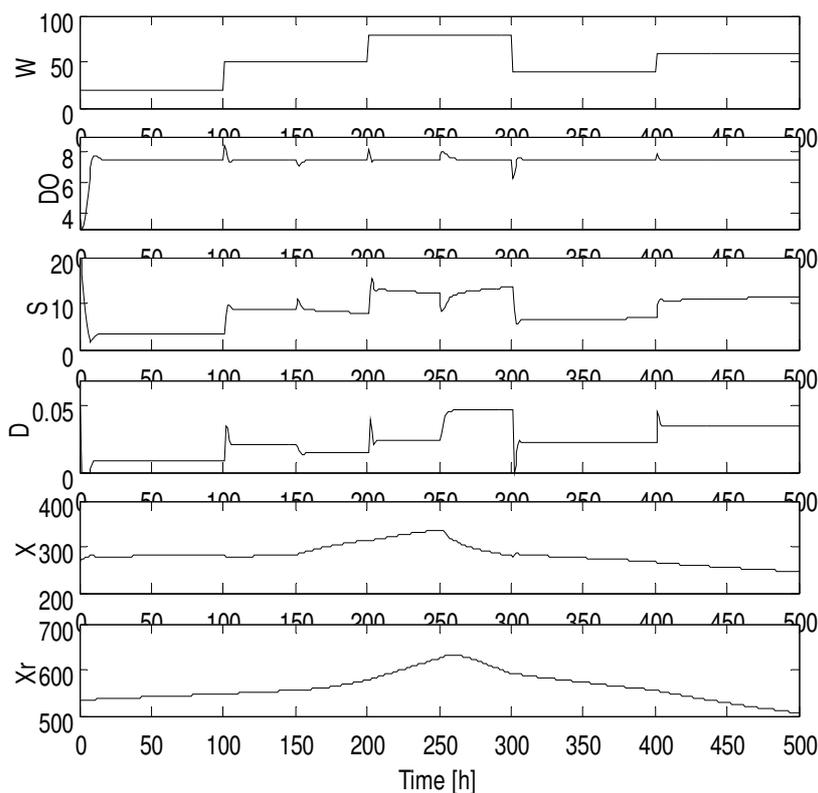


Fig. 6.39. Rezultate ale controlului predictiv pentru concentratie variabila de substrat in influent

Parametrii controlerului sunt urmatoarii: $N_2 = 5$, $N_u = 1$, $\delta = I_5$, $\lambda = 0$. In Figura 6.37 se considera o referinta constanta pentru concentratia de oxigen dizolvat, egala cu 7.5, in timp ce in figura 6.38 referinta pentru oxigenul dizolvat este variabila. In ambele cazuri, rata de aerare a fost variata astfel incat procesul sa treaca printr-o gama variata de situatii posibile de functionare (in etapa II a proiectului au fost identificate 3 puncte nominale de functionare notate „ploaie”, „normal” si „seceta”). In figura 6.39 se considera o referinta constanta a concentratiei de oxigen dizolvat, in timp ce concentratia de substrat din debitul de intrare este variabila (la momentul $t=150h$, valoarea lui S_{in} a fost schimbata de la 200mg/l la 300mg/l, fiind tinuta constanta pana la momentul $t=250h$, cand a fost schimbata din nou la valoarea de 150mg/l).

Ca o concluzie, controlul predictiv este o solutie buna pentru controlul procesului de epurare biologica a apelor uzate, cu conditia a se dispuna de un model foarte exact al procesului, pentru predictie. Din acest motiv, acest algoritim nu a fost aplicat pe instalatia pilot, pentru acest lucru optandu-se pentru alte solutii de reglare.

6.3.2 Control liniarizant exact si adaptiv

a) Aspecte teoretice

Conducerea liniarizant exacta a fost propusa de Isidori si, spre deosebire de liniarizarea clasica pe care se bazeaza conducerea liniara, aceasta metoda consta in obtinerea unui *regulator nelinier* care asigura compensarea neliniaritatilor sistemului, astfel incat sistemul in circuit inchis sa fie liniar și stabil [Isidori, 1989]. Aceasta proprietate de stabilitate este valabila nu numai intr-un singur punct de functionare, ca in cazul liniarizarii clasice, ci intr-un domeniu mare din spatiul starilor.

Fie clasa sistemelor neliniare monovariabile descrise prin:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t)) \cdot u(t) \quad (6.33)$$

$$y(t) = h(x(t)) \quad (6.34)$$

unde starea $x \in R^n$, u este intrarea, y este ieșirea, iar f și g sunt functii neliniare netede.

Trebuie gasit un intreg δ și o reactie dupa stare:

$$u(t) = \alpha(x) + \beta(x) \cdot v \quad (6.35)$$

unde α și β sunt functii netede definite in vecinatatea unui punct $x_0 \in R^n$ și $\beta(x_0) \neq 0$ astfel incat sistemul

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x) \cdot \alpha(x) + g(x) \cdot \beta(x) \cdot v \quad (6.36)$$

$$y = h(x) \quad (6.37)$$

sa aiba proprietatea ca derivata de ordin δ a ieșirii este data de

$$y^{(\delta)}(t) = v(t) \quad (\forall)t \in \Psi \quad (6.38)$$

unde Ψ este un interval deschis care contine pe $t=0$.

Aceasta problema constituie *problema liniarizarii intrare-ieșire prin reactie dupa stare*.

Se poate aborda problema liniarizarii intrare-ieșire a sistemului (6.33), (6.34) prin cautarea unei relatii algebrice intre derivata de un anumit ordin (de ordin δ) a ieșirii $y(t)$ și intrarea $u(t)$ astfel incat:

$$y^{(\delta)}(t) = b(x(t)) + a(x(t)) \cdot u(t) \quad (6.39)$$

Daca o astfel de relatie exista și $a(x_0) \neq 0$, atunci reactia:

$$u(t) = \frac{v(t) - b(x(t))}{a(x(t))} \quad (6.40)$$

va conduce la (6.38).

Aceasta idee poate fi implementata prin derivarea succesiva a ieșirii $y(t)$. Daca derivam ieșirea $y(t)$ a sistemului (6.33), (6.34) in raport cu timpul, obtinem:

$$y^{(1)}(t) = L_f h(x) + L_g h(x) \cdot u \quad (6.41)$$

unde $L_f h(x)$, $L_g h(x)$ sunt *derivatele Lie* ale lui h in raport cu f , respectiv g .

Daca $L_g h(x) \neq 0$, atunci legea de comanda cu reactie dupa stare:

$$u(t) = \frac{1}{L_g h(x)} \cdot (-L_f h(x) + v) \quad (6.42)$$

conduce la sistemul liniar:

$$y^{(1)}(t) = v(t) \quad (6.43)$$

Daca $L_g h(x) \equiv 0$, adica gradul relativ al sistemului este mai mare decat 1, derivand relatia (6.44) in raport cu timpul, obtinem:

$$y^{(2)}(t) = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x) \cdot u \quad (6.44)$$

Daca $L_g L_f h(x) \neq 0$ (grad relativ 2), atunci legea de comanda cu reactie dupa stare:

$$u(t) = \frac{1}{L_g L_f h(x)} \cdot (-L_f^2 h(x) + v) \quad (6.45)$$

conduce la sistemul:

$$y^{(2)}(t) = v(t) \quad (6.46)$$

Procedura de mai sus se poate repeta (daca $(L_g L_f h(x) \equiv 0)$) pana cand se gaseste un intreg δ (gradul relativ al sistemului) astfel incat:

$$L_g L_f^k h(x) = 0 \quad (6.47)$$

și pentru $(\forall)k < \delta - 1$, pentru $(\forall)x$ in vecinatatea lui x_0 :

$$L_g L_f^{\delta-1} h(x) \neq 0 \quad (6.48)$$

In acest caz, legea de comanda:

$$u(t) = \frac{1}{L_g L_f^{\delta-1} h(x)} \cdot (-L_f^\delta h(x) + v) \quad (6.49)$$

caz la sistemul liniar:

$$y^{(\delta)}(t) = v(t) \quad (6.50)$$

Principiul conducerii liniarizante consta in gasirea unei legi de comanda u , care este in general o functie neliniara, astfel incat eroarea de urmarire $y^* - y$ sa verifice o ecuatie diferentiala liniara stabila, prespecificata, numita *model etalon* sau *model de referinta*. Practic se impune o evolutie liniara a erorii de reglare, asa cum este prezentat si in Figura 6.40.

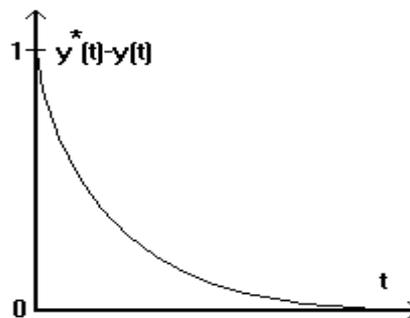


Fig. 6.40. Variatia dorita a erorii de reglare

Comanda liniarizanta exacta obtinuta prin aceasta procedura trebuie modificata atunci cand apar incertitudini parametrice prin inlocuirea parametrilor necunoscuti cu valorile lor estimate obtinute cu ajutorul estimatoarelor parametrilor. Se obtine in acest caz o *comanda liniarizanta adaptiva*.

b) Rezultate obtinute prin simulare numerica

Fie procesul de tratare a apelor uzate cu nămol activ identificat in cadrul paragrafului 4.2 si descris de ecuatiile:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - D(1+r)X + rDX_r \quad (6.51)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y}X - D(1+r)S + DS_{in} \quad (6.52)$$

$$\frac{dX_r}{dt} = D(1+r)X - rDX_r \quad (6.53)$$

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \frac{DO}{K_{DO} + DO} \quad (6.54)$$

Acest sistem nelinier poate fi scris sub forma (6.33) – (6.34) prin considerarea urmatoarelor functii neliniare $f()$, $g()$, $h()$:

$$f(x) = \begin{bmatrix} \mu X \\ -\frac{\mu X}{Y} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.55)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} -(1+r)X + rX_r \\ -(1+r)S + S_{in} \\ (1+r)X - \beta X_r \end{bmatrix} \quad (6.56)$$

$$h(x) = S \quad (6.56)$$

Se calculeaza derivatele Lie si rezulta:

$$L_f^0 h(x) = h(x) = S$$

$$L_g L_f^0 h(x) = L_g h(x) = \frac{h}{x} g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(1+r)X + rX_r \\ -(1+r)S + S_{in} \\ (1+r)X - \beta X_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1+r)S + S_{in} & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_f h(x) = \frac{h}{x} f(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu X \\ -\frac{\mu X}{Y} \\ 0 \end{bmatrix} = -\frac{\mu X}{Y}$$

Termenul $L_g L_f^0 h(x)$ este diferit de 0 deoarece se face presupunerea ca in bazinul aerat $S < S_{in}$ (apa are o incarcare mai mica decat a influentului). In aceste conditii, gradul relativ al sistemului este $\delta = 1$, iar comanda data de ecuatiile (6.49) va fi:

$$u(t) = \frac{1}{S_{in} - (1+r)S} \frac{\mu X}{Y} + v \quad (6.57)$$

In continuare se impune ca eroarea de reglare să scadă în acord cu un sistem liniar de ordinul întâi:

$$\frac{d(S_{ref} - S)}{dt} = -\lambda(S_{ref} - S) \quad (6.58)$$

unde $\lambda > 0$ este polul sistemului ce impune dinamica erorii.

Tinand cont de (6.57) si (6.58) rezulta comanda liniarizanta:

$$u(t) = \frac{1}{S_{in} - (1+r)S} \frac{\mu X}{Y} + \lambda(S_{ref} - S) \quad (6.59)$$

Rezultatele simulării structurii de conducere proiectate sunt prezentate în Figurile 6.41 și 6.42. În Figura 6.41 este prezentată evoluția concentrației de substrat organic din efluent în raport cu referința impusă. Din figura se observă că mărimea de ieșire are o evoluție similară cu a unui element de ordinul 1, așa cum a fost proiectată. În Figura 6.42 este prezentată evoluția debitului de alimentare cu influent, prin intermediul căreia se comandă procesul. Inițial legea de comandă proiectată aduce comanda la valoarea 0, determinând o scădere accentuată a valorii substratului organic. După ce este atinsă referința, comanda va lua valori din ce în ce mai mari. Explicația este dată de faptul că este nevoie de o cantitate mai mare de influent pentru a contrabalansa tendința naturală de scădere a concentrației substratului organic.

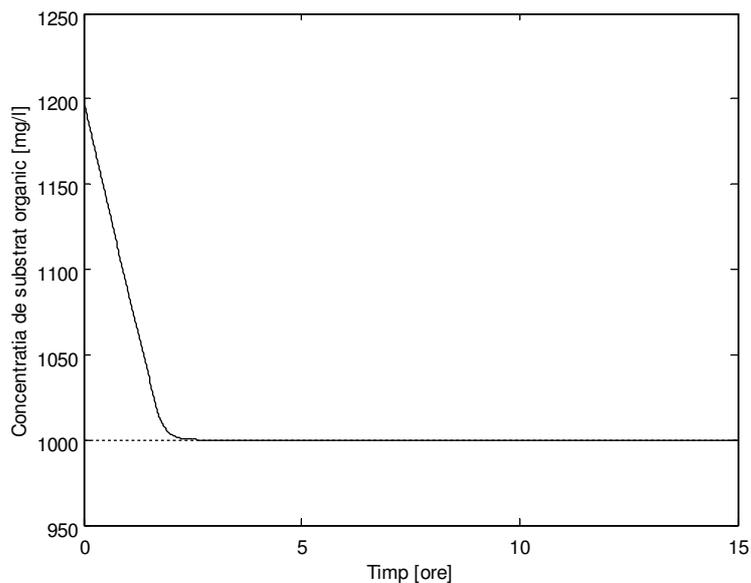


Fig. 6.41. Evolutia concentratiei de substrat organic (linie continua) in raport cu referinta (linie intrerupta)

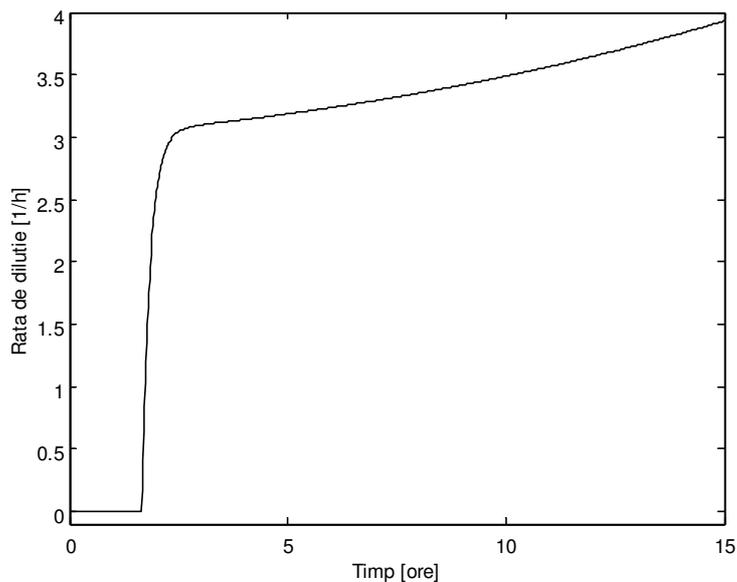


Fig. 6.42. Evolutia debitului de alimentare cu influent

In cazul in care variabilele de stare sau parametrii ce apar in legea de comanda liniarizanta nu sunt masurabili on-line se poate utiliza comanda liniarizanta adaptiva. In acest caz variabilele de stare sau parametrii nemasurabili sunt estimati prin intermediul unei observer de stare sau de parametri. In cadrul acestui studiu s-a considerat utilizarea unui observer Luenberger ce a fost proiectat in cadrul paragrafului 5.1. In cazul acestui observer se considerau masurabile concentratiile de biomasa si de substrat organic estimandu-se intreg vectorul de stare. In plus tinand cont de incertitudinile ce caracterizeaza procesul s-a inclus in legea de comanda liniarizanta un integrator ce are rolul de a conferi robustete acestei legi de comanda. In acest caz legea de comanda liniarizanta adaptiva va avea urmatoarea forma:

$$u(t) = \frac{1}{S_{in} - (1+r)S} \frac{\mu \hat{X}}{Y} + \lambda_1 (S_{ref} - S) + \lambda_2 \int (S_{ref} - S) dt \quad (6.60)$$

unde \hat{X} este biomasa estimata cu ajutorul observerului, iar $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ sunt polii sistemului ce impune dinamica erorii.

Se face observatia ca, in acest caz, prin introducerea elementului integrator, dinamica erorii va fi cea a unui element de ordin 2. In continuare s-au considerat parametrii: $\lambda_1 = 0.01, \lambda_2 = 0.0005$. Rezultatele simularii legii proiectate anterior sunt prezentate in Figurile 6.43 -6.45. Figura 6.43 contine evolutiile substratului modelului si ale observerului in raport cu referinta impusa. Din Figura 6.43 se observa o buna convergenta a observerului, precum si atingerea referintei impuse. In Figura 6.44 este prezentata evolutia biomasei, model si estimatia sa, iar in Figura 6.45 evolutia debitului de alimentare cu influent.

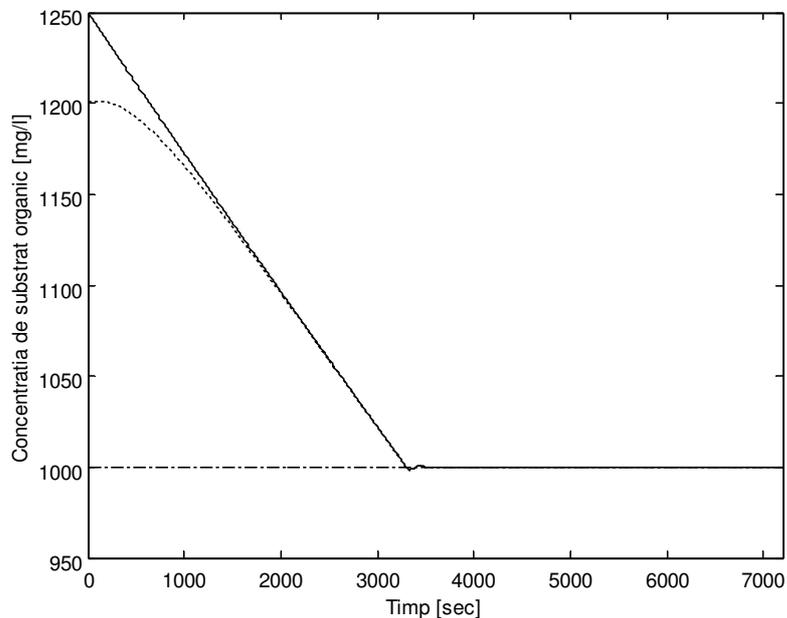


Fig. 6.43. Evolutia concentratiei de substrat organic: linie continua – model, linie punctata – estimatie si linie intrerupta – referinta impusa

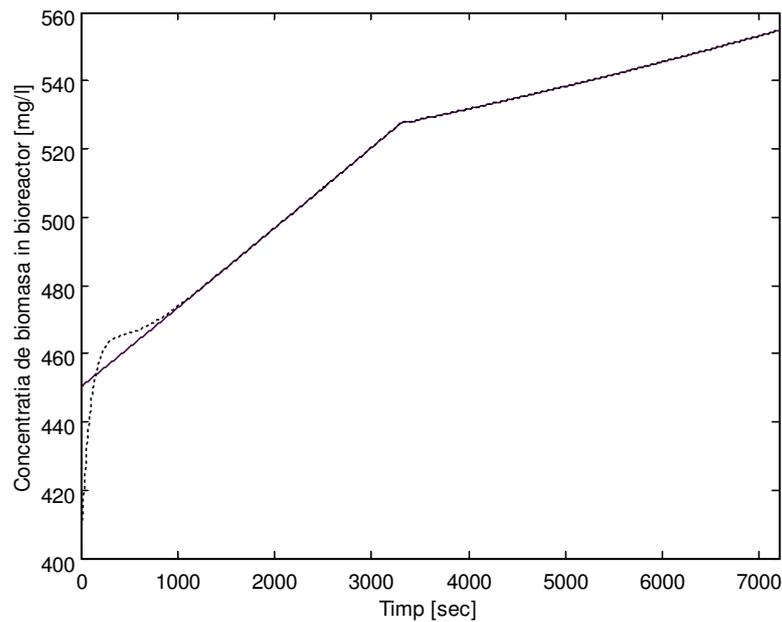


Fig. 6.44. Evolutia concentratiei de biomasa: linie continua – model, linie punctata – estimatie

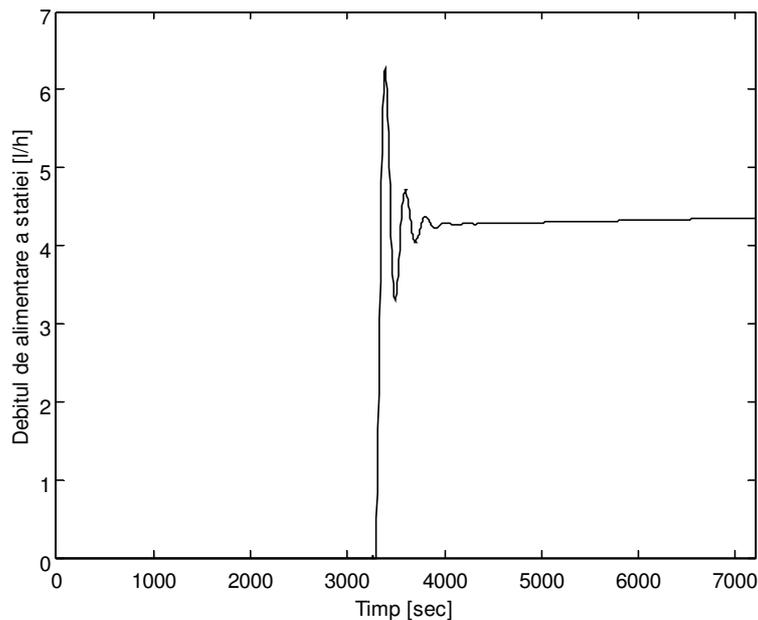


Fig. 6.45. Evolutia debitului de alimentare cu influent

Activitatea VII.2:

Elaborarea unor legi de conducere care sa satisfaca cerintele formulate in normativele legale cu validare pe statie pilot

In cadrul acestei activitati au fost implementate pe statia pilot unele din legile de conducere investigate in cadrul activitatii anterioare: control utilizand regulator de tip PI, controlul robust utilizand metoda QFT, controlul liniarizant adaptiv. In aceste experimente au fost

vizate principalele marimi ce descriu procesul de epurare biologica a apelor uzate cu namol activ: oxigenul dizolvat, substratul organic si biomasa din bazinul aerat.

6.4 Controlul concentratiei de oxigen dizolvat in bazinul aerat

6.4.1 Controlul clasic utilizand regulator de tip PI

a) Controlul concentratiei de oxigen dizolvat pentru procesul de tratare a apelor uzate din industria laptelui

Pe parcursul experimentului 7 a fost implementat pe statia pilot un regulator de tip PI pentru controlul concentratiei de oxigen dizolvat. Marimea de comanda este debitul de aer ce se insufla in bazinul aerat. Parametrii regulatorului PI au fost: $K_p = 3$ si $T_i = 0.002$. Comanda difera de cea proiectata in paragraful 6.2.1 (K_p a fost micorat de la 5 la 3) pentru ca s-a dorit o comanda care sa nu forteze marimea de comanda (tinand cont de limitarile privind capacitatea compresorului existent la acel moment). Rezultatele obtinute sunt prezentate in Figurile 6.46 si 6.47. In Figura 6.46 este prezentata evolutia oxigenului dizolvat (linie continua) in raport cu referinta impusa. Din figura rezulta ca referinta impusa este urmarita, dar exista o intarziere destul de mare intre momentul stabilirii referintei si pana cand aceasta este atinsa. In Figura 6.47 este prezentata evolutia marimii de comanda, debitul de aer. Din figura se observa ca in cazul in care se doreste obtinerea unei referinte constante, iar procesul este in plina dezvoltare (crestere a biomasei), necesarul de debit de aer va fi din ce in ce mai mare.

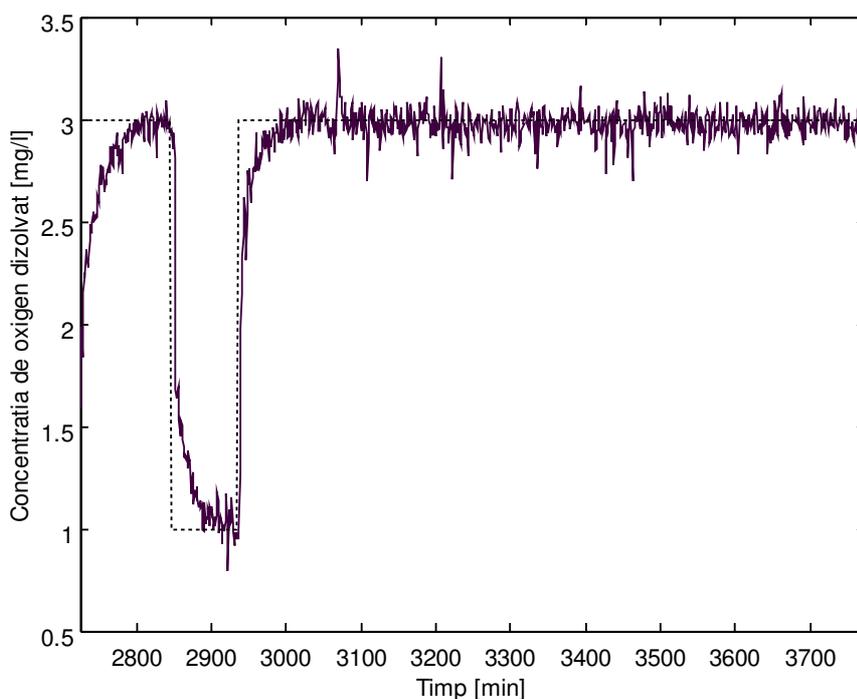


Fig. 6.46. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat:

linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

In continuare a fost realizata o reabordare a parametrilor regulatorului PI pentru obtinerea unei evolutii mai rapide a marimii de comanda. Astfel, pe toata durata experimentului 8 statia pilot a avut implementat un regulator de tip PI cu urmatoorii parametri: $K_p = 5$ si $T_I = 0.005$. Rezultatele obtinute pe statia pilot sunt prezentate in Figurile 6.48 si 6.49. Din Figura 6.48 se observa ca oxigenul dizolvat ajunge mai rapid pe referinta impusa. In aceasta evaluare trebuie sa se tina cont si de faptul ca in faza initiala a experimentului, cand biomasa este in faza de adaptare la conditiile de mediu, consumul de oxigen dizolvat este foarte mic. Aceasta determina o scaderea lenta a acestuia, chiar daca marimea de comanda in acea zona are valoarea 0, asa cum se poate observa din Figura 6.49

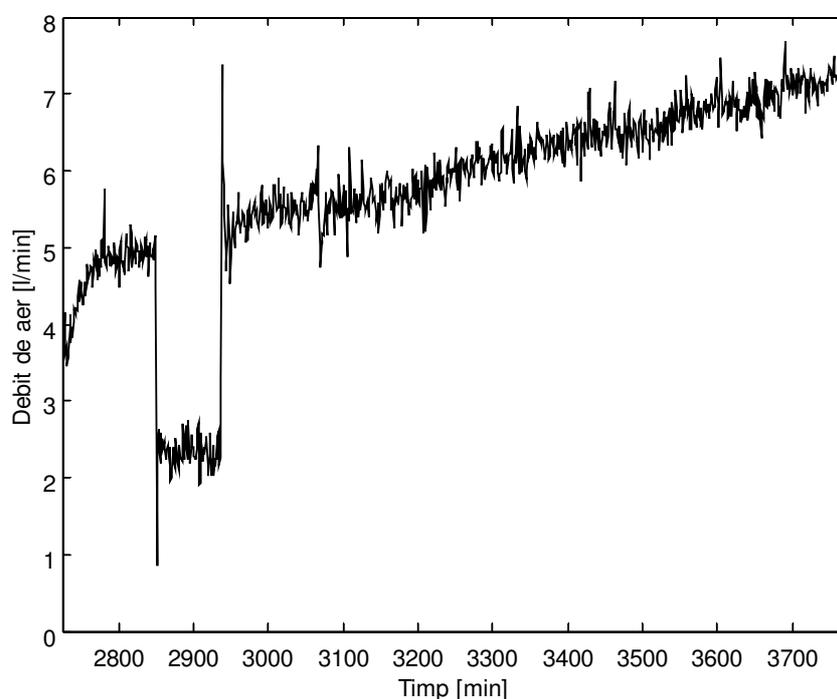


Fig. 6.47. Evolutia marimii de comanda

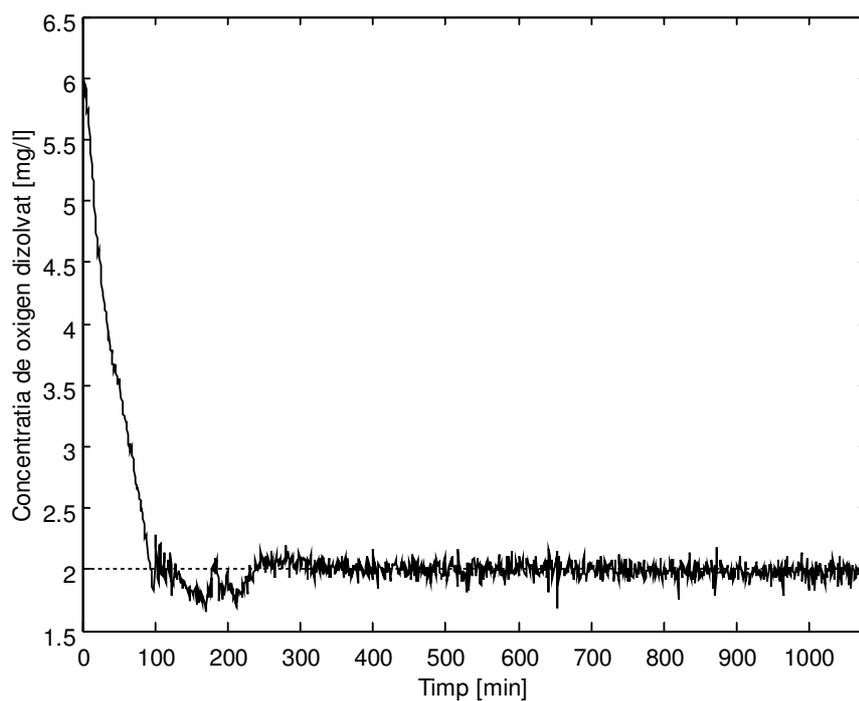


Fig. 6.48. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

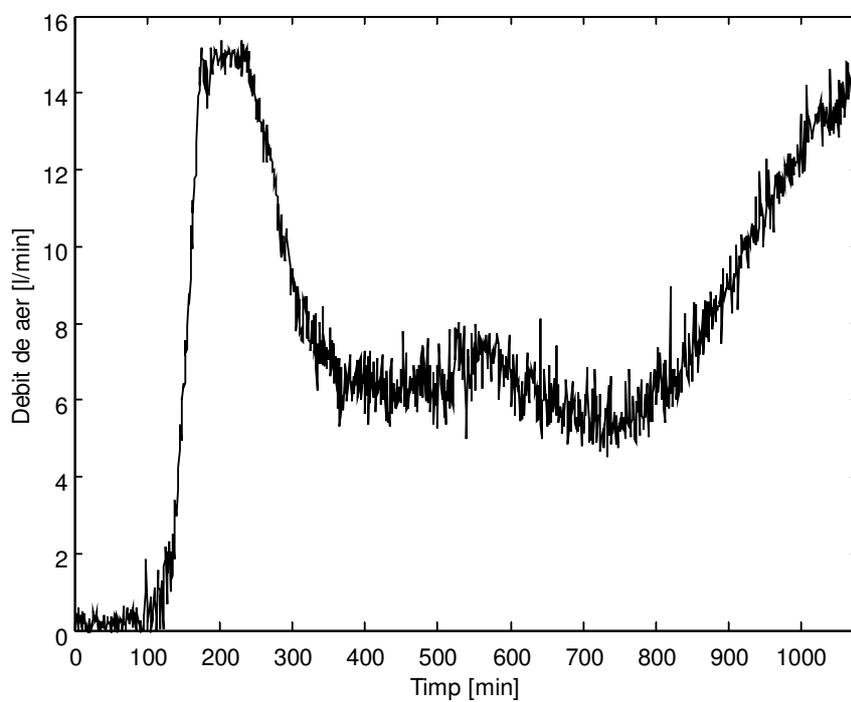


Fig. 6.49. Evolutia marimii de comanda

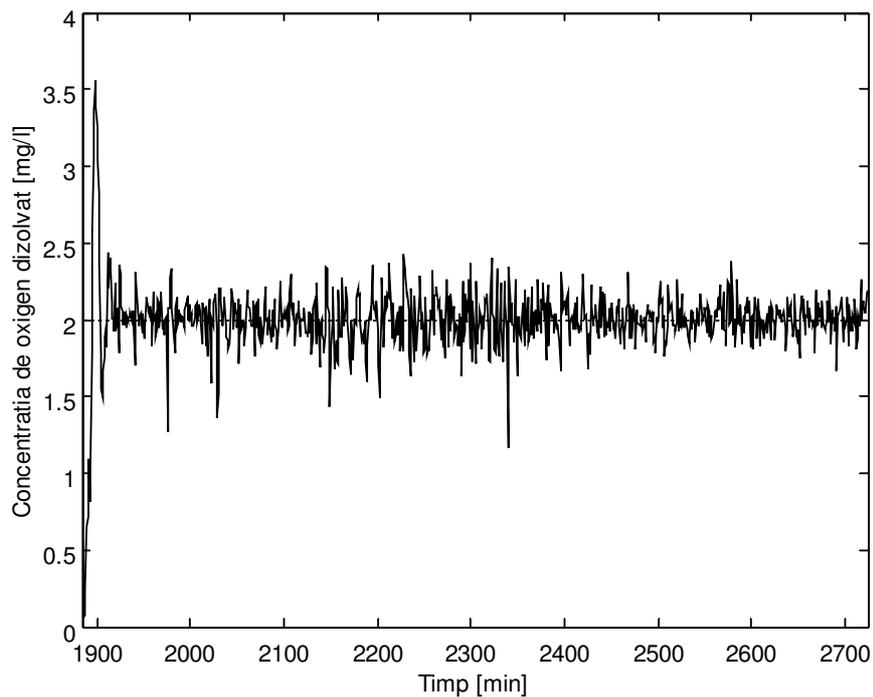


Fig. 6.50. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

b) Controlul concentratiei de oxigen dizolvat pentru procesul de tratare a apelor uzate din industria berii

Regulatorul PI reacordat anterior a fost implementat si pe parcursul experimentului 11, rezultatele fiind date in Figurile 6.50 si 6.51, dar si pe durata intregului experiment 4, rezultatele fiind prezentate in Figurile 6.52 si 6.53. Din Figurile prezentate se observa comportarea foarte buna a regulatorului, cu precizarea ca in cadrul experimentului 12 s-au dat mai multe referinte succesive pentru a observa comportarea regulatorului.

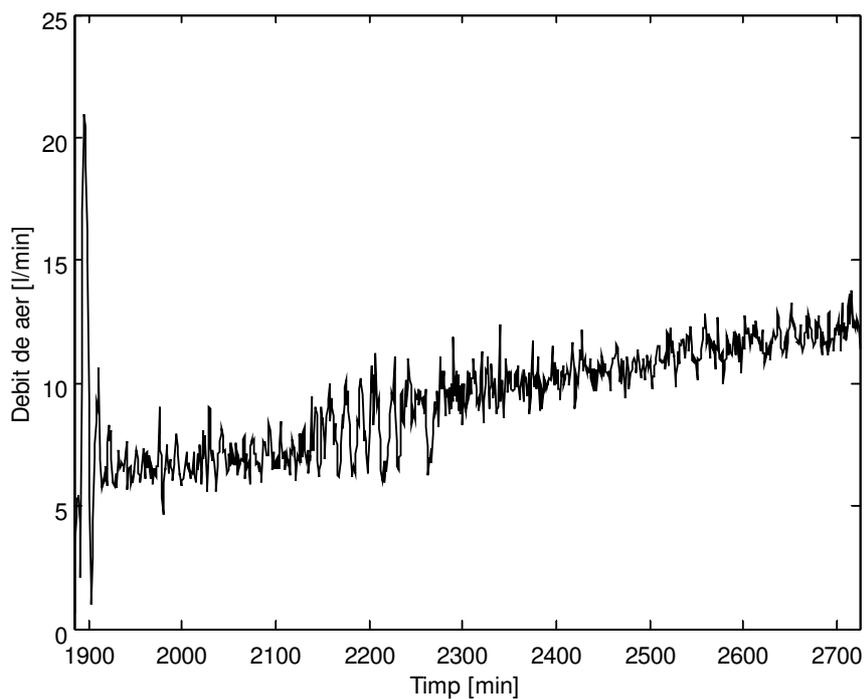


Fig. 6.51. Evolutia marimii de comanda

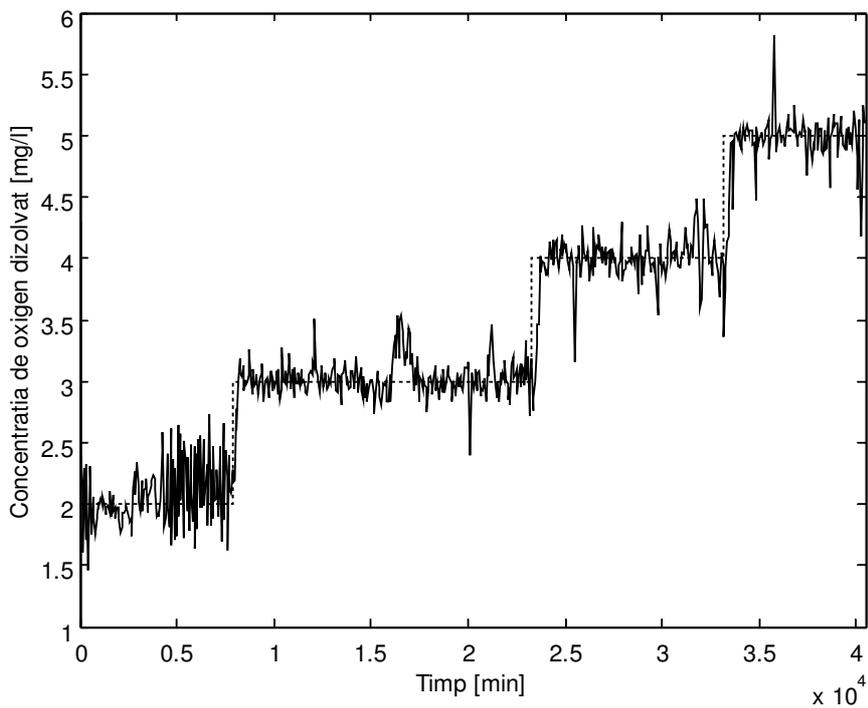


Fig. 6.52. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

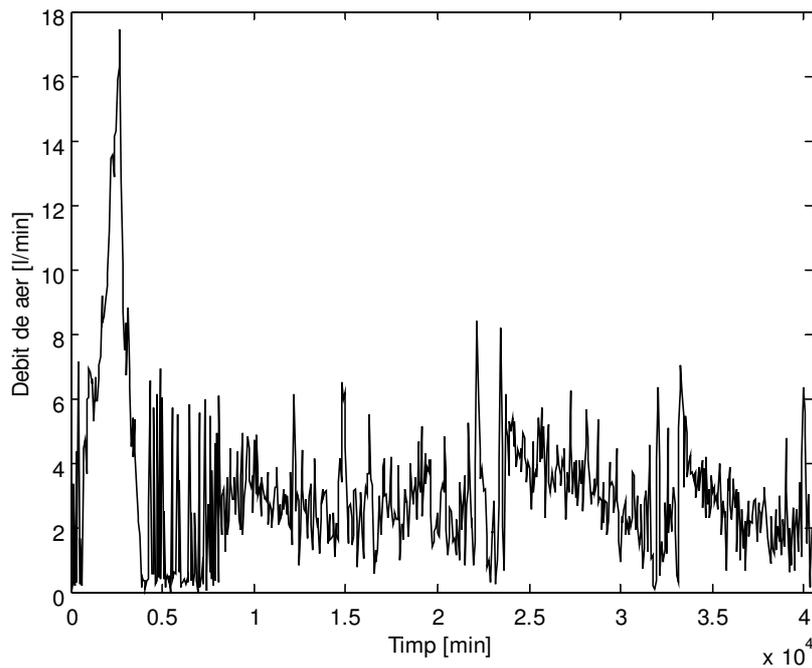


Fig. 6.53. Evolutia marimii de comanda

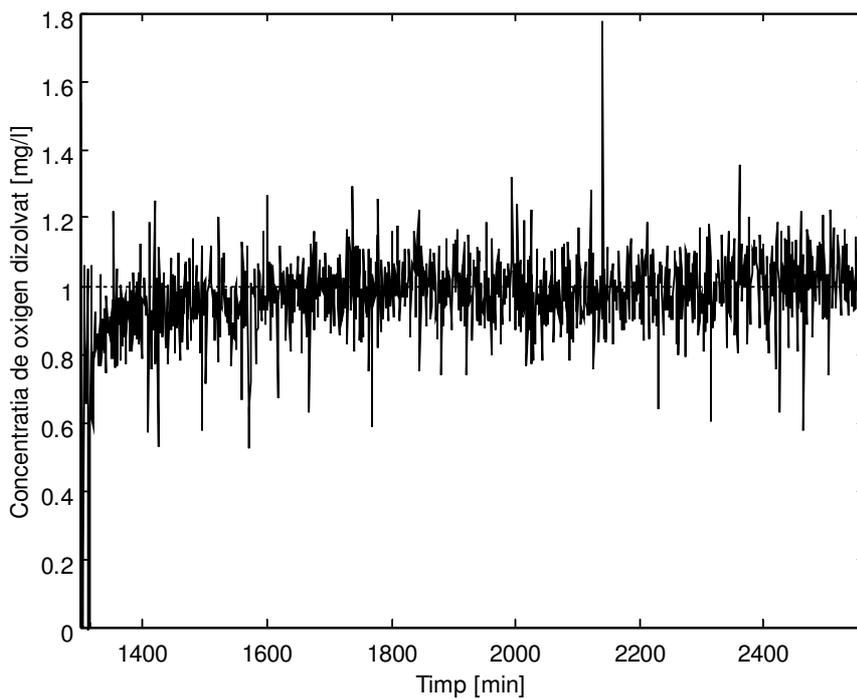


Fig. 6.54. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

6.4.2 Controlul robust utilizand metoda QFT

In cadrul acestui paragraf se prezinta rezultatele obtinute prin implementarea pe statia pilot

a legii de comanda QFT proiectata in cadrul paragrafului 6.2.2. Astfel, structura de comanda formata din regulatorul dat de ecuatie (6.18) si prefiltrul dat de ecuatie (6.19) a fost folosita pentru controlul concentratiei de oxigen dizolvat in cazul utilizarii apelor din industria laptelui si a berii. Rezultatele obtinute sunt foarte bune in ambele cazuri, ceea ce justifica alegerea facuta de a utiliza un regulator robust asa cum este cel proiectat prin metoda QFT.

a) Controlul concentratiei de oxigen dizolvat pentru procesul de tratare a apelor uzate din industria laptelui

Pe parcursul Experimentului 9 a fost utilizat structura de reglare QFT, rezultatele fiind prezentate in Figurile 6.54 si 6.55.

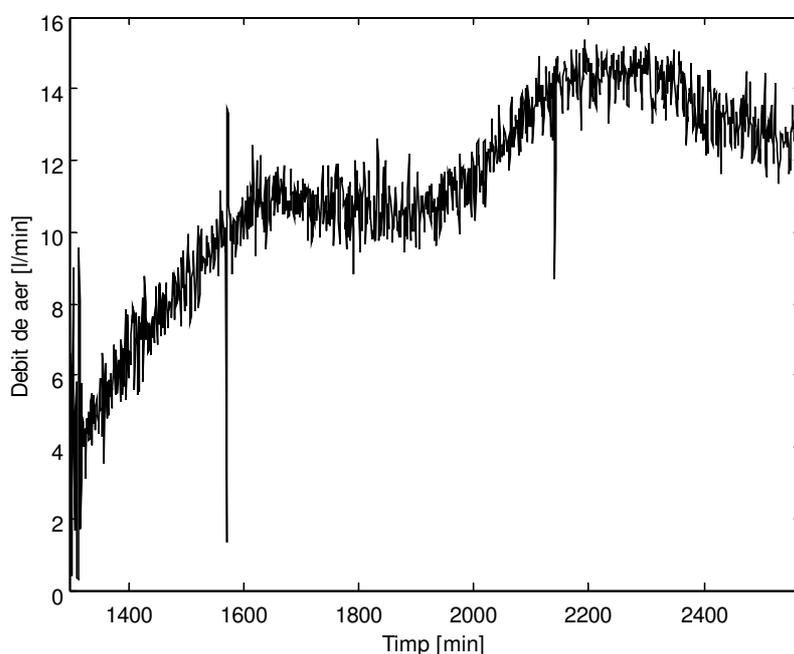


Fig. 6.55. Evolutia marimii de comanda

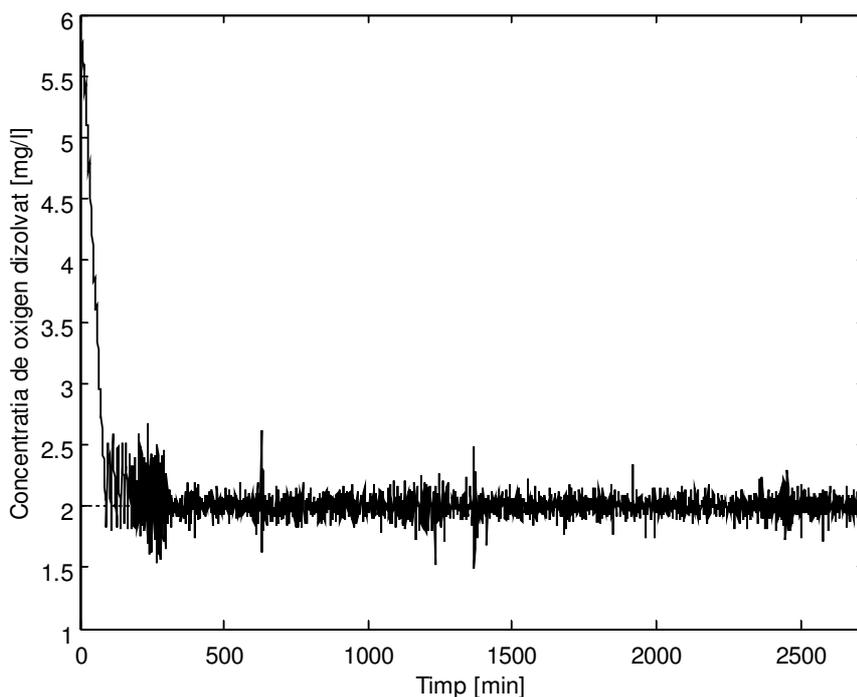


Fig. 6.56. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

b) Controlul concentratiei de oxigen dizolvat pentru procesul de tratare a apelor uzate din industria berii

Pe durata intregului Experiment 12 a fost utilizat structura de reglare QFT, rezultatele fiind prezentate in Figurile 6.54 si 6.55. In cadrul acestui experiment s-a folosit un filtru on-line pentru oxigen dizolvat avand o constanta de timp mai mica ($T = 10$, fata de $T = 20$ cat a fost in cazul celuilalt experiment). In aceste conditii, atat marimea de iesire, cat si cea de comanda sunt mai puternic afectate de zgomot, dar au o dinamica mai rapida.

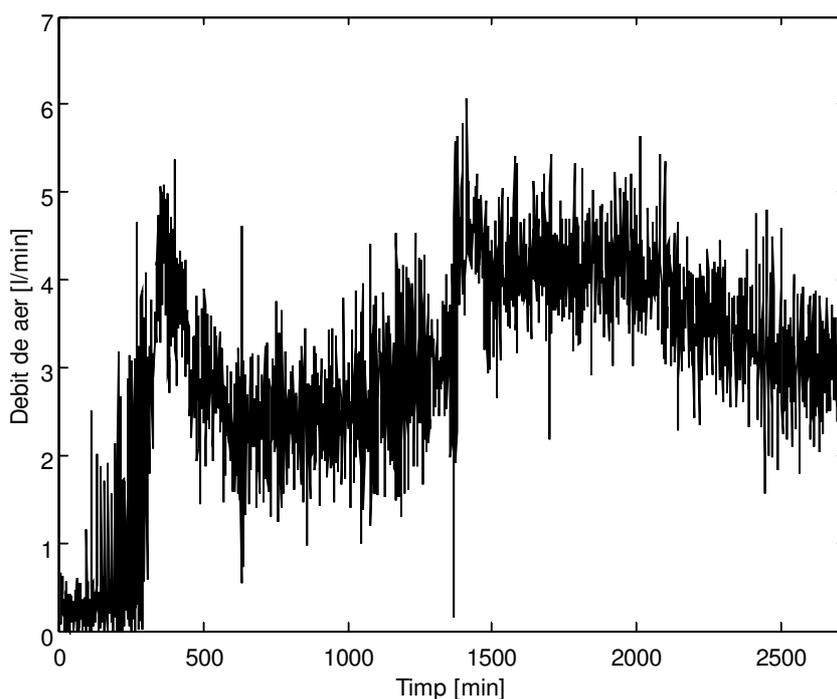


Fig. 6.57. Evolutia marimii de comanda

6.5 Controlul concentratiei de substrat organic

6.5.1 Controlul liniarizant adaptiv

In cadrul Experimentului 14 s-a incercat tehnica de control liniarizant adaptiv. Din pacate in absenta unui senzor pentru masurarea concentratiei de substrat organic aceasta metoda nu a dat rezultatele asteptate. Astfel, a fost implementat controlul liniarizant adaptiv proiectat in cadrul paragrafului 6.3.2, dar in care observerul Luenberger are ca marime masurabila doar concentratia de biomasa din bazinul aerat. Rezultatele obtinute sunt prezentate in Figurile 6.58 – 6.60.

In Figura 6.58 este prezentata evolutia concentratiei de biomasa din statia pilot (linie continua) si cea data de observer (linie punctata), in Figura 6.59 este prezentata evolutia substratului (linie continua) in raport cu referinta impusa (linie punctata), iar in Figura 6.60 este data evolutia comenzii. Din Figura se observa ca problema nu este legea de control propriu-zisa, ci functionarea observerului. Astfel, legea de control actioneaza in sensul opririi alimentarii cand concentratia de substrat estimat este mult peste referinta si in sensul alimentarii la maxim atunci cand aceasta scade mult sub referinta.

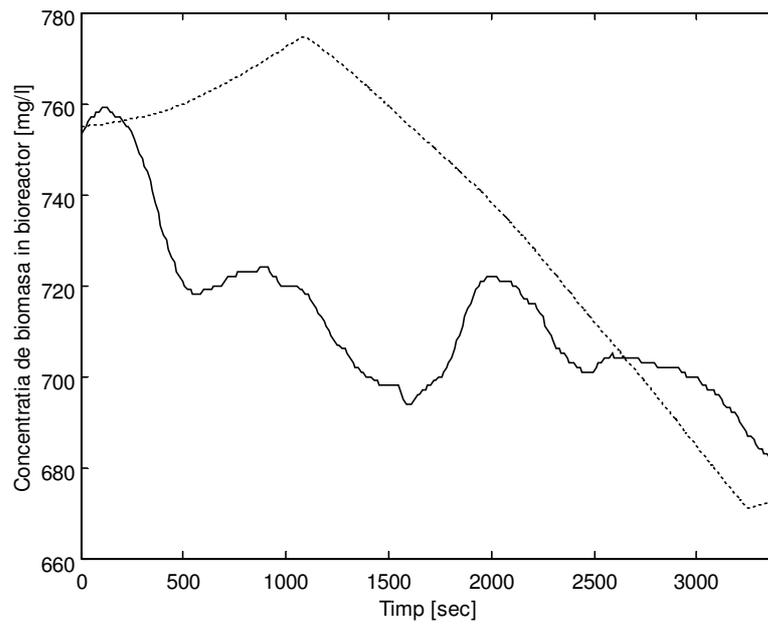


Fig. 6.58. Evolutia concentratiei de biomasa din bazinul aerat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – observer

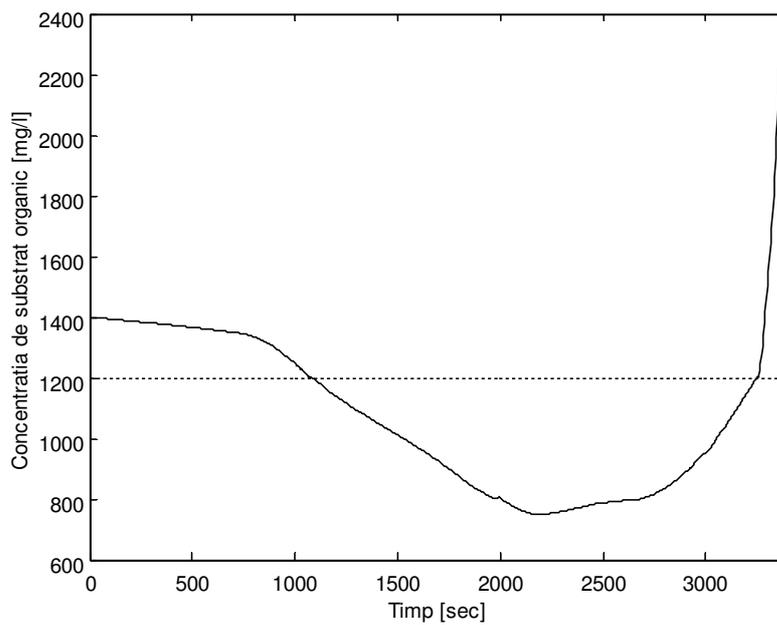


Fig. 6.59. Evolutia concentratiei de substrat organic:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

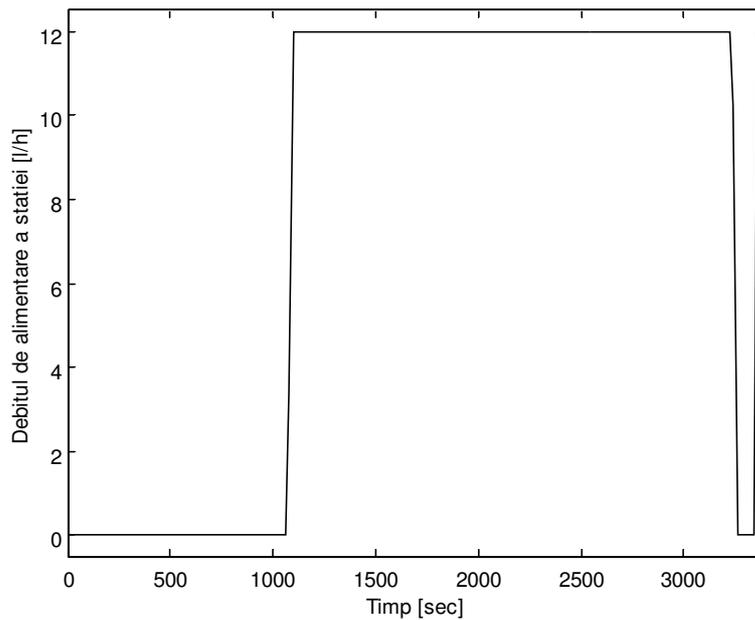


Fig. 6.60. Evolutia marimii de comanda

Motivatia neconvergentei observerului este sensibilitatea deosebita a modelului utilizat fata de concentratia de substrat organic. Acest lucru poate fi observat si din analiza valorilor matricei de observabilitate si a vectorului de castig al observerului la un moment dat. Astfel, din valorile prezentate mai jos se observa ca determinantul matricei de observabilitate este apropiat de 0, sistemul apropiindu-se de unul neobservabil. Vectorul de castig are a doua componenta, cea care apare in ecuatia substratului, foarte mare in raport cu prima, cea care apare in ecuatia biomasei. Se ajunge ca la erori de biomasa destul de mici corectia data estimarii de substrat sa fie totusi importanta, ceea ce conduce in timp la neconvergenta observerului.

```
A = 1.0e-004 *
    -0.26153688153375    0.00467707083949    0.39682539682540
    -0.16911064411456   -0.40267173537476    0
    0.39682539682540    0    -0.39682539682540
```

```
C =
    1    0    0
```

```
O =
    1.000000000000000    0    0
    -0.00002615368815    0.00000046770708    0.00003968253968
    0.00000000225081   -0.000000000003107   -0.00000000261255
```

```
det(O) =
    1.085069029641680e-017
```

```
K =
```

In aceste conditii, este necesara o alta abordare pentru a permite totusi implementarea controlului liniarizant. Aceasta abordare va fi prezentata in continuare.

6.5.2 Controlul liniarizant bazat pe model

In cadrul aceluiasi experiment 14 a fost implementata pe statia pilot o lege de control liniarizant bazat pe model. Astfel, tinand cont ca in legea de comanda liniarizanta data de ecuatia (6.60) apare doar biomasa din bioreactorul aerat nu este necesar un observer. Astfel, se va folosi in legea de comanda valoarea biomasei preluata de la senzorul on-line, in timp ce substratul va fi considerat cel dat de modelul identificat in paragraful 4.2. Validarea metodei de conducere propuse se va face prin masuratori off-line ale probelor de apa uzate prelevate la fiecare 30 min. de la statia pilot.

Rezultatul privind concentratia de substrat organic dat de model este prezentat in Figura 6.61, iar comanda ce se aplica pe statia pilot este prezentata in Figura 6.62.

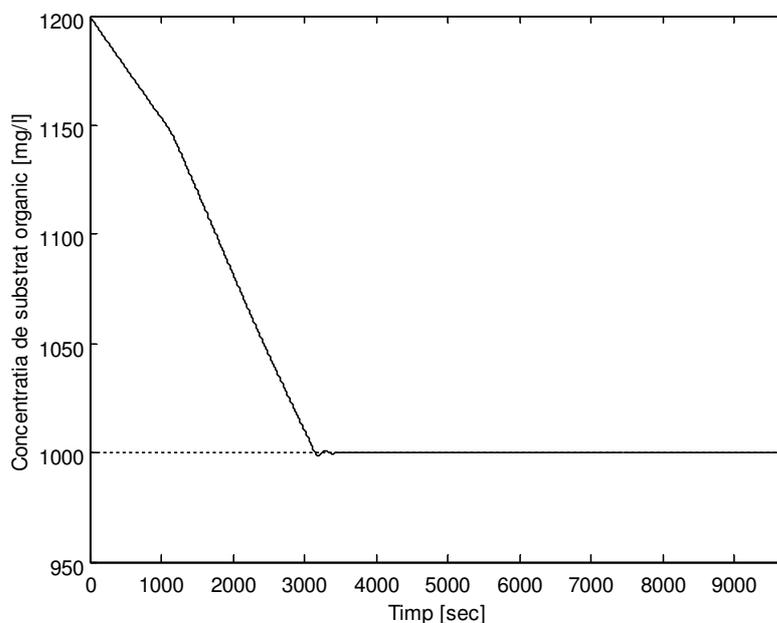


Fig. 6.61. Evolutia concentratiei de substrat organic:
linie continua – model, linie punctata – referinta

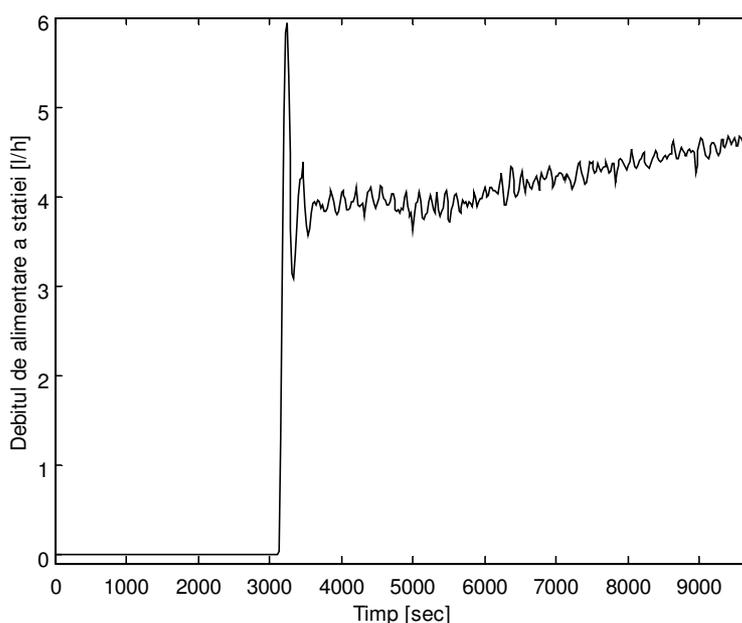


Fig. 6.62. Evolutia marimii de comanda

Rezultatele obtinute prin masuratorile on-line pe parcursul implementarii legii de control liniarizant bazata pe model sunt prezentate in Tabelul 6.1. Din tabel se observa ca strategia de control propusa conduce la rezultate bune, masuratorile facute off-line fiind foarte apropiate de cele obtinute pe baza de model.

Tabel 6.1

Proba	Ora	CCO [mg/l]
S0	11:15	1278
S1	11:45	1014
S2	12:20	964
S3	12:50	1020

6.6 Strategie de control bazata pe concentratia de biomasa din bazinul aerat

In cadrul instalatiilor de tratare a apelor uzate exista posibilitatea prevederii unui bazin colector al namolului sedimentat in decantor. O parte din acest namol se recircula, cealalta parte, considerata excedentara, se elimina din instalatie. In aceste conditii, apare ca fireasca posibilitatea controlului concentratiei de biomasa din bazinul aerat, marimea de comanda fiind cantitatea de namol ce se readuce in sistem dupa decantare. Instalatia pilot nu are prevazut un astfel de bazin. Totusi a fost implementat cu succes un regulator de tip PI pentru controlul concentratiei biomasei. Marimea de comanda adoptata a fost debitul de recirculare din bazinul de decantare. In acest caz rezultatele sunt bune doar pe scurte durate (cateva ore), cat concentratia de biomasa din partea inferioara a decantorului este aproximativ constanta. In cazul prezentei bazinului de colectare a namolului, aceste rezultate pot fi extinse practic pe

intreaga perioada de functionare a statiei.

Controlul concentratiei de biomasa din bazinul aerat determina posibilitatea adoptarii unei metode experimentale de alimentare a statiei pilot cu influent. Astfel, in literatura de specialitate este prezentata metoda de alimentare a instalatiei pentru mentinerea constanta a indicelui de incarcarea organica a namolului (I_{on}). Acest indice se defineste ca fiind raportul dintre cantitatea de nutrienti din substrat si cantitatea de biomasa formata. Practic se determina cantitatea de substrat ce poate fi adusa in statie (ca debit si concentratie) astfel incat biomasa existenta sa o poate consuma cu randament mare.

Cele doua abordari conduc la urmatoarea idee ce va fi propusa in cadrul activitatii de proiectare a unor statii pilot pe baza rezultatelor obtinute in cadrul grantului. Pe baza debitului de alimentare cu apa uzata si a concentratia de substante organice biodegradabile din apa uzata se determina concentratia de biomasa ce trebuie sa existe in bazinul aerat. Aceasta concentratie va fi apoi mentinuta constanta pe baza unui regulator ce are ca marime de comanda cantitatea de biomasa ce trebuie recirculata.

6.6.1 Controlul concentratiei de biomasa din bazinul aerat

In cadrul experimentului 14 a fost utilizat un regulator de tip PI pentru controlul concentratiei de biomasa din bazinul aerat. Marimea de comanda utilizata este debitul de biomasa din decantor ce se aduce in bazinul aerat. Parametrii regulatorului PI au fost: $K_p = 5$ si $T_I = 0.005$. Evolutia concentratiei de biomasa este prezentata in Figura 6.63, marimea controlata urmarind foarte bine referinta impusa.

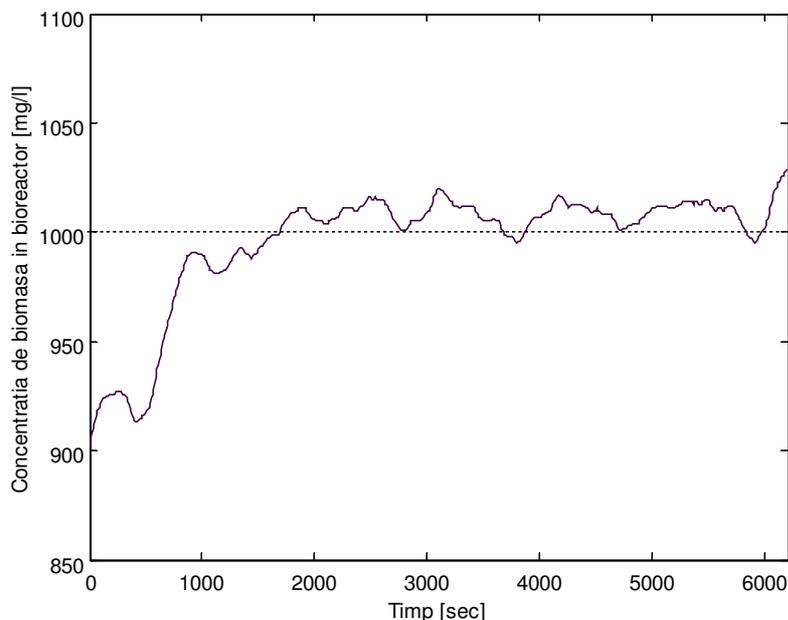


Fig. 6.63. Evolutia concentratiei de biomasa din bazinul aerat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

In cadrul aceluiasi experiment a fost utilizat si un regulator de tip PI, prezentat in paragraful 6.4.1, pentru controlul concentratiei de oxigen dizolvat prin intermediul aerarii. Rezultatele obtinute sunt prezentate in Figurile 6.64 si 6.65. Din Figura 6.64 se observa o comportare foarte buna a marimii reglate pana la momentul de timp egal cu 850 min., cand concentratia de oxigen dizolvat scade sub valoarea impusa. Din analiza marimii de comanda, prezentata in Figura 6.65, se observa ca la momentul de timp egal cu 850 min. debitul de aer intra in saturatie, consumul de oxigen din bazinul aerat depasind capacitatea compresorului.

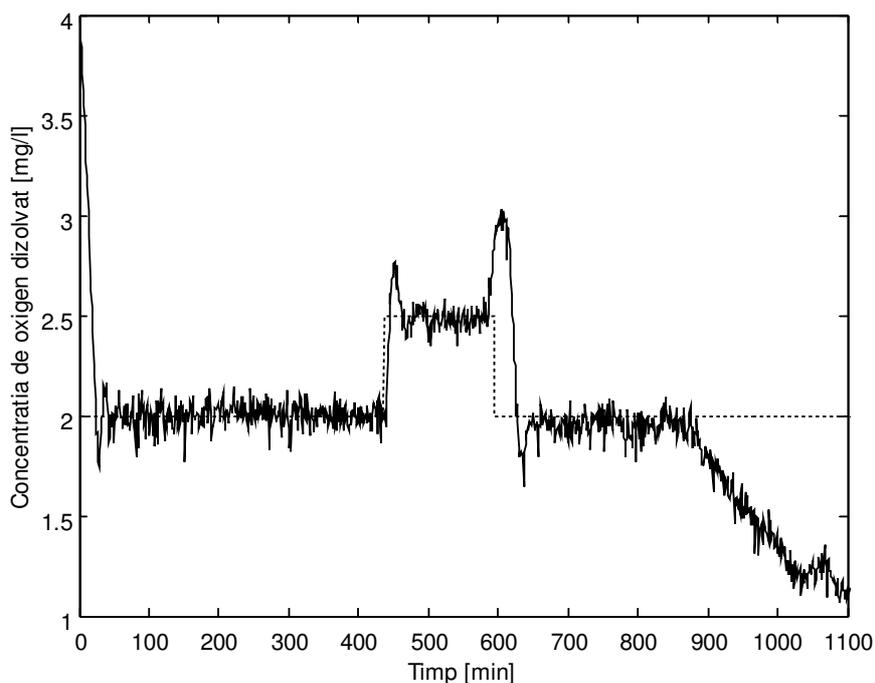


Fig. 6.64. Evolutia concentratiei de oxigen dizolvat:
linie continua – statie pilot, linie punctata – referinta

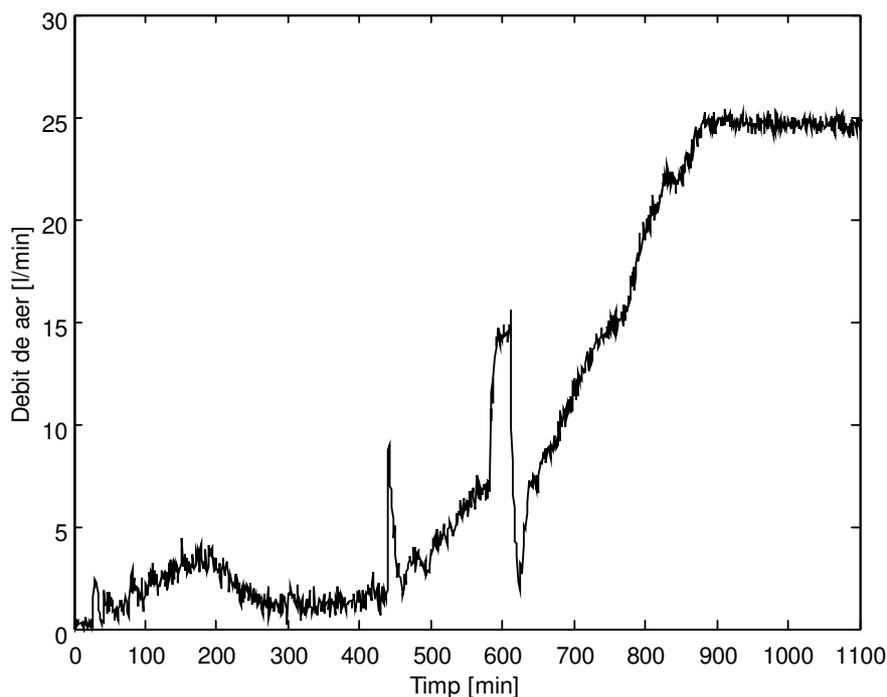


Fig. 6.65. Evolutia marimii de comanda

6.6.2 Controlul concentratiei de biomasa din bazinul aerat

Pe parcursul intregului Experiment 15 s-a realizat mentinerea indicelui biomasa/hrana la valoarea impusa. Rezultatele obtinute pe statia pilot sunt prezentate in Figurile 6.66, evolutia debitului de alimentare a statiei pilot, si 6.67, evolutia concentratiei de biomasa din bazinul aerat. Se face precizarea ca, pe parcursul experimentului, indicele biomasa/hrana a fost modificat pentru a vedea influenta acestuia asupra eliminarii substratului organic. Acest lucru se observa in Figura 6.66 in modificarile bruste ale comenzii. Referiri ample asupra eficientei acestei metode sunt prezentate in cadrul Capitolului 3.

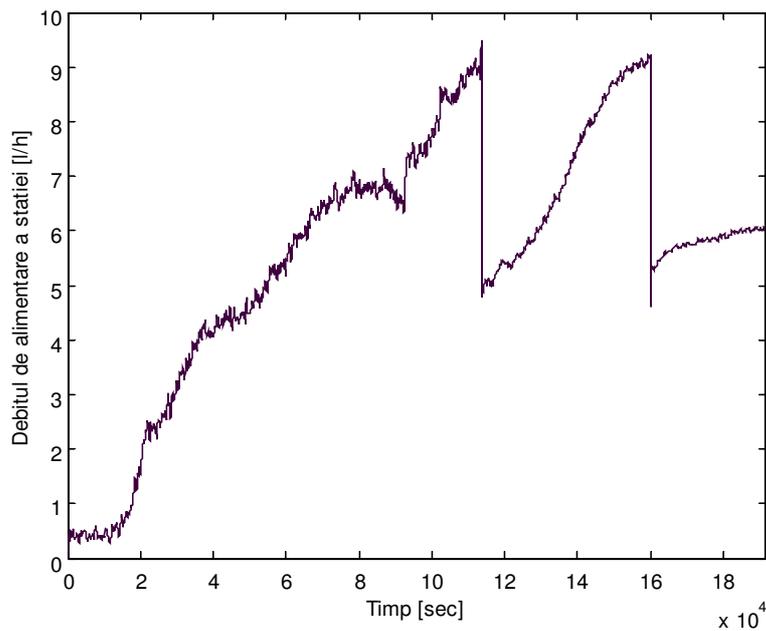


Fig. 6.66. Evolutia debitului de alimentare al statiei pilot

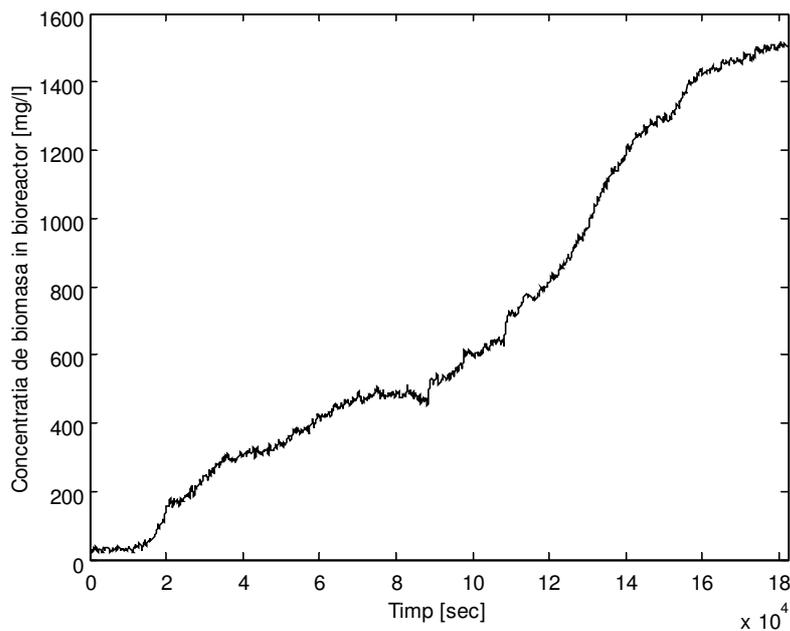


Fig. 6.67. Evolutia concentratiei de biomasa din statia pilot

Bibliografie

[Bas90] Bastin, G., Dochain, D., *On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors*, Elsevier, 1990.

[Bri66] Bristol, E. H., *On a New Measure of Interactions for Multivariable Process Control*, IEEE Transaction on Automatic Control, AC-11, 1966.

[Car02] Caraman S., Ceangă E., Frangu L., Mencinicopschi Gh., *Modelarea și conducerea proceselor biotehnologice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2002.

[Hor91] Horowitz, I.M., *Survey of Quantitative Feedback Theory (QFT)*, International Journal of Control, Vol. 53, No. 2, Pp. 255-291, 1991.

[Isi89] Isidori, A., *Nonlinear Control Systems: An Introduction*, 2nd Edition, Springer, 1989.

[Kat99] Katebi, M.R., Johnson, M.A., Wilke, J., *Control and Instrumentation for Wastewater Treatment Plant*, Springer-Verlag, London, 1999.

[Ols99] Olsson, G., Newell, B., *Wastewater treatment systems – modelling, diagnosis and control*, IWA Publishing, London, Great Britain, 1999.