



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI
OIPOSDRU



UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Facultatea de Automatică, Calculatoare,

Inginerie Electrică și Electronică

**Contribuții privind controlul robust al proceselor de
tratare biologică a apelor uzate**

– Rezumat teză de doctorat –

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Sergiu CARAMAN

Doctorand:

Ing. Alina CHIROȘCĂ

Galați, 2012



ROMÂNIA
UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS”
DIN GALAȚI



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI

C8948/17.09.2012

Către

Universitatea “ Dunărea de Jos ” din Galați vă face cunoscut că în data de _____, ora _____, în _____, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: **“CONTRIBUȚII PRIVIND CONTROLUL ROBUST AL PROCESELOR DE TRATARE BIOLOGICĂ A APELOR UZATE”**, elaborată de domnul/doamna **CHIROȘCĂ ALINA**, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - **Ingenieria sistemelor**.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- 1. Președinte:** **Conf.univ.dr.ing. Emilia PECHEANU**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
- 2. Conducător de doctorat:** **Prof.univ.dr.ing. Sergiu CARAMAN**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
- 3. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Radu-Emil PRECUP**
Universitatea “Politehnica” din Timișoara
- 4. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Emil PETRE**
Universitatea din Craiova
- 5. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Adrian FILIPESCU**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr.47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.

Prof.univ.dr.ing. **Julian Gabriel BÎRSAN**



Cuprins

1. Introducere	1
1.1. Memoriu justificativ	1
1.2. Organizarea tezei	4
1.3. Direcții de cercetare valorificate	5
2. Stadiul actual al cunoașterii privind modelarea, estimarea și conducerea proceselor de epurare biologică cu nămol activ	7
2.1. Procesul de epurare biologică cu nămol activ – Scurt istoric	8
2.2. Modelarea procesului de epurare biologică a apelor reziduale	9
2.2.1. Modelarea procesului de tratare cu nămol activ	10
2.2.2. Modelarea procesului de decantare	12
2.2.3. Medii de simulare	14
2.3. Estimarea stărilor și parametrilor în procesele de epurare biologică a apelor reziduale	15
2.4. Conducerea procesului de epurare biologică a apelor reziduale	17
2.5. Concluzii	21
3. Modelarea proceselor de epurare a apelor uzate	23
3.1. Prezentarea proceselor de epurare a apelor uzate	24
3.1.1. Clasificarea poluanților	24
3.1.2. Cadrul legislativ	25
3.1.3. Etapele procesului de tratare a apelor uzate	27
3.1.4. Nămolul activ	29
3.1.5. Strategii de tratare biologică cu nămol activ	30
3.2. Modelarea procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ	32
3.2.1. Modele fundamentale pentru procesul de epurare a apelor uzate	32
3.2.2. Modele de ordin redus pentru procesul de epurare a apelor uzate	42
3.2.2.1. Modelarea bioreactorului aerat	42
3.2.2.2. Modelarea bazinului de decantare	44
3.2.2.3. Modelul bilanțului de material	45
3.2.2.4. Modelul de ordinul 3 al procesului de epurare biologică a apelor uzate	49
3.3. Analiza RGA a procesului de epurare biologică a apelor reziduale descris prin modelul Nejjari	52

3.3.1.	Fundamente teoretice	52
3.3.2.	Analiza RGA a procesului de epurare biologică a apelor reziduale	54
3.4.	Concluzii	55
4.	Contribuții privind controlul H_∞ al proceselor de epurare biologică a apelor reziduale	57
4.1.	Fundamente ale controlului robust H_∞	58
4.2.	Controlul robust H_∞ al procesului de epurare biologică a apelor reziduale	65
4.2.1.	Obiectivele controlului robust H_∞ al procesului de epurare biologică a apelor reziduale	66
4.2.2.	Controlul concentrației de substrat organic	67
4.2.3.	Controlul robust al concentrației de oxigen dizolvat	79
4.2.4.	Controlul multivariabil al procesului de epurare biologică	84
4.3.	Concluzii	95
5.	Contribuții privind strategiile de conducere fuzzy pentru procesele de epurare cu nămol activ	97
5.1.	Fundamente ale conducerii fuzzy	98
5.2.	Controlul fuzzy al proceselor de epurare biologică a apelor reziduale	104
5.2.1.	Obiectivele controlului fuzzy al procesului de epurare a apelor reziduale	105
5.2.2.	Controlul fuzzy al procesului de epurare biologică a apelor reziduale în regim decuplat	107
5.2.3.	Controlul fuzzy multivariabil al procesului de epurare biologică a apelor reziduale	116
5.3.	Concluzii	128
6.	Concluzii generale	131
6.1.	Contribuții	134
6.2.	Diseminarea rezultatelor	137
Anexa 1		139
Anexa 2		141
Lista figurilor		147
Lista tabelelor		155
Simboluri și notații		157
Lista de abrevieri		165
Bibliografie		167

Capitol 1

Introducere

Termenul de apă reziduală este un termen folosit generic pentru a descrie apele uzate, rezultate în urma întrebuințării de diversă proveniență. Încă din antichitate există dovezi ce indică utilizarea unor canale de colectare a deșeurilor în scopul unic de a îndepărta poluarea olfactivă din apropierea așezărilor umane. În timp însă, influența proprietăților apei asupra mediului înconjurător și implicit asupra sănătății umane a devenit o evidență, captând gradul de atenție cuvenit. Operațiunea prin care sunt eliminate substanțele nocive sau inestetice din apele reziduale se numește epurare sau tratare și prezintă o serie de dependențe față de sursă, de modul de utilizare, de proprietățile chimice, de agenții de poluare ce atentează la sănătatea umană și implicit la echilibrul mediului înconjurător etc. Considerând faptul că primele progrese semnificative în tratarea apelor reziduale au fost făcute cu aproximativ 100 de ani în urmă, se poate spune că domeniul de tratare a apelor reziduale este relativ nou, iar din punct de vedere al evoluției demografice și industriale, se poate spune, de asemenea, că domeniul de tratare a apelor reziduale este unul absolut necesar. Acest lucru însă nu minimalizează gradul de complexitate și nici nu limitează proporțiile fenomenelor biologice observabile pe o singură ramură științifică. Idealul se prezintă pe termen lung sub forma optimizării condițiilor de operare a proceselor de tratare a apelor, a îmbunătățirii performanțelor, costurilor și calității prin conducere automată cu scopul principal de a diminua efectele amprentei umane asupra mediului înconjurător. În principiu, nimic din ce nu poate face natura și singură, dar într-un timp mult mai scurt. Atât în literatura de specialitate cât și în practică, au fost dezvoltate diferite tehnici de tratare: biologică, mecanică, chimică, fizică sau combinații ale acestora, unde procesul de tratare biologică a apelor reziduale utilizează populații de microorganisme, echivalentul noțiunii de nămol activ.

Cum întreaga existență a vieții este datorată apei, se consideră că este datoria umanității de a proteja această resursă imensă, dar nu inepuizabilă. În acest sens, lucrarea curentă poate fi privită ca un pas proactiv, o contribuție proprie la colecția soluțiilor ce își propun și reușesc să contribuie la protejarea și conservarea resurselor mediului înconjurător.

O altă motivație, nu mai puțin importantă, reprezintă dorința de cunoaștere și de perfecționare profesională, precum și ansamblul provocărilor ce o însoțește, un exemplu

fiind dinamica neliniară, complexă, caracterizată de perturbații și incertitudini a proceselor biologice de tratare a apelor reziduale. Astfel, se recurge la o abordare globală prin proiectarea de modele matematice eficiente în controlul automat, prin prisma cerințelor formulate prin indicatorii de performanță, precum calitate, cost etc. Controlul robust întâmpină aceste dinamici prin exercitarea unui comportament de compensare a incertitudinilor, de rejecție a zgomotelor și a perturbațiilor.

Teza de doctorat intitulată “*Contribuții privind controlul robust al proceselor de tratare biologică a apelor uzate*” este concentrată asupra studierii, în vederea aplicării practice, a unei serii de modele matematice cu un coeficient gradual de complexitate, precum și asupra proiectării de metode de control robust pentru procesul de tratare biologică a apelor reziduale cu nămol activ, ambele direcții fiind susținute bibliografic pe parcurs. Toate soluțiile propuse, privind controlul automat al proceselor de epurare, au fost validate prin simulare numerică.

Teza de doctorat este structurată pe șase capitole, al căror conținut este prezentat succint în cele ce urmează. Capitolul curent prezintă, prin prisma motivației și a obiectivelor ce stau la baza tezei, o imagine de ansamblu a procesului de epurare biologică a apelor reziduale cu nămol activ, precum și structura generală a tezei pe capitole și un sumar al contribuțiilor proprii.

Capitolul 2 cuprinde stadiul actual al cunoașterii privind evoluția sistemelor de epurare a apelor reziduale cu nămol activ, pornind de la primele începuturi menționate în literatura de specialitate, până la tehnologiile de simulare automată. Cu toate că existau de mai mult timp noțiunile primare privind procesul biologic de tratare, acesta a cunoscut un real progres odată cu introducerea noțiunii de recirculare a biomasei în anul 1914. În anii ce au urmat, numeroși cercetători au contribuit la optimizarea soluțiilor inițiale, cât și la dezvoltarea de noi soluții în ceea ce privește modelarea, estimarea și controlul procesului.

Capitolul 3 oferă o imagine a procesului biologic de tratare a apelor uzate, prin perspectiva agenților de poluare, a surselor de poluare, a tipurilor de poluare, a materialului biologic, a mediului de reacție. Partea a doua conține o clasificare și o descriere a etapelor procesului de epurare, precum și o analiză a modelelor matematice existente în literatura de specialitate, considerând gradul de complexitate, influențele intrare – ieșire și fiabilitatea în selectarea tipului de control adecvat și aplicarea în conducerea automată.

Capitolul 4 începe prin prezentarea problemei generale de control robust H_{∞} , metodă specifică sistemelor multivariabile, neliniare și afectate de incertitudini. Problema de proiectare a regulatorului H_{∞} , ce urmărește robustețea la perturbații, zgomot de măsură

și incertitudini de model, este aplicată procesului de epurare biologică a apelor reziduale, considerând variații sinusoidale ale parametrilor și semnalelor. Se realizează proiectarea și testarea, prin simulare numerică, de compensatoare H_{∞} pentru fiecare canal de comandă: rata de diluție – concentrația de substrat organic și rata de aerare – concentrația de oxigen dizolvat. Perturbațiile procesului de epurare considerate sunt variația diurnă a apelor reziduale domestice și debitul influentului, privind cantitățile de precipitații ce acoperă principalele trei puncte de funcționare întâlnite în literatură (Barbu 2009): *normal*, *ploaie* și *secetă*.

Capitolul 5 începe prin prezentarea tehnicii de conducere fuzzy, o combinație de abordare matematică și interpretare lingvistică specifică raționamentului uman, de asemenea specifică sistemelor neliniare. Problema de conducere fuzzy permite abordarea calitativă și totodată subiectivă a procesului de epurare a apelor uzate. Relația dintre intrările de comandă și ieșirile urmărite este analizată din perspectiva robusteții procesului de epurare controlat fuzzy în regim decuplat, considerând canalele de comandă: rata de aerare – concentrația de oxigen dizolvat, rata de diluție – concentrația de substrat organic și rata de nămol recirculat – concentrația de substrat organic. Se realizează proiectarea și testarea, prin simulare numerică, a sistemului de control multivariabil fuzzy a procesului de epurare a apelor reziduale, analizând proprietățile de robustețe și de compensare a perturbațiilor, considerând o variație diurnă de formă sinusoidală a concentrației de substrat organic din influent.

Capitolul 6 cuprinde concluzii generale derivate din rezultatele obținute, precum și contribuțiile originale din cadrul tezei.

Capitol 2

Stadiul actual al cunoașterii privind modelarea, estimarea și conducerea proceselor de epurare biologică cu nămol activ

Noțiunea de tratament biologic a apelor uzate a existat dinainte de anul 1900, fiind efectuate studii privind posibilitatea influențării proprietăților olfactive ale apei în condiții aerobe. În 1914, Ardern și Lockett au formulat și demonstrat pentru prima dată o soluție pentru problema tratării apelor uzate cu nămol activ, observând că depunerile solide ar trebui recirculate în loc de a fi eliminate complet din procesul de tratare. Descoperirea a fost

succedată rapid de punerea în practică la nivel industrial a mai multor instalații în Anglia și America. În anii următori, au fost proiectate diferite metode de îmbunătățire a sistemelor de aerare implicate în procesul de epurare. S-a observat potențialul de optimizare a procesului, considerând calitatea influentului, sensibilitatea la variațiile de debit și altele. Astfel, după anul 1960, se încearcă explicarea funcționării instalațiilor de epurare prin intermediul modelelor matematice, fiind introdus principiul ingineriei sistemelor și proceselor, având la bază observația conform căreia modelele ce descriu diferit funcționarea proceselor prezintă uneori descrieri matematice similare. Modelul procesului de tratare a apelor uzate reprezintă ansamblul de ecuații diferențiale ce corespund reacțiilor biologice și chimice în instalația de tratare.

Problema epurării biologice a apelor reziduale este extrem de importantă din punct de vedere al protecției și conservării mediului înconjurător, legislația în vigoare fiind riguroasă în acest sens. Agenți de poluare precum concentrația de substanțe organice, amoniu, fosfor etc., sunt eliminate prin procesul de epurare, astfel încât apa rezultată să îndeplinească standardul impus de lege pentru a putea fi deversată într-un receptor natural.

Datorită caracterului complex, neliniar cât și predispoziției la perturbații și incertitudini, modelarea și controlul proceselor de tratare biologică a apelor reziduale prezintă un grad ridicat de dificultate. Cu toate acestea, literatura de specialitate prezintă numeroase abordări privind modelarea și controlul acestor procese.

Primele modele dinamice, introduse la sfârșitul primei jumătăți a secolului trecut (Goodman și Englands 1974, Buhr *et al.* 1974), utilizau în principal în descrierea dinamică a procesului variabilele de stare substratul și biomasa, iar în modelarea degradării o reacție de ordinul unu (Eckenfelder și O'Connor 1955, McKinney 1962, Eckenfelder 1966). Ulterior, dependența de tip Monod a ratei de eliminare a concentrației de substrat organic a facilitat cunoașterea saturației capacității de degradare (Lawrence și McCarty 1970). Au fost propuse modele ce considerau biomasa activă, acumulată și inertă (Busby și Andrews 1975). Dold *et al.* (1980) a adus contribuții importante modelării mecaniciste a procesului de tratare cu nămol activ. O imagine de ansamblu privind evoluția modelării procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ este prezentată de Jeppsson (1996).

În 1983, IWA a inițiat aplicarea modelelor practice în proiectarea și operarea sistemelor de tratare biologică a apelor uzate cu nămol activ, iar în 1987 a publicat o primă reprezentare matematică condensată, ASM1 (Activated Sludge Model No. 1, Henze *et al.* 1987) care utilizează 13 variabile de stare și are ca obiectiv eliminarea carbonului organic și a azotului. Este primul model acceptat ca referință (Dircks *et al.* 2001, Roozeveld și van

Loosdrecht 2002), atât în domeniul cercetării, cât și al industriei (Gernaey *et al.* 2004). Modelul a fost ulterior extins, incluzând și descrierea procesului biologic de eliminare a fosforului și a fost numit ASM2 (Henze *et al.* 1995). Deși cuprinde un număr de 19 variabile de stare și 65 de parametri, încă nu include toate fenomenele observabile. Grupul IWA a efectuat alte evaluări ale modelului ASM2, obținându-se modelele ASM2d și ASM3 (Henze *et al.* 2000). Dependența fiabilității modelelor de un număr tot mai mare de parametri cinetici și stoichiometrici, ce depind la rândul lor de caracteristicile influentului apei uzate și necesită determinare experimentală (Jeppsson 1996), a condiționat apariția variantelor de ordin redus ale modelului ASM1, un exemplu fiind modelul propus de Nejari (1999) ce are doar patru variabile de stare: biomasa, substratul organic, oxigenul dizolvat și nămolul recirculat.

Din 1998, grupurile IWA și COST au dezvoltat instrumente software pentru testarea și evaluarea strategiilor de control a instalațiilor de tratare a apelor uzate cu nămol activ (Spanjers *et al.* 1998, Alex *et al.* 1999), cum ar fi platformele BSM1 și BSM2.

Din punct de vedere al tehnicilor de control, menționate în literatura de specialitate, pot fi amintite tehnicile convenționale bazate pe regulatoare liniare Marsili-Libelli (1992), Heinzle *et al.* (1993), Ayesa *et al.* (2006), Yoo și Kim (2009), tehnicile de control optimal Buitron *et al.* (2004), Fikar *et al.* (2005), Tzoneva (2007), Grigorieva și Khailov (2010), tehnicile de control predictiv Brdys și Zhang (2001), precum și tehnicile de control liniarizant adaptiv Renard *et al.* (1988) și Dochain și Perrier (1992).

Conducerea robustă tratează explicit incertitudinile în proiectarea reguletoarelor, funcționând corespunzător atât timp cât parametrii incerti sau perturbațiile se află într-un anumit domeniu de valori. Problema de conducere robustă constă în obținerea unui regulator care satisface specificațiile sistemului și în rejectarea perturbațiilor date (Gutman 2001). Se asigură robustețea în detrimentul criteriului de performanță (Gendron *et al.* 1993). Brdys *et al.* (2007) a propus o structură de comandă multistrat, ce utilizează multiple scale de timp ale dinamicilor instalației, pentru conducerea optimală robustă a procesului de epurare. Au fost, astfel, dezvoltate mai multe metode de conducere robustă: pornind de la conducerea clasică – QFT (Quantitative Feedback Theory) (Barbu *et al.* 2004b, Caraman *et al.* 2005, Barbu *et al.* 2010), pornind de la teoria conducerii moderne – H_∞ (Georgieva și Feyo de Azevedo 1999), H_2 (Halvarsson 2007) și μ (Sánchez-Peña și Sznaier 1998). Georgieva și Feyo de Azevedo (1999) au proiectat o structură de conducere robustă H_∞ de urmărire a referinței pornind de la un model liniar de ordin redus, având ca scop compensarea perturbațiilor în condiții de zgomot și de variații ale parametrilor procesului.

Literatura de specialitate conține referințe privind sisteme de control fuzzy pentru diferite procese de epurare biologică a apelor reziduale: controlul debitului de influent într-un sistem de colectare (Fukano 1993), controlul digestiei anaerobe (Mueller 1997, Steyer *et al.* 1997), controlul oxigenului dizolvat (Kalker *et al.* 1999), controlul amoniului într-un reactor biologic de nitrificare/denitrificare (Aoi *et al.* 1992), controlul dinamicilor nămolului (Marsili-Libelli 1992, Marsili-Libelli și Gigli 1997), supervizarea reguletoarelor locale într-un proces de epurare cu nămol activ (Devisscher *et al.* 2000, Kaya 2006, Barbu 2009).

În prezent conducerea proceselor de epurare se tratează multivariabil. Comparativ cu sistemele SISO, proiectarea conducerii sistemelor MIMO este mai dificilă datorită interacțiunilor dintre canale. O metodă de proiectare este separarea problemei de control în sisteme SISO și conducerea lor decuplată. În acest caz, performanța este afectată invers proporțional cu gradul de interacțiune dintre bucle.

Capitol 3

Modelarea proceselor de epurare a apelor uzate

Într-o instalație de tratare a apelor uzate cu nămol activ au loc următoarele procese: oxidarea materiei organice cu carbon, oxidarea materiei organice cu azot, înlăturarea fosforului, eliminarea de dioxid de carbon, azot etc, flocularea, obținerea unui amestec cu un procent scăzut de solide dizolvate sau aflate în suspensie.

La baza procesului de tratare cu nămol activ se află menținerea materiei în suspensie, materie reprezentată de bacterii, particule organice și anorganice, prin amestec sau prin aerare pneumatică. O parte din particulele organice pot fi descompuse prin procesul de hidroliză, în timp ce altele nu sunt afectate, reprezentând materia inertă. Astfel substratul va fi eliminat din apa uzată, producându-se mai multă biomasă. Cantitatea de materie aflată în suspensie este controlată prin adăugarea unui rezervor de sedimentare, din care o parte din nămolul decantat este recirculat, în timp ce nămolul excedentar este eliminat din instalație. Din partea superioară a decantorului se extrage în mod continuu efluentul care este trimis fie pentru continuarea tratamentului, fie este deversat direct într-o apă receptoare, condiționat de valorile indicatorilor legali privind deversarea. Instalația este prezentată schematic în Figura 3.1.

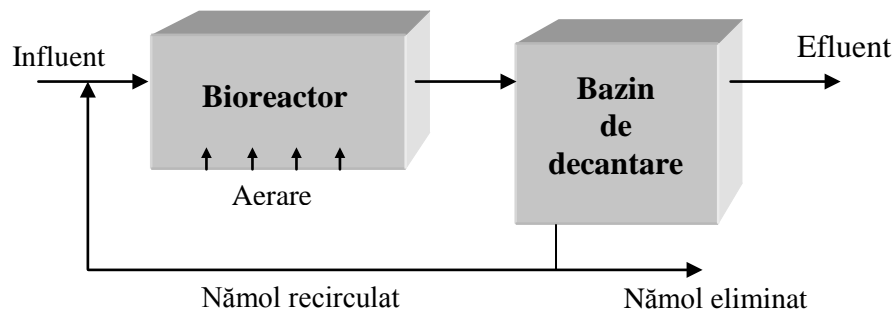


Figura 3.1. Schema instalației de tratare a apelor uzate cu nămol activ configurată pentru îndepărtarea biologică a substratului organic

Din lista modelelor propuse de IWA, ASM1 rămâne în continuare un model de bază utilizat în modelarea sistemelor cu nămol activ (Roeleveld și van Loosdrecht 2002), fiind acceptat atât în teorie, cât și în practică. Acesta este capabil să ofere o descriere cât mai precisă a producției de nămol. Concentrația materiei organice din apa uzată este măsurată prin intermediul cererii de oxigen chimic (COD). Varietatea compușilor de carbon organic și azot se împarte în funcție de biodegradabilitate și solubilitate. Cultura bacteriană dezvoltată în procesul de tratare a apelor uzate este de două tipuri: biomasă heterotrofă și biomasă autotrofă. Pe lângă cele 13 variabile de stare, împărțite în componente solubile S și componente insolubile X , ASM1 are în componență și 19 parametri pentru a descrie procesul de tratare a apelor uzate. Acest model este definit de 8 procese ce au loc în reactor, anoxic, respectiv aerat: creșterea heterotrofelor în mediul aerob, creșterea heterotrofelor în mediul anoxic, creșterea autotrofelor în mediul aerob, degradarea heterotrofelor, degradarea autotrofelor, amonificarea azotului solubil biodegradabil, hidroliza materiei organice, hidroliza azotului organic. Astfel, numărul proceselor fundamentale se poate restrânge la patru: creșterea și degradarea biomasei, amonificarea azotului organic și hidroliza compușilor organici.

Numărul mare de parametri și de reacții în descrierea procesului de tratare biologică a apelor uzate reprezintă principala deficiență a modelului ASM1, afectând conducerea automată a procesului de epurare biologică a apelor reziduale. Nejjari *et al.* (1999) a propus un model simplificat, de ordinul patru, adecvat pentru reducerea substanțelor organice, model ce descrie global procesul, având totodată un număr mai mic de parametri și de reacții.

Modelele matematice considerate implică următoarele ipoteze (Nejjari *et al.* 1999, Caraman *et al.* 2006a): conținutul bioreactorului aerat este perfect amestecat, în decantor nu au loc reacții biologice și chimice, nămolul este singura componentă recirculată în bazinul

aerat, concentrațiile de oxigen și substrat sunt neglijate în fluxul recirculat, debitul de ieșire din bazinul aerat este egal cu suma dintre debitul de ieșire al decantorului și debitul nămolului recirculat.

Variabilele de stare fundamentale ale procesului de tratare a apelor uzate sunt biomasa, substratul și oxigenul, unde viteza specifică de creștere a biomasei este un parametru cheie în descrierea dezvoltării nămolului, fiind reprezentată printr-o funcție complexă și dependentă de factori biologici și fizico-chimici, cum sunt: concentrațiile de biomasă, de substrat și de oxigen dizolvat, temperatura, pH-ul etc.

Modelul procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ considerat în Barbu (2009) este dat de ecuațiile (3.1) – (3.5):

$$\frac{dX}{dt} = \mu(t)X(t) + rD(t)X_R(t) - (1+r)D(t)X(t) \quad (3.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y}\mu(t)X(t) + D(t)(S_{in} - S(t)) - rD(t)S(t) \quad (3.2)$$

$$\frac{dDO}{dt} = -\frac{K_0}{Y}\mu(t)X(t) + \alpha W(DO_{sat} - DO(t)) + D(t)(DO_{in} - DO(t)) - rD(t)DO(t) \quad (3.3)$$

$$\frac{dX_R}{dt} = D(t) \cdot (1+r) \cdot X(t) - D(t) \cdot (\beta+r)X_R(t) \quad (3.4)$$

$$\mu(t) = \mu_{max} \frac{S(t)}{K_S + S(t)} \frac{DO(t)}{K_{DO} + DO(t)} \quad (3.5)$$

cu:

$$F_{in} = F_f = F; D = \frac{F}{V}; r = \frac{F_r}{F_f}; \beta = \frac{F_e}{F_f}.$$

unde: $X(t)$ – concentrația de biomasă; $S(t)$ – concentrația de substrat organic; $DO(t)$ – concentrația de oxigen dizolvat; $X_R(t)$ – concentrația de biomasă recirculată; $D(t)$ – rata de diluție în bazinul aerat; S_{in} – concentrația substratului în influent; DO_{in} – concentrația oxigenului dizolvat în influent; Y – coeficient de producție a biomasei; μ – viteza specifică de creștere a microorganismelor; μ_{max} – rata specifică maximă de creștere; K_S – constanta de semi-saturație pentru substrat; K_{DO} – constanta de semi-saturație pentru oxigenul dizolvat; K_0 – constanta de model; DO_{sat} – concentrația de saturație a oxigenului dizolvat; α – rata de transfer a oxigenului; W – rata de aerare; r – rata de

nămol recirculat; β – rata de nămol excedentar; F_{in} – fluxul de intrare în bioreactor; F_f – debitul de alimentare a decantorului; F_r – fluxul de recirculare a nămolului activ în bioreactor; F_e – fluxul de eliminare a nămolului excedentar din bioreactor; V – volumul bazinului de aerare.

Modelul procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ considerat de Ifrim (2012) este descris de ecuațiile (3.6) – (3.10):

$$\frac{dX}{dt} = \mu(t)X(t) - \mu_S X(t) + rD(t)X_R(t) - (1+r)D(t)X(t) \quad (3.6)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y}(\mu(t)X(t) - \mu_S X(t)) + D(t)(S_{in} - S(t)) - rD(t)S(t) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dDO}{dt} = & -\frac{1-Y}{Y}(\mu(t)X(t) - \mu_S X(t)) \cdot 10^3 + \alpha W \cdot 60(DO_{sat} - DO(t)) + \\ & + D(t)(DO_{in} - DO(t)) - rD(t)DO(t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\frac{dX_R}{dt} = D_S \cdot (1+r) \cdot X(t) - D_S \cdot (\beta+r)X_R(t) - \eta \cdot D_S(1-\beta) \cdot X_R(t) \quad (3.9)$$

$$\mu(t) = \mu_{max} \frac{S(t)}{K_S + S(t)} \frac{DO(t)}{K_{DO} + DO(t)} \quad (3.10)$$

cu:

$$D = \frac{F_f}{V}; D_S = \frac{F_f}{V_S} = D \frac{V}{V_S}.$$

unde: D_S – rata de diluție în decantor; V_S – volumul secțiunii n ; η – parametru subunitar ce reprezintă fracțiunea de biomasă ce migrează în secțiunea $n-1$ împreună cu fluxul ascendent.

Complexitatea procesului biologic de tratare a apelor uzate generează modele complexe, fiind astfel necesară utilizarea unui model de ordin redus ce impune determinarea și folosirea parametrilor cinetici ai procesului, variabili pentru fiecare caz concret al apei supuse epurării. Parametrii modelului au fost identificați experimental pe stația pilot de tratare a apelor uzate, prezentată în (Ifrim 2012), utilizând o apă sintetică.

În (Georgieva și Feyo de Azevedo 1999) se prezintă o versiune simplificată a modelului Nejjari, de ordinul 3, în care se consideră că oxigenul este nelimitat și că în procesul de epurare biologică a apelor reziduale există două dinamici, din punct de vedere al scării de timp: o dinamică aferentă proceselor cinetice și o dinamică mult mai rapidă,

aceea a evoluției concentrației de oxigen dizolvat. Ecuațiile de bilanț de material ale procesului de epurare a apelor reziduale sunt date de relațiile (3.11) – (3.14).

$$\dot{X}(t) = \mu(S) \cdot X(t) - \frac{F_{in}(t) + F_r(t)}{V} \cdot X(t) + \frac{F_r(t)}{V} \cdot X_R(t) \quad (3.11)$$

$$\dot{S}(t) = -\frac{1}{Y} \cdot \mu(S) \cdot X(t) + \frac{F_{in}(t)}{V} \cdot S_{in} - \frac{F_{in}(t) + F_r(t)}{V} \cdot S(t) \quad (3.12)$$

$$\dot{X}_R(t) = \mu(S) \cdot X_R(t) - \frac{F_{in}(t)}{V} \cdot X_R(t) + \frac{F_r(t)}{V} \cdot (r(t) - 1) \cdot X_R(t) \quad (3.13)$$

$$\mu(S) = \frac{\mu_{max} \cdot S(t)}{K_S + S(t)} \quad (3.14)$$

unde: X – biomasa, S – substratul, V – volumul bioreactorului, F_r – flux de recirculare a nămolului, F_{in} – fluxul de alimentare a bioreactorului, S_{in} – concentrația substratului în influent, $\mu(S)$ – viteza specifică de creștere a microorganismelor, μ_{max} – rata specifică maximă de creștere; K_S – constanta de saturație pentru substratul organic biodegradabil, r – rata de recirculare a nămolului.

Analiza RGA a procesului de epurare biologică a apelor reziduale descris prin modelul Nejari

În Barbu (2009) este realizată o analiză RGA a modelului procesului de epurare biologică a apelor reziduale, având la bază versiunea Nejari, model care are trei variabile de intrare (D – rata de diluție, W – rata de aerare și r – rata de recirculare) și două variabile de ieșire (S – concentrația de substrat organic și DO – concentrația de oxigen dizolvat), (3.15).

$$\begin{bmatrix} S \\ DO \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{D-S} & G_{W-S} & G_{r-S} \\ G_{D-DO} & G_{W-DO} & G_{r-DO} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D \\ W \\ r \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Au fost parcurși toți pașii analizei RGA pentru cazul sistemelor nepătratice: sistemul a fost liniarizat în cele trei puncte de funcționare (Debit_mare, Debit_meniu și Debit_Mic), a fost calculată matricea coeficienților de transfer, a fost stabilită matricea de scalare și a fost determinată matricea RGA, concluzionând prin faptul că rata de recirculare prezintă cea mai mică influență pentru toate punctele de funcționare.

De asemenea, Ifrim (2012) analizează utilizând metoda RGA posibilitatea ca sistemul de epurare biologică a apelor reziduale să fie tratat ca decuplat, fiind abordată o

versiune a modelului Nejjari cu două intrări (D – rata de diluție și W – rata de aerare) și două variabile de ieșire (S – concentrația de substrat organic și DO – concentrația de oxigen dizolvat), prin cuantificarea gradului de interacțiune între semnalele de intrare/ieșire, ($D \rightarrow S$ și $W \rightarrow DO$). Au fost identificate două puncte de funcționare pentru două concentrații ale substratului de intrare $S_{in} = 0.8g \cdot L^{-1}$ și $S_{in} = 3g \cdot L^{-1}$, pentru fiecare punct de funcționare considerându-se succesiv patru concentrații ale oxigenului dizolvat, 1, 2, 3 și $4mg \cdot L^{-1}$. Rezultatul analizei indică faptul că, pentru o concentrație a oxigenului dizolvat între $1mg \cdot L^{-1}$ și $2mg \cdot L^{-1}$, sistemul poate fi decuplat, interacțiunile dintre canale având valori minime.

Capitol 4

Controlul H_{∞} al proceselor de epurare biologică a apelor reziduale

Controlul robust permite abordarea incertitudinilor în proiectarea reguletoarelor, în condițiile în care incertitudinile se află într-un domeniu predefinit, având ca obiectiv principal conservarea performanței și stabilității sistemului.

Capitolul curent are ca punct de referință strategia de control robust H_{∞} a procesului de tratare biologică a apelor reziduale cu nămol activ propusă de Georgieva și Feyo de Azevedo (1999). Această lucrare prezintă controlul indirect al concentrației de substrat organic prin controlul concentrației de biomasă în fluxul de recirculare pe baza modelului matematic de ordinul 3 descris de relațiile (3.11) – (3.14). Obiectivul autorilor este realizarea unei structuri de control robust cu urmărirea referinței concentrației de biomasă recirculată a procesului, o bună compensare a perturbațiilor și rejecția zgomotului de măsură, cât și compensarea variațiilor parametrilor modelului.

Un număr mare de instalații de tratare a apelor reziduale prezintă un mod de operare continuu, considerând rata de diluție ca o intrare ce influențează semnificativ procesul. Practic, concentrația de substrat este influențată direct de creșterea aerobă a biomasei și indirect de dinamica concentrației de oxigen dizolvat. Procesul de epurare biologică a apelor reziduale este unul multivariabil, dar el poate fi tratat decuplat, identificându-se două canale de comandă principale: 1. rata de diluție – concentrație de substrat organic și 2. rata

de aerare – concentrație de oxigen dizolvat. Se tratează pe rând problema de conducere robustă monovariabilă pe canalele de comandă menționate, în care parametrii incerți ai modelului au o variație sinusoidală, iar perturbația sistemului este dată de substratul organic din influent S_{in} . Incertitudinile parametrilor cinetici și condițiile de operare au fost considerate astfel încât să coincidă caracteristicilor tipice ale apelor reziduale domestice. Sinteza unui compensator H_{∞} pentru controlul concentrațiilor de substrat organic și de oxigen dizolvat urmărește secvența de pași prezentată în continuare:

P1. Modelarea matematică și liniarizarea procesului neliniar

Caracterul puternic neliniar al procesului de epurare cu nămol activ impune liniarizarea modelului, rezultatul fiind un model liniar cu parametri incerți. Printre sursele generatoare de incertitudini se numără atât dinamicile nămolului, cât și concentrația și compoziția organică a influentului caracterizat de o periodicitate diurnă. Este, de asemenea, necesar ca algoritmi de conducere utilizați în scopul stabilizării procesului aerob de tratare a apelor reziduale să țină cont și de prezența sau lipsa precipitațiilor în rețeaua de colectare. Compensatorul corespunzător are rol în stabilizarea sistemului nominal, precum și a clasei de sisteme asociate ce prezintă caracteristici similare.

Modelul matematic al procesului de epurare biologică cu nămol activ este descris de relațiile (3.6) – (3.10), iar structura de control în circuit închis este prezentată în Figura 4.1,

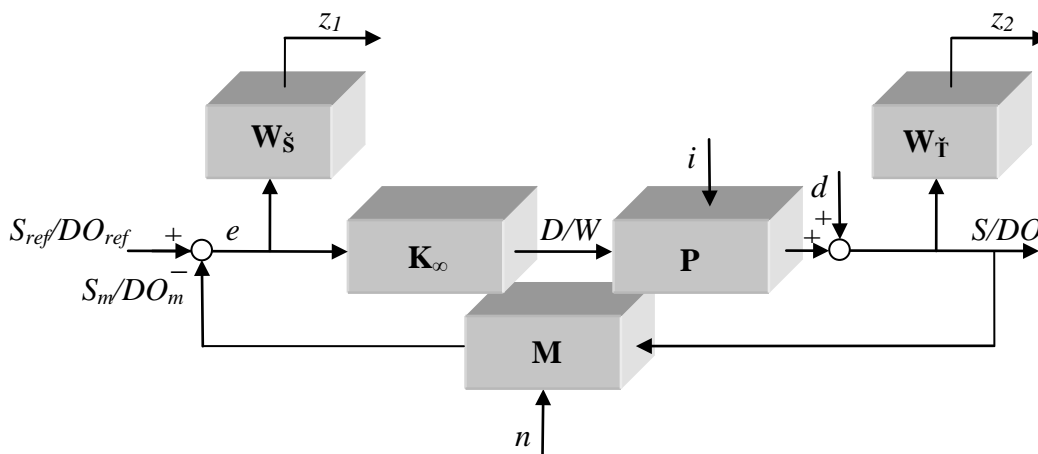


Figura 4.1. Structura de control în circuit închis a procesului de epurare a apelor reziduale

în care: P – procesul de epurare a apelor reziduale, K_{∞} – compensatorul, M – senzorul, W_S – ponderea funcției de sensibilitate, W_T – ponderea funcției de sensibilitate complementară, S/DO – concentrațiile de substrat organic și de oxigen dizolvat,

S_{ref} / DO_{ref} – referințele impuse pentru concentrațiile de substrat organic și de oxigen dizolvat, S_m / DO_m – concentrațiile de substrat organic și oxigen dizolvat măsurate de senzorul M , e – eroarea dintre mărimea de referință și mărimea măsurată, D – rata de diluție, W – rata de aerare, n – zgomotul de măsură a senzorului M , d – perturbații ale sistemului, i – incertitudini parametrice, z_1 și z_2 – componente ce trebuie compensate.

Compensatorul are rolul de a realiza urmărirea referințelor impuse S_{ref} și DO_{ref} cu erori cât mai mici și de a compensa efectul perturbațiilor externe, precum și al zgomotului de măsură. În acest caz, perturbațiile S_{in} și F_{in} sunt considerate măsurabile. Mărimea controlată S este concentrația de substrat organic, iar mărimea controlată DO este concentrația de oxigen dizolvat.

Incertitudinile parametrilor cinetici și condițiile de operare au relevanță pentru ape reziduale domestice. Efectul incertitudinilor de model este încorporat impunând variații sinusoidale atât parametrilor, prezentați în Tabelul 4.1, cât și semnalelor.

Tabelul 4.1. Variabilele numerice ale procesului de epurare

Variație sinusoidală	Valoare minimă	Valoare nominală	Valoare maximă	Unitate de măsură
$\mu_{\max} = \mu_{\max}^{nom} + 0.22 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$	0.11	0.33	0.55	h^{-1}
$K_S = K_S^{nom} + 0.085 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t + \frac{3\pi}{12}\right)$	0.01	0.095	0.18	$g \cdot L^{-1}$
$Y = \mu_{\max}^{nom} + 0.115 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$	0.46	0.575	0.69	–
$r = r^{nom} + 1.7 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$	0.3	2.00	3.7	–
$S_{in} = S_{in}^{nom} \left(1 + 0.33 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)\right)$	$0.66 \cdot S_{in}$	1.20	$1.33 \cdot S_{in}$	$g \cdot L^{-1}$
$F_{in} = \left(F_{in}^{nom} \left(1 + 0.33 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3648}t + \frac{2.82\pi}{2}\right)\right) \right) \cdot \left(1 + 0.01 \sin\left(\frac{\pi}{12}\right)\right)$	$0.66 \cdot F_{in}$	1.20	$1.33 \cdot F_{in}$	$L \cdot h^{-1}$
$S_{ref} = S_{ref}^{nom} + 0.0415 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$	0.04	0.0835	0.125	$g \cdot L^{-1}$
$DO_{ref} = DO_{ref}^{nom} + \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$	1	2	3	$mg \cdot L^{-1}$

P2. Specificațiile de performanță

Efectul perturbației asupra semnalelor de ieșire a sistemului este caracterizat de comportarea în frecvență a funcțiilor de sensibilitate $\check{S}_S(s)$ și $\check{S}_{DO}(s)$, în circuit închis, iar minimizarea acestora are drept consecință atenuarea efectului perturbațiilor asupra semnalelor de ieșire și minimizarea erorilor de urmărire. Relația dintre perturbații și funcțiile de ponderare $W_{\check{S}-S}(s)$ și $W_{\check{S}-DO}(s)$ trebuie să fie direct proporțională. O condiție necesară este ca $\check{S}_S(s)$ și $\check{S}_{DO}(s)$ să fie menținute sub inversul funcțiilor de ponderare $W_{\check{S}-S}^{-1}(s)$ și $W_{\check{S}-DO}^{-1}(s)$ în banda de joasă frecvență.

Robustețea sistemului în buclă închisă în prezența perturbațiilor este caracterizată de comportarea în frecvență a funcțiilor de sensibilitate complementară $\check{T}_S(s)$ și $\check{T}_{DO}(s)$ în circuit închis, iar minimizarea acestora are drept consecință creșterea gradului de robustețe a sistemului, totodată fiind minimizat și efectul zgomotului de măsură, înlăturându-se riscul destabilizării sistemului în circuit închis. O condiție necesară este ca $\check{T}_S(s)$ și $\check{T}_{DO}(s)$ să fie menținute sub inversul funcțiilor de ponderare $W_{\check{T}-S}^{-1}(s)$ și $W_{\check{T}-DO}^{-1}(s)$ în banda de înaltă frecvență.

Identificarea marginii incertitudinii multiplicative $|\Delta_m| \leq w(s)$ precede identificarea celei mai mari perturbații anticipate. Alegerea funcțiilor de ponderare $W_{\check{T}-S}(s)$ și $W_{\check{T}-DO}(s)$ depinde de funcția de transfer a sistemului de a fi proprie sau strict proprie, fiind necesară în cel de-al doilea caz de structurile proprii $W_{\check{T}-S}(s) \cdot P(s)$ și $W_{\check{T}-DO}(s) \cdot P(s)$. Adicional, pentru a îndeplini criteriile de performanță, frecvențele de tăiere a $W_{\check{S}-S}(j\omega)$ și $W_{\check{S}-DO}(j\omega)$ în diagrama Bode trebuie să precedă frecvențele de tăiere a $W_{\check{T}-S}(j\omega)$ și $W_{\check{T}-DO}(j\omega)$.

Funcțiile de ponderare adiționale $W_{\check{S}-S}(s)$, $W_{\check{S}-DO}(s)$ și $W_{\check{T}-S}(s)$, $W_{\check{T}-DO}(s)$ asigură flexibilitate specificațiilor de performanță. Pentru sinteza unui compensator ce prezintă o serie de toleranțe la incertitudini, $\|T_{zw}\|_\infty$ trebuie să fie mai mică decât o constantă particulară γ .

Periodicitatea diurnă a procesului de tratare a apelor uzate cu nămol activ condiționează plasarea unei ponderi mari în vecinătatea $\frac{\pi}{12} h^{-1}$ cu rol în constrângerea

funcțiilor de sensibilitate $\check{S}_S(s)$ și $\check{S}_{DO}(s)$, astfel încât compensatorul sistemului să poată atenua variațiile pe o perioadă mai mare de $2h$ sau echivalentul alegerii unei lărgimi de bandă πh^{-1} (Georgieva și Feyeo de Azevedo 1999), alegându-se astfel funcțiile de ponderare descrise de relațiile (4.1), (4.2) și (4.3), (4.4).

$$W_{\check{S}-S}^{-1} = 0.01 \cdot \frac{150 \cdot s + 1}{0.3 \cdot s + 1} \quad (4.1)$$

$$W_{\check{T}-S}^{-1} = \frac{0.01 \cdot s^2 + 0.1 \cdot s + 1}{0.1 \cdot s^2 + 0.01 \cdot s + 0.01} \quad (4.2)$$

$$W_{\check{S}-DO}^{-1} = 0.01 \cdot \frac{550 \cdot s + 1}{2.3 \cdot s + 1} \quad (4.3)$$

$$W_{\check{T}-DO}^{-1} = \frac{0.01 \cdot s^2 + 0.1 \cdot s + 1}{0.1 \cdot s^2 + 0.01 \cdot s + 0.01} \quad (4.4)$$

Alegerea $W_{\check{S}-S}^{-1}(0) = W_{\check{S}-DO}^{-1}(0) = 0.01$ în cadrul funcțiilor de sensibilitate înseamnă o eroare de urmărire în regim staționar de cel mult 1% și, în același timp, $W_{\check{S}-S}^{-1}(s \rightarrow \infty) = 5$ și $W_{\check{S}-DO}^{-1}(s \rightarrow \infty) = 2.39$ denotă o amplificare a perturbațiilor de frecvență înaltă cu un factor 5, respectivi de 2.39.

Pornind de la premisele de condiționare a frecvențelor de tăiere și de alegere a $W_{\check{T}-S}(s)$ și $W_{\check{T}-DO}(s)$ astfel încât să corespundă lărgimii de bandă dorită de 2π ($24h$), se impune ca funcția de sensibilitate complementară să fie mică în jurul frecvenței în care zgomotul de măsură este amplificat.

P3. Reprezentarea modelului extins în format biport

Pornind de la modelul liniarizat monovariabil la care se adaugă funcțiile de ponderare se obține procesul extins multivariabil, descris în Figura 4.2.

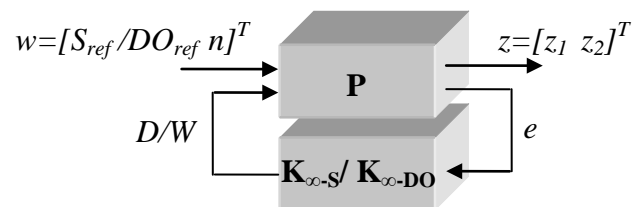


Figura 4.2. Schema biport a modelului extins

Efectul semnalelor exogene w asupra mărimilor de calitate z în circuit închis este cuantificat în termeni de energie și de cazul celei mai nefavorabile perturbații w , fiind dat de funcțiile de transfer T_{zw} pentru fiecare canal de comandă considerat, reprezentând, în același timp, și un indicator de cost.

Matricele procesului extins în spațiul stărilor satisfac toate ipotezele A1 – A5 privind existența unui compensator:

A1. $D_{11} = 0$

A2. Perechea (A, B_2) este stabilizabilă.

A3. Perechea (C_2, A) este detectabilă.

A4. Rangul matricei D_{12} este egal cu rangul mărimii de control u , adică $\text{rang}D_{12} = 1$.

A5. Rangul matricei D_{21} este egal cu rangul mărimii de ieșire y , adică $\text{rang}D_{21} = 1$.

P4. Sinteza compensatorului H_∞

Pe baza proceselor extinse pentru fiecare canal de comandă s-au obținut funcțiile de transfer a compensatoarelor H_∞ stabile (4.5) și (4.6) care au același număr de stări ca și procesele extinse.

$$K_{\infty-S} = \frac{2.5713 \cdot s^4 + 30.4591 \cdot s^3 + 305.3361 \cdot s^2 + 482.1053 \cdot s + 74.5150}{s^5 + 19.2744 \cdot s^4 + 178.1948 \cdot s^3 + 605.6393 \cdot s^2 + 587.9534 \cdot s + 3.8928} \quad (4.5)$$

în care polii circuitului închis sunt:

$$\{-7.0575 \pm 7.0588i; -5 \pm 8.6603i; -2.4714; -1.7216; -1.6728; -0.9663; -0.1732; -0.0067\}$$

$$K_{\infty-DO} = \frac{47.9 \cdot s^4 + 567.7 \cdot s^3 + 5691.1 \cdot s^2 + 8985.9 \cdot s + 1388.9}{s^5 + 70.2 \cdot s^4 + 9777.4 \cdot s^3 + 6296.4 \cdot s^2 + 3603.8 \cdot s + 6.5} \quad (4.6)$$

în care polii circuitului închis sunt:

$$\{-53.0277; -7.6890 \pm 6.3381i; -5.0000 \pm 8.6603i; -1.6728; -1.5580; -0.1871; -0.1732; -0.0018\}$$

P5. Analiza robusteții în domeniul frecvență

În Figurile 4.3 și 4.5 sunt prezentate funcțiile de sensibilitate și sensibilitate complementară, observându-se totodată îndeplinirea condițiilor de performanță, precum și condiția ca frecvențele de tăiere a lui $W_{\tilde{S}-S}(s)$ și $W_{\tilde{S}-DO}(s)$ să se afle înaintea frecvențelor de tăiere a lui $W_{\tilde{T}-S}(s)$ și $W_{\tilde{T}-DO}(s)$. În Figurile 4.4 și 4.6 sunt prezentate

caracteristicile funcțiilor de cost T_{zw-S} și T_{zw-DO} în funcție de care s-au scalat funcțiile de ponderare.

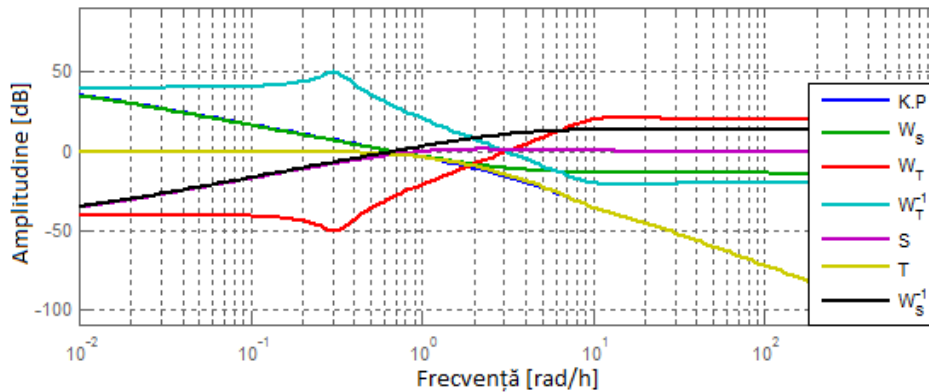


Figura 4.3. Caracteristicile Bode ale canalului de comandă rata de diluție – concentrația de substrat organic

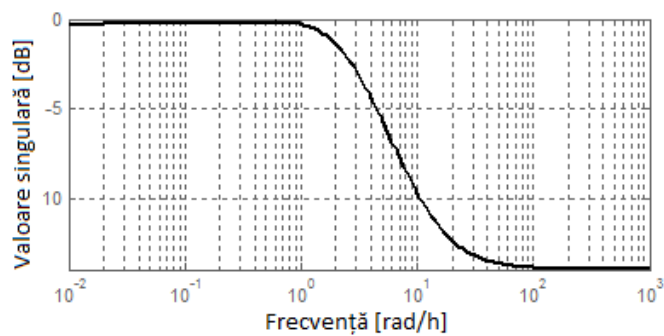


Figura 4.4. Caracteristica funcției de cost T_{zw-S} în domeniul frecvență

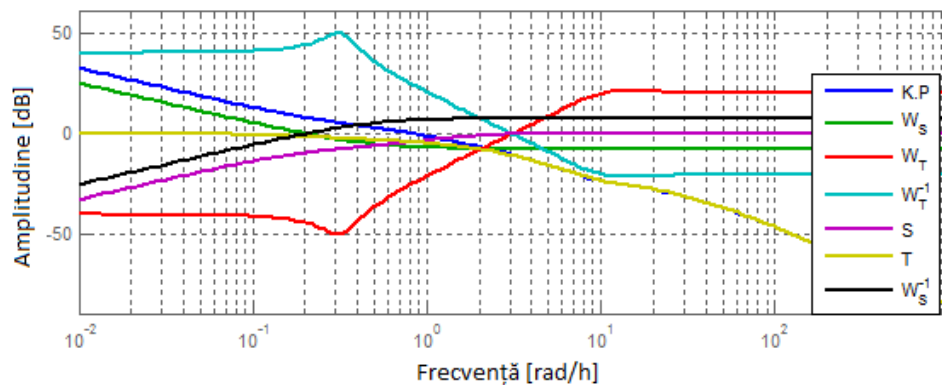


Figura 4.5. Caracteristicile Bode ale canalului de comandă rata de aerare – concentrația de oxigen dizolvat

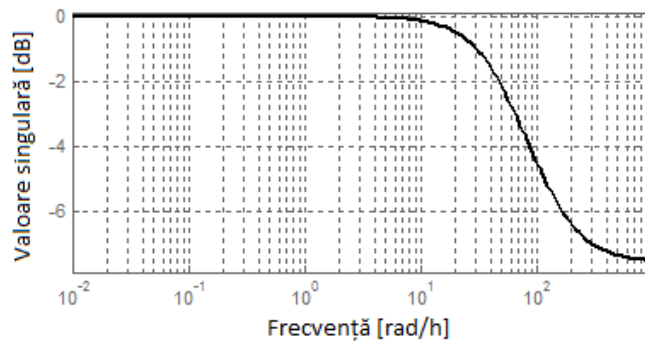


Figura 4.6. Caracteristica funcției de cost T_{zw-DO} în domeniul frecvență

P6. Rezultate obținute prin simulare numerică a controlului H_∞ al procesului neliniar de epurare a apelor reziduale

Pentru validarea performanțelor sistemului neliniar de epurare biologică a apelor reziduale, descris de relațiile (3.6) – (3.10), obținute în urma analizei, s-a efectuat o serie de simulări, rezultatele fiind prezentate în cele ce urmează. Schema sistemului în circuit închis pentru controlul procesului de epurare biologică cu nămol activ, este ilustrată în Figura 4.7.

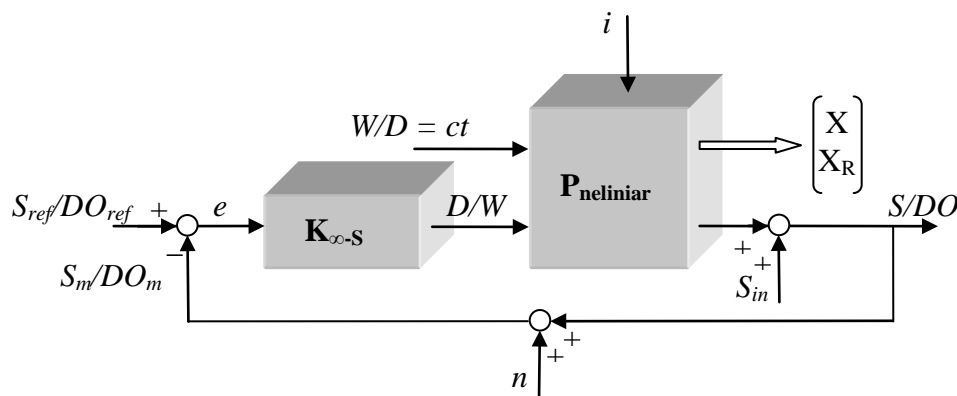


Figura 4.7. Schema de control pentru fiecare canal de comandă utilizat în simulare

Simulările pentru fiecare canal de comandă s-au realizat în prezența incertitudinilor parametrice de forma unor variații sinusoidale mărginite, prezentate în Tabelul 4.1. Rezultatele obținute în urma simulărilor procesului de epurare biologică a apelor reziduale în cazul cel mai nefavorabil, garantează stabilitatea sistemului în circuit închis prin urmărirea referințelor impusă, oscilațiile mărimilor de ieșire fiind neglijabile, ținând cont că variațiile sinusoidale parcurg întregul interval caracteristic fiecărui parametru al modelului sau semnalului de perturbației. Figurile 4.8 și 4.9 prezintă evoluțiile sistemului în prezența

variațiilor sinusoidale simultane ale parametrilor μ_{\max} , K_S , Y , a ratei de recirculare r și a perturbației S_{in} în prezența zgomotului de măsură.

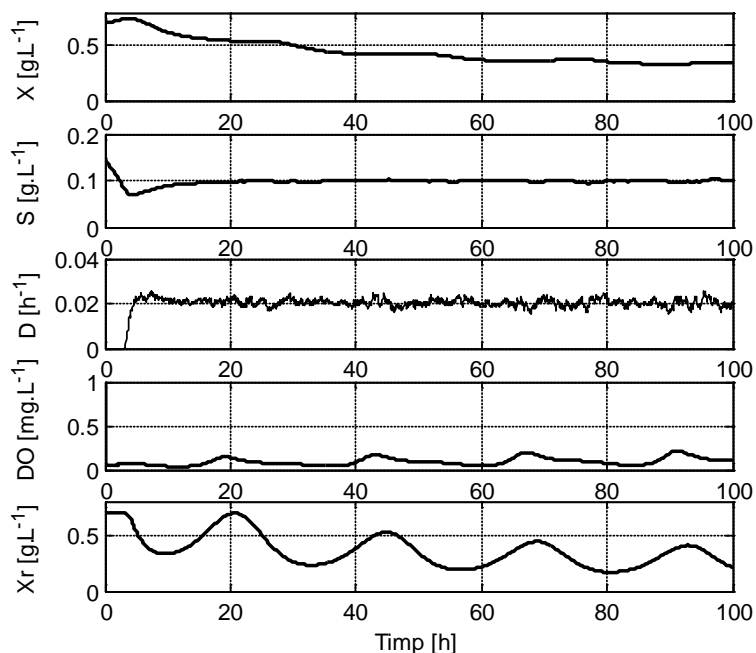


Figura 4.8. Rezultatele simulării canalului de comandă rata de diluție – concentrația de substrat organic în prezența unor variații sinusoidale ale parametrilor μ_{\max} , K_S , Y , r , a perturbației S_{in} și a zgomotului de măsură

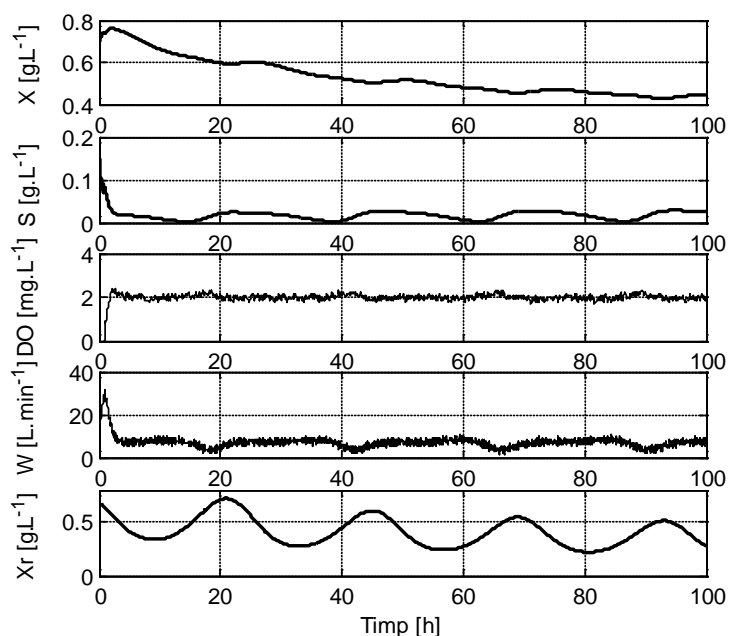


Figura 4.9. Rezultatele simulării canalului de comandă rata de aerare – concentrația de oxigen dizolvat în prezența unor variații sinusoidale ale parametrilor μ_{\max} , K_S , Y , r , a perturbației S_{in} și a zgomotului de măsură

Controlul multivariabil al procesului de epurare biologică

Figura 4.10 evidențiază grafic regimul pluviometric între anii 1901 – 2000, pe baza datelor statistice furnizate de Anuarul Statistic al României, privind distribuția lunară a cantităților medii de precipitații pentru mai multe centre meteorologice de pe teritoriul României. Se observă că, în general, lunile cele mai bogate în precipitații sunt Mai, Iunie și Iulie, aferente sezonului cald iar lunile sărace în precipitații sunt cele de iarnă, putându-se astfel concluziona că regimul pluviometric este caracterizat prin maxime de vară și minime de iarnă. Procentual, atât creșterea maximă, cât și scăderea maximă a precipitațiilor este de aproximativ 33.33%. Aplicând aceste observații în relația (4.7), s-a controlat procesul de epurare biologică a apelor reziduale considerând-se debitul influentului pluvial pe un interval de un an de zile:

$$S_{in} = \frac{S_N \cdot F_N}{F_N + F_P - F_S} \quad (4.7)$$

unde: S_N – concentrația de substrat organic în condiții normale, F_N – debitul influentului în condiții normale, F_P – debitul influentului în condiții de ploaie, F_S – debitul influentului în condiții de secetă. De asemenea, este luată în calcul și o variație diurnă de 1% a apelor reziduale domestice.

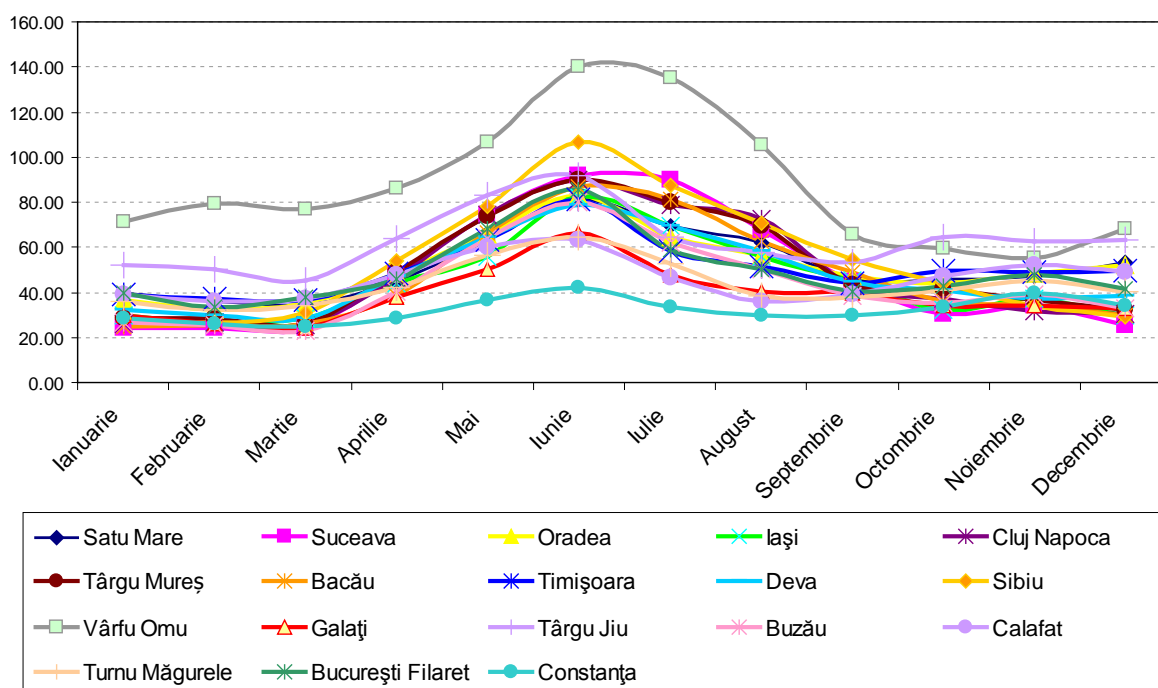


Figura 4.10. Valori medii precipitații atmosferice lunare între anii 1901 și 2000

Analiza RGA din Capitolul 3 permite ca funcțiile de transfer ale compensatoarelor să coincidă cu cele din relațiile (4.5) și (4.6). Sistemul constă în două intrări de comandă $u = [D \ W]$, patru stări $x = [X \ S \ DO \ X_R]$ și două ieșiri măsurabile $y = [S \ DO]$.

Pentru controlul procesului de epurare biologică cu nămol activ s-a utilizat schema de control din Figura 4.11. Mărimile controlate sunt concentrația de substrat organic S și concentrația de oxigen dizolvat DO .

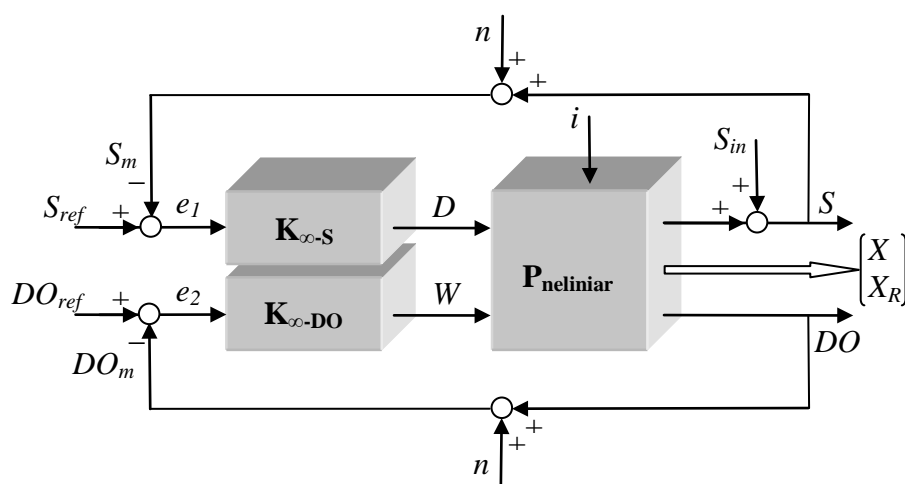


Figura 4.11. Schema de conducere multivariabilă a procesului de epurare cu nămol activ

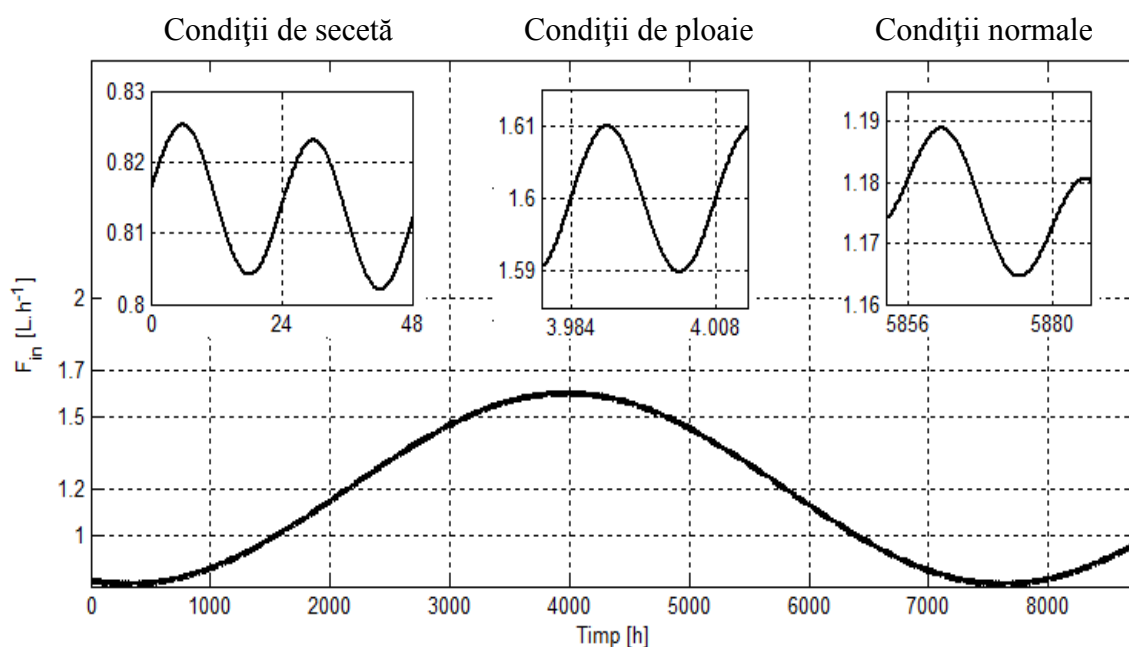


Figura 4.12. Simularea precipitațiilor pe un an de zile în prezența variației sinusoidale diurne

În Figura 4.12, cele trei secțiuni (în zoom) prezintă variații diurne în condiții de precipitații scăzute (0–48h corespunzătoare zilelor de 1 și 2 Ianuarie), de precipitații abundente (3984–4008h corespunzătoare zilei de 15 Iunie) și de precipitații normale (5856–5880h corespunzătoare zilei de 1 Septembrie). Rezultatele obținute în urma simulărilor numerice sunt ilustrate în Figura 4.13.

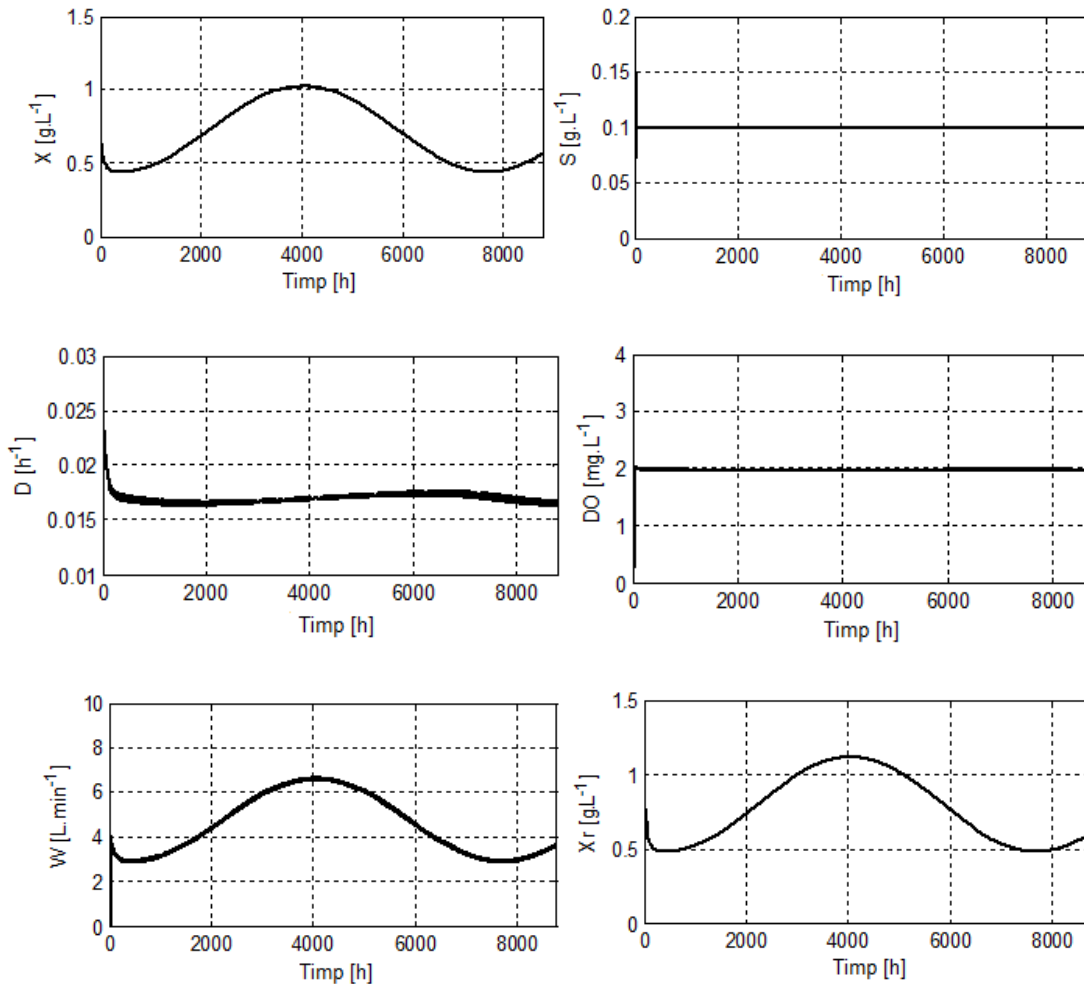


Figura 4.13. Evoluția procesului de epurarea a apelor reziduale în prezența condițiilor de precipitații și de variație diurnă a apelor domestice

Pentru validarea performanțelor sistemului neliniar multivariabil, s-au efectuat simulări în care s-au considerat variațiile sinusoidale mărginite prezentate în Tabelul 4.1, unde referințele concentrațiilor de substrat organic și de oxigen dizolvat sunt $S_{ref} = 0.1g \cdot L^{-1}$ și $DO_{ref} = 2mg \cdot L^{-1}$. Figura 4.14 prezintă evoluția sistemului în buclă închisă în prezența variațiilor sinusoidale simultane ale parametrilor μ_{max} , K_S , Y , a ratei de recirculare r și a perturbației S_{in} în prezența zgomotelor de măsură.

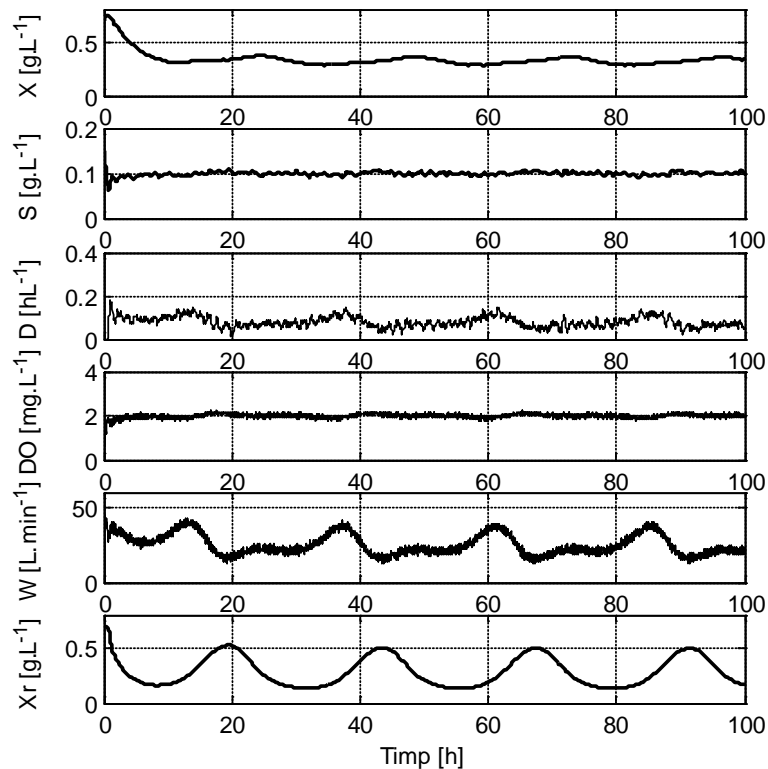


Figura 4.14. Rezultatele simulării în prezența unor variații sinusoidale ale parametrilor μ_{\max} , K_S , Y , r , a perturbației S_{in} și a zgomotelor de măsură

Compensatoarele asigură urmărirea referințelor impuse cu erori cât mai mici și compensarea efectului perturbațiilor externe, precum și al zgomotul de măsură, pe când oscilațiile mărimilor de ieșire – concentrațiile de substrat organic și de oxigen dizolvat – sunt neglijabile, ținând cont și de faptul că variațiile sinusoidale parcurg întregul interval caracteristic fiecărui parametru de model sau semnal.

Capitol 5

Contribuții privind strategiile de conducere fuzzy pentru procesele de epurare cu nămol activ

Tehnicile de conducere avansată devin din ce în ce mai necesare și mai utilizate datorită caracterului multivariabil, complex, neliniar, cu parametri varianți în timp, predispoziției la incertitudini și perturbații a procesului de epurare a apelor reziduale cu nămol activ, ce contribuie la imposibilitatea aplicării unei conduceri automate prin metode

convenționale. Logica fuzzy reprezintă prin definiție o recomandare și totodată una din cele mai utilizate tehnici pentru conducerea acestui tip de sisteme.

În continuare, se va aborda procesul de epurare biologică a apelor reziduale descris de relațiile (3.6) – (3.10). Așa cum este prezentat în (Olsson și Jeppsson 1994), se pot evidenția două tipuri de dinamici: una rapidă – a oxigenului dizolvat ce se desfășoară pe un interval de câteva minute și una lentă – a biomasei și substratului organic ce se desfășoară pe un interval de câteva ore până la câteva zile. Acest proces poate fi reprezentat sistemic conform Figurii 5.1.

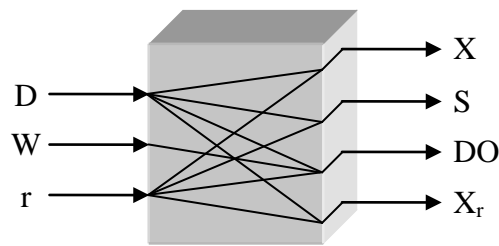


Figura 5.1. Reprezentarea sistemică a procesului de epurare a apelor reziduale

Procesul de epurare a apelor reziduale poate fi controlat prin trei variabile de comandă: rata de diluție, rata de aerare și rata de recirculare a nămolului, având ca variabile de ieșire: concentrațiile de biomasă, substrat organic, oxigen dizolvat și nămol recirculat.

Deși nu reprezintă un obiectiv în sine, controlul concentrației de oxigen dizolvat este fundamental pentru procesul de epurare a apelor reziduale cu nămol activ, datorită cerințelor stricte în ceea ce privește calitatea efluentului. Prin utilizarea ratei de aerare W pentru reglarea nivelului de oxigen dizolvat din bioreactor se asigură practic și un nivel satisfăcător pentru concentrația substratului organic (Katebi *et al.* 1999, Nezam 2003, Caraman *et al.* 2006b). Un control adecvat al concentrației de oxigen dizolvat poate crește eficiența eliminării de substrat cu până la 10% (Ifrim 2012).

Controlul fuzzy al procesului de epurare biologică a apelor reziduale în regim decuplat

Canalele de comandă utilizate în procesul de epurare a apelor reziduale sunt: rata de aerare – concentrația de oxigen dizolvat, aferent controlului indirect al concentrației de substrat organic, rata de diluție – concentrația de substrat organic și rata de nămol recirculat – concentrația de substrat organic, aferente controlului direct.

Concentrația de oxigen dizolvat este manipulată de sistemele de aerare ce transportă aer în bioreactor și furnizează oxigenul necesar proceselor biologice cât și omogenizează nămolul recirculat cu influentul. Aerarea prezintă însă și un consum ridicat de energie,

deținând mai mult de 60% din cerința de energie totală a instalației de epurare (Han *et al.* 2008).

Pentru a analiza influența ratei de aerare în reducerea concentrației de substrat, s-a utilizat sistemul din Figura 5.2, în care regulatorul fuzzy a menținut constantă concentrația de oxigen dizolvat la variația ratei de diluție.

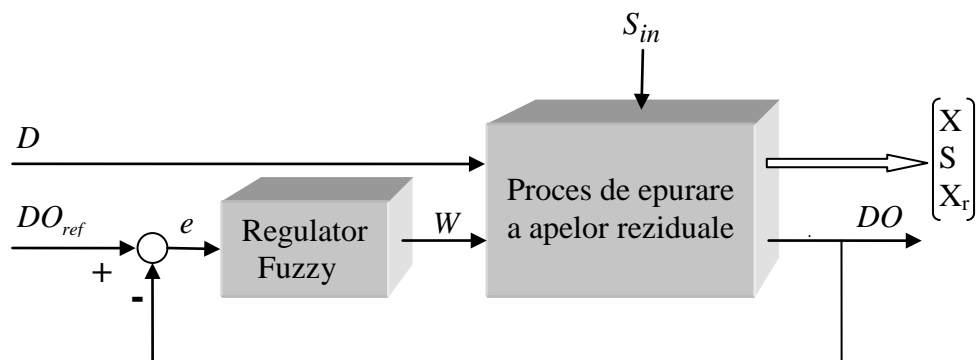


Figura 5.2. Schema de control a concentrației de oxigen dizolvat

Simulările au fost efectuate pentru valori ale ratei de diluție în intervalul $[0.005 \ 0.04]h^{-1}$ și considerând referințele pentru concentrația de oxigen dizolvat între $0.5mg \cdot L^{-1}$ și $5mg \cdot L^{-1}$. Simulările au fost efectuate pentru un substrat organic din influent cu o concentrație scăzută $S_{in} = 0.8g \cdot L^{-1}$ (Figura 5.3a), precum și cu o concentrație ridicată $S_{in} = 4g \cdot L^{-1}$ (Figura 5.3b). Eficiența procesului de epurare (EF) este definită prin relația (5.1).

$$EF = \frac{S_{in} - S}{S_{in}} [\%] \quad (5.1)$$

Conform Figurii 5.3, se observă că variabila cu o influență semnificativă asupra reducerii concentrației de substrat organic este rata de diluție. Datorită consumului ridicat de energie al aerării, s-a analizat influența ratei de aerare asupra reducerii concentrației de substrat organic, concluzionându-se, prin simulările efectuate, că valori mai mari ale ratei de aerare nu sunt recomandate, deoarece creșterea eficienței pentru reducerea substratului organic este mică și consumul de energie, dat de rata de aerare, crește semnificativ. Deci, pentru o funcționare corespunzătoare și eficientă a sistemului, referința concentrației de oxigen dizolvat trebuie să fie între $1mg \cdot L^{-1}$ și $2mg \cdot L^{-1}$, oferind astfel un consum rezonabil de energie (Chiroșcă *et al.* 2012).

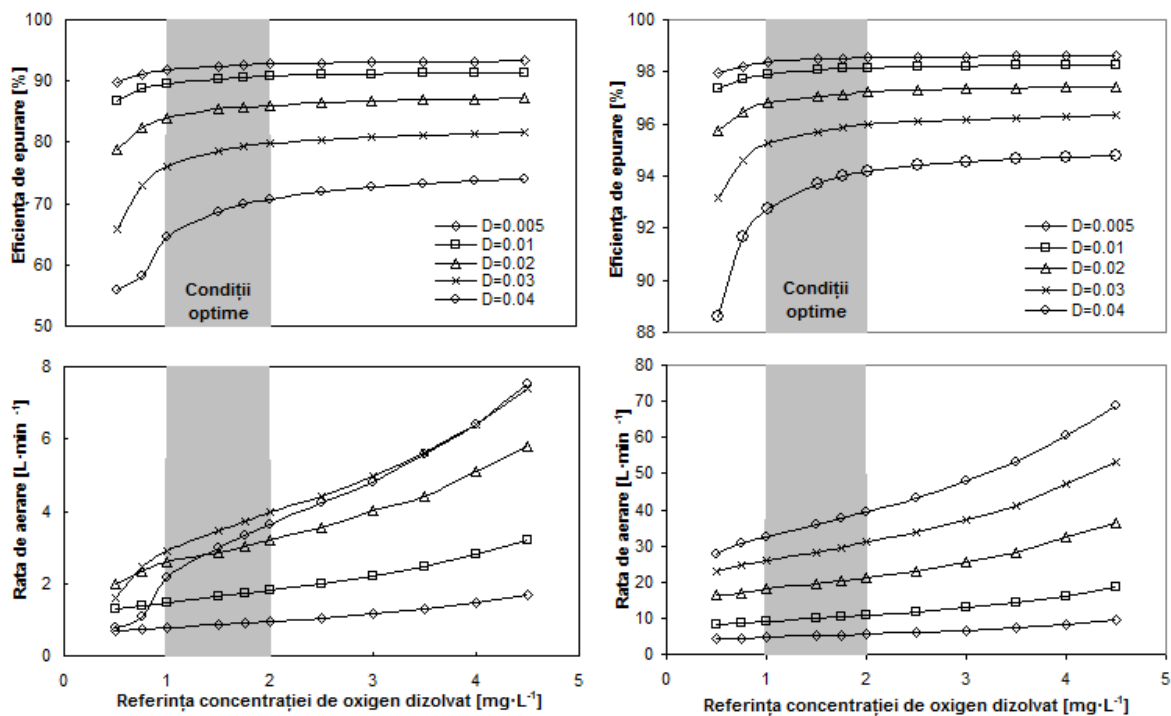


Figura 5.3. Rata de aerare în funcție de referința concentrației de oxigen dizolvat pentru

a) $S_{in} = 0.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, b) $S_{in} = 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

În continuare se va efectua o analiză a robusteții sistemului cu regulator fuzzy în regim decuplat, având ca obiective compensarea unei perturbații S_{in} de tip treaptă, de la $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ la $230 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ și a unei incertitudini a parametrului μ_{max} de tip treaptă de la 0.15 h^{-1} la 0.2 h^{-1} , aplicate la momentul de timp $t = 100 \text{ h}$, considerând schematic sistemele de control pe fiecare din canalele de comandă menționate anterior. Variabilele de ieșire sunt controlate utilizând regulatoare cvasi-PI ce consideră metoda de inferență $MAX - MIN$ și metoda centrului de greutate pentru modulul de defuzzificare. Motivul utilizării metodei centrului de greutate constă în faptul că sunt considerate toate influențele rezultate din regulile active. Schema de control a procesului de epurare biologică a apelor reziduale pentru fiecare canal de comandă se regăsește în Figura 5.4.

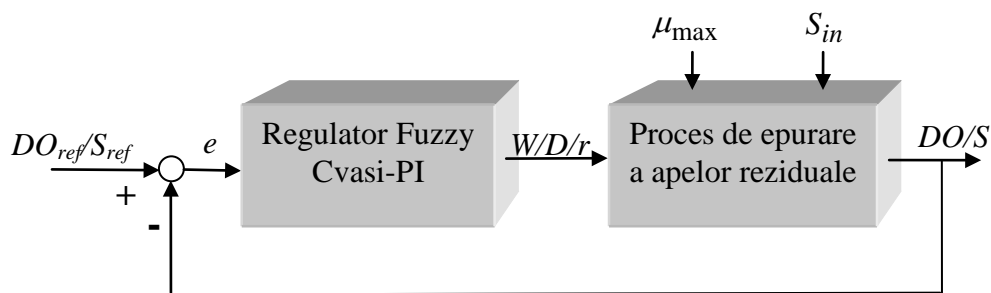


Figura 5.4. Schema de control pentru fiecare canal de comandă

Rezultatele simulărilor în cazurile controlului direct, cât și indirect, confirmă urmărirea referințelor impuse de către variabilele de ieșire, precum și în prezența perturbațiilor și incertitudinilor parametrice, compensând variațiile concentrației substratului organic din influent și ale vitezei maxime specifice de creștere a microorganismelor. Din punct de vedere al regimului dinamic, prin comparația celor două variabile de comandă utilizate succesiv, rata de diluție și rata de recirculare, prima prezintă rezultate superioare (Chiroșcă *et al.* 2011a).

Controlul fuzzy multivariabil al procesului de epurare biologică a apelor reziduale

În principiu, analizele realizate (Barbu 2009, Ifrim 2012), au arătat că procesul de epurare biologică a apelor reziduale, deși afectat puternic de incertitudini, perturbații, neliniaritate etc., poate fi controlat în regim decuplat, datorită existenței celor două subsisteme cu dinamici diferite ca scală de timp. Strategia de control decuplat consideră buclele de control SISO, ale unui proces MIMO, ca fiind independente.

Figura 5.5 reprezintă schematic sistemul de control al procesului de epurare a apelor reziduale, ce poate fi controlat prin variabilele de comandă rata de diluție și rata de aerare, având ca variabile de ieșire concentrația oxigenului dizolvat, respectiv concentrația substratului organic din efluent (Chiroșcă *et al.* 2011b). Variabilele de ieșire sunt controlate utilizând regulatoare fuzzy cvasi-PI.

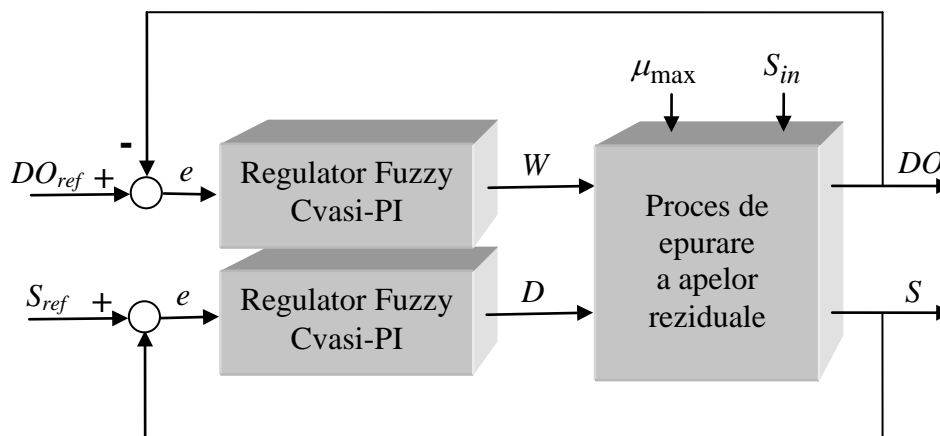


Figura 5.5. Schema de control a procesului de tratare a apelor uzate

Pentru a analiza problema robusteții și comportamentul în prezența perturbațiilor, concentrația de substrat organic din influent S_{in} și viteza maximă specifică de creștere a microorganismelor μ_{max} au fost supuse unor variații de tip treaptă la momentul de timp $t=100ore$, în care referințele au fost considerate ca fiind $DO_{ref} = 2mg \cdot L^{-1}$ și

$S_{ref} = 10mg \cdot L^{-1}$. Rezultatele simulărilor au arătat că sistemul este suficient de robust pentru a rejecta perturbațiile de tip treaptă.

În continuare, considerând sistemul din Figura 5.6, pe baza ecuațiilor (3.6) – (3.10), se propune o metodă de control multivariabil fuzzy a procesului de epurare biologică a apelor reziduale ce constă în menținerea concentrației de oxigen dizolvat la $2mg \cdot L^{-1}$ și a concentrației de substrat organic la $0.1g \cdot L^{-1}$.

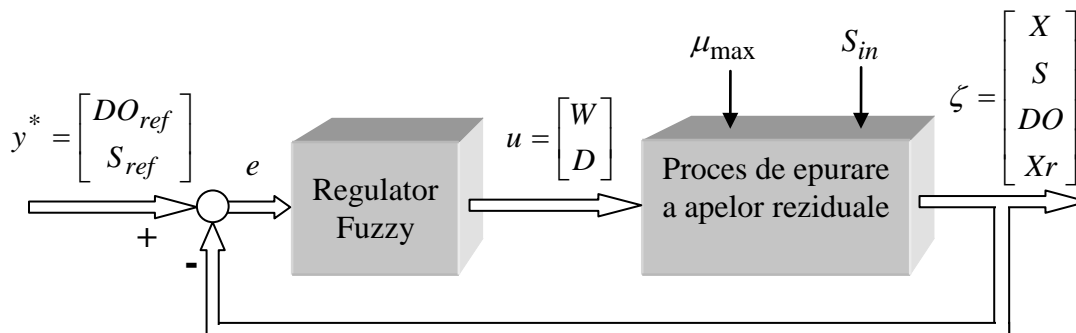


Figura 5.6. Schema de control multivariabil a procesului de epurare biologică

Regulatorul fuzzy din Figura 5.6 este un regulator multivariabil cu două intrări – referințele concentrațiilor de oxigen dizolvat și substrat organic, și două ieșiri – rata de aerare și rata de diluție. Pentru fiecare variabilă de intrare/ieșire au fost definite 7 valori lingvistice, rezultând astfel o bază cu 49 de reguli. Variabilele lingvistice, termenii lingvistici și funcțiile de apartenență ale variabilelor de intrare și ieșire sunt prezentate în Figura 5.7.

Pentru a demonstra proprietățile de robustețe și de compensare a perturbațiilor sistemului de control multivariabil a procesului de epurare biologică a apelor reziduale cu nămol activ, se analizează următoarele patru cazuri, în care variabilele de ieșire S și DO sunt afectate de zgomot de măsură pentru o simulare cât mai realistă. Comportamentul sistemului de control este analizat prin intermediul cazurilor de schimbare a referinței, de rejectie a perturbației, de testare a robusteții sistemului, precum și de simulare a concentrației de substrat organic din influent cu o variație diurnă de formă sinusoidală. Pentru toate cazurile de simulare (Chiroșcă *et al.* 2012), referințele concentrațiilor de substrat organic și de oxigen dizolvat sunt de tip treaptă și sunt menținute constant la $S_{ref} = 0.1mg \cdot L^{-1}$, respectiv $DO_{ref} = 2mg \cdot L^{-1}$. În cazul variației periodice, se simulează concentrația de substrat organic din influent cu o variație diurnă reprezentată printr-o

sinusoidă (Figura 5.8). Pe timpul nopții, influentul are o concentrație minimă de substrat organic $S_{in} = 0.8 g \cdot L^{-1}$, iar pe timpul zilei, influentul are o concentrație maximă de substrat organic $S_{in} = 4 g \cdot L^{-1}$.

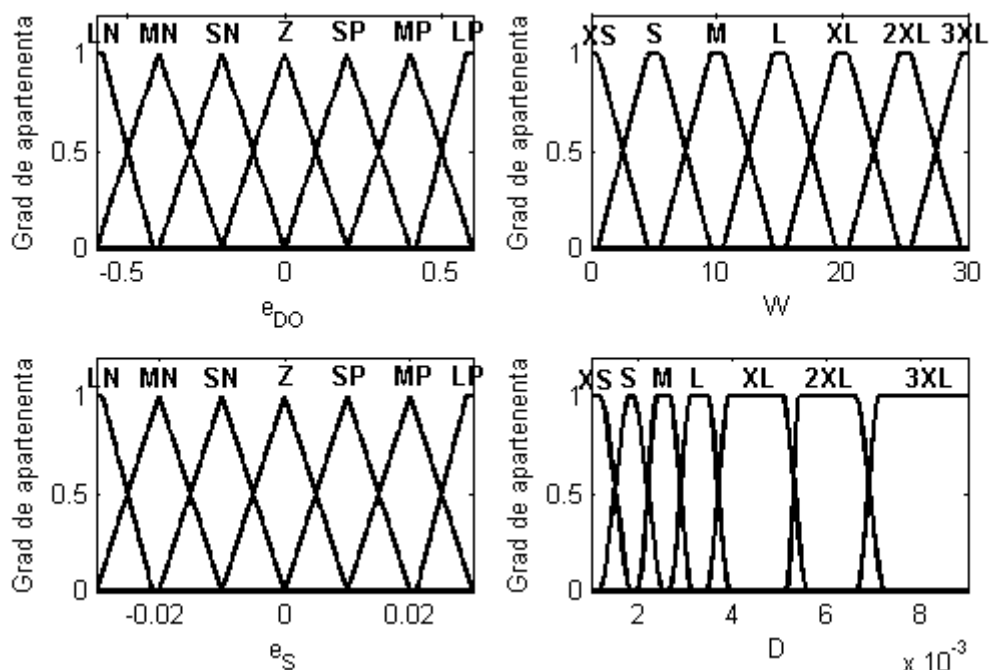


Figura 5.7. Variabilele lingvistice, termenii lingvistici și funcțiile de transfer ale variabilelor de intrare e_{DO} și e_S și ale variabilelor de ieșire W și D

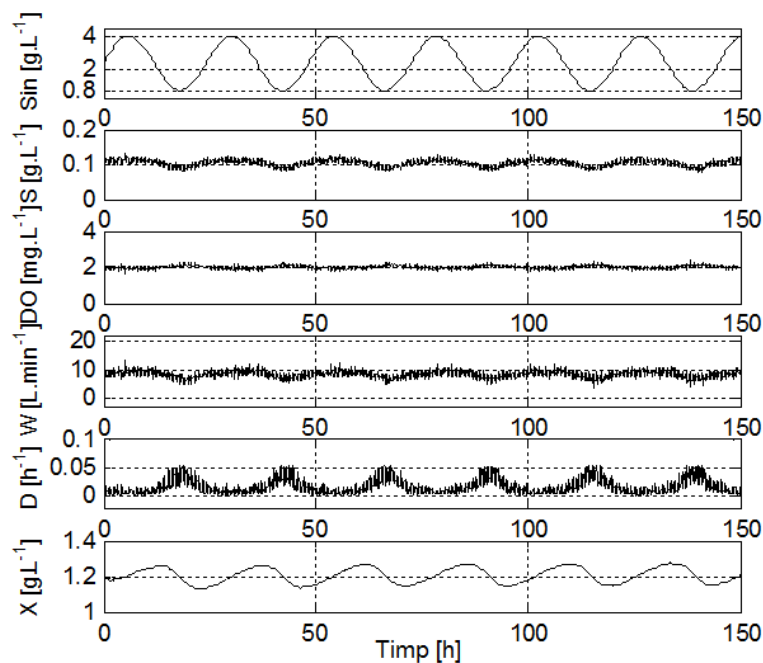


Figura 5.8. Rezultatele simulării pentru *Cazul variației periodice*, unde S_{in} este reprezentat sinusoidal

Pentru acest caz s-a testat robustețea la incertitudinile parametrice ale procesului condus ce au fost considerate ca fiind variații sinusoidale mărginite. Toate rezultatele obținute în urma simulărilor de control a procesului de epurare biologică a apelor reziduale confirmă faptul că tehnica fuzzy asigură un grad satisfăcător de robustețe la incertitudini și de compensare a efectelor perturbațiilor.

Capitol 6

Concluzii generale

În scopul obținerii unei concentrații de substrat organic în efluent sub limita impusă de lege, este urmărită direcția în care concentrația de oxigen dizolvat prezintă o influență indirectă, iar dezvoltarea aerobă a nămolului activat (biomasă) prezintă o influență directă.

Procesul de tratare a apelor reziduale prezintă o dinamică neliniară, complexă, caracterizată de perturbații și incertitudini, un exemplu fiind debitul influentului pluvial sau variația diurnă a apelor reziduale domestice, fiind în același timp și afectată de zgomot de măsură. Conducerea robustă permite abordarea acestui tip de dinamică, prin exercitarea unui comportament de compensare a incertitudinilor, de rejecție a zgomotelor și a perturbațiilor, demonstrând astfel un rol important în definirea și urmărirea cerințelor de stabilizare și de performanță, atât în cazul sistemului nominal precum și al clasei de sisteme asociate ce prezintă caracteristici similare. Astfel, conducerea robustă H_∞ constă în sinteza unui compensator ce îndeplinește aceste funcții printr-o abordare ce vizează cazul cel mai nefavorabil, urmărind o serie de pași ce constă în modelarea matematică și liniarizarea procesului neliniar, definirea specificațiilor de performanță, reprezentarea modelului extins în format biport, sinteza compensatorului H_∞ , analiza robusteții în domeniul frecvență, simularea numerică a controlului H_∞ a procesului neliniar.

Conducerea multivariabilă a procesului biologic de tratare a apelor reziduale prezintă un grad mai ridicat de dificultate, prin comparație cu sistemele SISO, datorită interacțiunilor dintre canale, o altă abordare în proiectare fiind separarea problemei de control în sisteme SISO și conducerea lor decuplată, unde performanța este redată invers proporțional de gradul de interacțiune dintre bucle. În acest sens, canalele de comandă principale sunt rata de diluție – concentrație de substrat organic și rata de aerare – concentrație de oxigen dizolvat. Un număr însemnat de instalații consideră rata de diluție ca

o intrare ce influențează semnificativ procesul. O metodă cantitativă de evidențiere a respectivului grad de interacțiune și de identificare a posibilității decuplării sistemului, la care participă și constantele de timp diferite ale procesului de epurare, este metoda de analiză RGA.

O altă metodă de control a procesului de tratare a apelor reziduale cu nămol activ consideră teoria mulțimilor fuzzy, folosind în atingerea obiectivului propus patru module: modulul de fuzzificare, baza de reguli fuzzy, modulul de inferență și modulul de defuzzificare. Această metodă face parte din lista celor mai recomandate tehnici de conducere a sistemelor complexe, incomplet definite sau ce prezintă incertitudini, fiind bazată pe emularea raționamentului uman, cât și a experienței operatorului. Este guvernată de o serie de practici și recomandări în scopul de a evita conflictele în cadrul modulelor, ce ar putea afecta negativ funcționalitatea regulatorului.

Oxigenul necesar proceselor biologice de tratare a apelor reziduale în reducerea concentrației de substrat organic este furnizat de sistemul de aerare, ce prezintă în plus și un rol în omogenizarea nămolului recirculat cu influentul. Cu toate acestea, valori ridicate ale ratei de aerare afectează considerabil consumul de energie, generând costuri nejustificat de mari, prin comparație cu rezultatele mici obținute, în vederea reducerii substratului organic. Astfel, un consum rezonabil de energie este obținut pentru o referința a concentrației de oxigen dizolvat cuprinsă între $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ și $2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Din considerente raportate regimului dinamic, prin comparația variabilelor de comandă utilizate succesiv, rata de diluție și rata de recirculare, prima prezintă rezultate superioare.

Ansamblul de rezultate și concluzii, ce confirmă faptul că tehnicile aprofundate în teza de doctorat curentă asigură un grad bun de robustețe la incertitudini și de compensare a efectelor perturbațiilor, deține fundamentul simulărilor din cadrul acestei teze, privind conducerea procesului de tratare biologică a apelor reziduale, cât și al referințelor din literatura de specialitate. Rezultatele simulărilor numerice privind studiul caracterului de robustețe al procesului de epurare a apelor reziduale cu nămol activ demonstrează o performanță ridicată de control, în cazul utilizării metodei H_∞ , prin intermediul căreia se realizează compensarea întregului interval al incertitudinilor parametrice, prin comparație cu performanța sistemului controlat cu tehnici fuzzy, în scopul compensării unui interval mai mic al incertitudinilor de formă sinusoidală.

Rezultatele și contribuțiile semnificative prezentate în teză se referă la două metode de control avansat, utilizate în problema de control a procesului de epurare biologică a apelor reziduale și anume: controlul robust H_∞ – metodă de proiectare a compensatoarelor bazate pe modele ce satisfac o serie de constrângeri date de limitele de amplitudine prin intermediul unor funcții de ponderare, cu privire la funcțiile de transfer în circuit închis, și controlul fuzzy – metodă ce furnizează soluții prin emularea raționamentului uman, având la dispoziție informații imprecise. Conform organizării de mai jos, sunt enumerate cele șapte contribuții esențiale, numerotate C1 – C7.

- C1. S-a realizat o analiză sistemică a modelelor procesului de epurare biologică cu nămol activ întâlnite în literatura de specialitate, pornindu-se de la modelul de referință ASM1. Un model care să descrie procesul biologic cu un grad ridicat de precizie, cum este modelul ASM1, poate genera un sistem laborios de ecuații, condiții în care modele de ordin redus pot reprezenta o soluție alternativă. Modelul Nejjari de ordinul 4 prezintă și modelarea decantorului, având în componență doar variabilele de stare fundamentale: biomasa, substratul, oxigenul dizolvat și nămolul recirculat. O variantă modificată a modelului Nejjari este propusă de Ifrim (2012), unde în modelarea decantorului stratificat vertical în n secțiuni de concentrații omogene, s-a considerat doar partea inferioară. De asemenea, se adaugă listei de considerente și modelul bilanțului de material, modelul de ordinul 3 al procesului de epurare biologică a apelor uzate propus în Georgieva și Feyo de Azevedo (1999) în care prezența oxigenului este considerată nelimitată.
- C2. S-a realizat o analiză a incertitudinilor și perturbațiilor ce afectează procesul de epurare biologică a apelor reziduale, considerând în acest sens variații sinusoidale. Principala perturbație a procesului de epurare este dată de încărcarea influentului în instalația de epurare cu substrat organic S_{in} , ce prezintă o variație diurnă, iar o perturbație implicită a sistemului este debitul de intrare F_{in} , ce prezintă o distribuție lunară a cantităților medii de precipitații. Pe baza datelor statistice privind distribuția lunară a cantităților medii de precipitații prelevate de centre meteorologice de pe teritoriul României și furnizate de Anuarul Statistic al României, se poate remarca aportul sezonului cald la cantitatea anuală de precipitații, pe când în sezonul rece cantitatea de precipitații scade. Astfel, regimul pluviometric este caracterizat prin maxime de vară și minime de iarnă. Principalele incertitudini parametrice sunt prezentate sub formă de variații sinusoidale ale parametrilor μ_{max} , K_S , Y și rata de recirculare r .

- C3. S-a realizat sinteza a două compensatoare H_{∞} , câte unul pentru fiecare canal de comandă rata de aerare – concentrația de oxigen dizolvat și rata de diluție – concentrația de substrat organic, canale rezultate în urma analizelor RGA prezente în literatura de specialitate, având ca obiectiv satisfacerea specificațiilor minime de stabilizare a modelului nominal al sistemului, dar și a proximității asociate clasei de sisteme ce prezintă caracteristici similare cu ale sistemului nominal. Sinteza acestor compensatoare s-a realizat prin urmărirea unei secvențe prestabilite de pași: modelarea matematică și liniarizarea procesului neliniar, definirea cerințelor criteriilor de performanță, reprezentarea modelului extins în format biport, analiza robusteții în domeniul frecvență, culminând cu rezultatele obținute prin simulare numerică. Astfel, sunt validate prin simulare performanțele sistemului de control de a asigura o eficiență bună a procesului de epurare.
- C4. S-a realizat și testat prin simulare numerică controlul multivariabil al procesului neliniar de epurare a apelor reziduale prin metoda de control robustă H_{∞} , considerând debitul influentului pluvial pe un interval de un an de zile, segmentat prin condiții normale, de secetă și de ploaie, în conjuncție cu o variație diurnă, urmărindu-se referințele impuse în condiții perturbatoare. S-a realizat validarea sistemului de control prin simularea performanțelor de a asigura o eficiență bună a procesului de epurare prin urmărirea referințelor impuse în condiții de reprezentare a variațiilor sinusoidale pe întregul interval caracteristic fiecărui parametru de model sau semnal și de atenuare a zgomotului de măsură.
- C5. O altă contribuție constă în accentuarea prin analiză a necesității restricționării concentrației de oxigen dizolvat prin intermediul ratei de aerare asupra reducerii concentrației de substrat organic din motive nejustificate de raportul cost-performanță. Această analiză s-a realizat pentru un substrat organic din influent cu o concentrație scăzută $S_{in} = 0.8g \cdot L^{-1}$, precum și cu o concentrație ridicată $S_{in} = 4g \cdot L^{-1}$. Variabila cu o influență semnificativă asupra reducerii concentrației de substrat organic este rata de diluție, observându-se că valori mai mari ale ratei de aerare nu sunt recomandate, deoarece creșterea eficienței pentru reducerea substratului organic este mică și consumul de energie, dat de rata de aerare, crește semnificativ.
- C6. S-a realizat sinteza a trei regulatoare utilizând tehnica fuzzy pentru canalele de comandă rata de aerare – concentrația de oxigen dizolvat, rata de diluție –

concentrația de substrat organic și rata de nămol recirculat – concentrația de substrat organic. Se demonstrează astfel prin simulări numerice, însoțite de reprezentări grafice, atât pentru controlul direct cât și indirect, că tehnica de control fuzzy asigură urmărirea referințelor impuse și compensarea incertitudinilor parametrice și a perturbației considerate. Totuși, comparând din punct de vedere al regimului dinamic rezultatele aferente ratei de diluție și ratei de recirculare, rata de diluție prezintă rezultate superioare.

- C7. S-a realizat sinteza unui regulator pentru controlul multivariabil al procesului neliniar de epurare a apelor reziduale prin tehnica de control fuzzy, validându-se totodată prin simulare numerică performanțele sistemului de control de a asigura o eficiență bună a procesului de epurare prin urmărirea referințele impuse în condiții de reprezentare a variațiilor sinusoidale ale incertitudinilor parametrice și ale perturbațiilor caracteristice, precum și de atenuare a zgomotului de măsură.

Bibliografie

- Alex J., Beteau J.F., Copp J.B., Hellinga C., Jeppsson U., Marsili-Libelli S., Pons M.N., Spanjers H., Vanhooren H., *Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants*, ECC'99 (European Control Conference), Karlsruhe, Germany, Sept. 1999.
- Anuarul Statistic al României, *Cap. 1 Geografie, meteorologie și mediu înconjurător*, Institutul Național de Statistică, de pe <http://www.insse.ro>, 2007.
- Aoi T., Okaniwa Y., Hagiwara K., Motomura K., Iwaihara E., Imai M., Serizawa Y., *A direct ammonium control system using fuzzy inference in a high-load biological denitrification process treating collected human excreta*, *Wat. Sci. Tech.*, 26(5-6): 1325-1334, 1992.
- Ardern E., Lockett W.T., *Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters*, *J. Soc. Chem. Ind.* 33: 523–539, 1914.
- Ayesa E., De la Sota A., Grau P., Sagarna J.M., Salterain A., Suescun J., *Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: the long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation*, *Water Science and Technology*, 53(4-5): 193-201, 2006.

- Barbu M., *Conducerea automata a proceselor biotehnologice*, Galati University Press, Galati, Romania, 2009.
- Barbu M., Caraman S., Ceanga E., *QFT Robust Control of Biotechnological Processes*, IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2004, Cluj-Napoca, Proceedings Tome 1, 129-134, ISSN 973-713-046-4, 2004b.
- Barbu M., Ifrim G., Caraman S., Bahrim G., *QFT Control of Dissolved Oxygen Concentration in a Wastewater Treatment Pilot Plant*, In Proceedings of 11th IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology, Leuven, Belgium 2010.
- Brdys M.A., Zhang Y., *Robust Hierarchical Optimizing Control of Municipal Wastewater Treatment Plants*, Preprints of the 9th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium Large Scale Systems: Theory & Applications – LSS'2001, Bucharest, Romania, 540-547, July 18-20, 2001.
- Brdys M.A., Grochowski M., Gminski T., Konarczak K., Drewa K., *Hierarchical predictive control of integrated wastewater systems*, Control Engineering Practice, 2007.
- Buhr H.O., Andrews J.F., Keinath T.M., *Research needs for automation of wastewater treatment systems*, In: Proceedings of a U.S. Environmental Protection Agency Workshop, Clemson University, South Carolina, September 23-25, 135, 1974.
- Buitron G., Moreno Y., Betancur M., Moreno J., *Application of the event-driven time optimal control strategy for the degradation of inhibitory wastewater in a discontinuous bioreactor*, Proceedings of the 4th IWA World Water Congress, Marrakech, 19-24 September, 2004.
- Busby J.B., Andrews J.F., *Dynamic modeling and control strategies for the activated sludge process*, J. Water Pollut. Control Fed., 47: 1055-1080, 1975.
- Caraman S., Barbu M., Ceanga E., *Robust multimodel control using QFT techniques of a wastewater treatment process*, CEAI, Vol. 7, 2:10-17, ISSN 1454-8658, 2005.
- Caraman S., Barbu M., Dumitrascu G., *Wastewater Treatment Process Identification Based on the Calculus of State Variables Sensibilities with respect to the Process Coefficients*, IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2006, Cluj-Napoca, Proceedings IEEE Tome 2, 199-204, ISBN 1-4244-0360-X, 2006a.

- Caraman S., Sbarciog M., Barbu M., *Predictive Control of a Wastewater Treatment Process*, 1st IFAC Workshop on Applications of Large Scale Industrial Systems (ALSIS'06), Helsinki, August 30 – 31, 2006b.
- Chiroșcă A.**, Dumitrașcu G., Barbu M., Caraman S., *Fuzzy control of a wastewater treatment process*, Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Decision Technologies - KES-IDT2011, Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-22193-4, 155-163, Jul., 2011a.
- Chiroșcă A.**, Dumitrașcu G., Laurențiu L., Caraman S., *Fuzzy control of the activated sludge wastewater treatment process treated as multivariable process*, The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle III Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics, 34(2): 1-5, ISSN 1221-454X, 2011b.
- Chiroșcă A.**, Dumitrașcu G., Ifrim G., Titica M., Caraman S., *An analysis concerning the robust control of the biological wastewater treatment processes using fuzzy techniques*, Proceedings of the 16th International Conference on system theory, control and computing (ICSTCC), vol. 2, ISBN 978-606-8348-48-3, CD, Oct., 2012.
- Devisscher M., Harmand J., Steyer J.-Ph., Vanrolleghem P.A., *Control design of an industrial equalization system - Handling system constraints, actuator faults and varying operating conditions*, In: Proceedings IFAC 4th Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (Safeprocess2000), Budapest, Hungary, June 14-16 2000.
- Dircks K., Beun J.J., Van Loosdrecht M.C.M., Heijnen J.J., Henze M., Glycogen metabolism in aerobic mixed cultures. *Biotechnol. BioEng.*, 73(2): 85– 94, 2001.
- Dochain D., Perrier M., *Adaptive linearizing control of the activated sludge process*, In: Proceedings Workshop Modelling, Monitoring and Control of the Activated Sludge Process, Med. Fac. Landbouww, Rijksuniv. Gent, 57: 2239-2248, 1992.
- Dold P.L., Ekama G.A., Marais V.v.R., *A general model for the activated sludge process*, *Prog. Wat. Tech.*, 12(6): 47-77, 1980.
- Eckenfelder W.W. Jr., *Industrial Water Pollution Control*, McGraw-Hill, New York, 1966.
- Eckenfelder W.W. Jr., O'Conner D.J., *The Aerobic Treatment of Organic Wastes*, Proc. 9th Ind. Waste Conf., Purdue Univ. Lafayette, Ind. Ext. Serv. 87: 39, 1955.
- Fikar C.F., Chachat B., IfatM., *Optimal operation of alternating activated sludge processes*, *Control Engineering Practice*, 13(7): 853-861, 2005.

- Fukano T., *Application of fuzzy control to wastewater pumping station*, In: Implementation, Control and Automation of Water & Wastewater Treatment and Transportation Systems. Ed. Jank B., IAWQ, London, 499-503, 1993.
- Georgieva P.G., Feyo de Azevedo S., *Robust control design of an activated sludge process*, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 9: 949-967, 1999.
- Georgieva P.G., Ignatova M.N., *LFT models of continuous biotechnological process*, J. Bioprocess Engng., 20(2): 179-183, 1999.
- Gendron S., Perrier M., Barrette J., Amjad M., Holko A., Legault N., *Deterministic adaptive control of SISO processes using model weighting adaptation*, Ind. J. Control, 1993.
- Gernaey Krist V., Loosdrecht Mark C.M., Henze Mogens, Lind Morten, Jørgensen Sten B., *Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art*, Environmental Modelling & Software, Elsevier, 19: 763-783, 2004.
- Goodman B.L., Englande A.J., *A Unified Model of the Activated Sludge Process*, Journal of Water Pollution Control Federation, 46: 312-332, 1974.
- Grigorieva E.V., Khailov E.H., *Optimal control of a waste water cleaning plant*, Eighth Mississippi State – UAB Conference on Differential Equations and Computational Simulations, Electronic Journal of Differential Equations, 19: 161-175, 2010.
- Gutman P.O., *QSYN the toolbox for robust control systems design for use with MATLAB 6.0*, 2001.
- Halvarsson B., *Interaction Analysis and Control of Bioreactors for Nitrogen Removal*, Dissertation Thesis, Uppsala University, Sweden, 120, 2007.
- Han Y., Brdys M.A., Piotrowski R., *Nonlinear PI control for dissolved oxygen tracking at wastewater treatment plant*, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- Heinzle E., Dunn I.J., Ryhiner G.B., *Modeling and control for anaerobic wastewater treatment*, Adv. Biochem. Eng. Biotechnol, 48: 79-114, 1993.
- Henze M., Grady C.P.L. Jr., Gujer W., Marais G.V.R., Matsuo T., *Activated Sludge Model No.1*, IAWPRC Scientific and Technical Report No.1, IAWQ, Great Britain, 1987.
- Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M.C., Marais G.V.R., *Activated Sludge Model No.2*, IAWQ Scientific and Technical Report No.3, IAWQ, Great Britain, 1995.

- Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M.C., Marais G.V.R., van Loosdrecht M.C.M., *Activated Sludge Model No.2d*, Water Science and Technology, 39(1): 165-182, 1999.
- Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M., *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing, London, Great Britain, 2000.
- Ifrim G.A., *Control of Two Biological Processes of Environmental Interest (biological wastewater treatment and microalgae production in photobioreactor)*, Ph.D thesis, “Dunărea de Jos” University, Galați, 243, 2012.
- Jeppsson U., *Modelling aspects of wastewater treatment processes*, Ph.D. thesis, Dept. of Industrial Electrical Eng. And Automation, Lund University, Sweden, 1996.
- Kalker T.J.J., van Goor C.P., Roeleveld P.J., Ruland M.F., Bakka R., *Fuzzy control of aeration in an activated sludge wastewater treatment plant: design, simulation and evaluation*, Water Science Technology, 39(4): 71-78, 1999.
- Katebi M.R., Johnson M.A., Wilke J., *Control and Instrumentation for Wastewater Treatment Plant*, Springer-Verlag, Great Britain, 1999.
- Kaya Alpher, *Fuzzy design of wastewater treatment plants*, Dokuz Eylül University, Izmir, 2006.
- Lawrence J.W., McCarty P.L., *Unified basis for biological treatment design and operation*, J. San. Engng. Div. ASCE, 96: 757-777, 1970.
- Marsili-Libelli S., *Deterministic ad fuzzy control of the sedimentation process*, In: Proceedings Workshop Monitoring, Modelling and Control of the Activated Sludge Process, Med. Fac. Landbouww Rijksuniv, Gent, 57: 2229-2238, 1992.
- Marsili-Libelli S., Gigli G., *Fuzzy control of storage and sludge management in an activated sludge process*, In: Proceedings 11th Forum Applied Biotechnology. Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent, 62/4b: 1697-1700, 1997.
- McKinney R.E., *Mathematics of Complete Mixing Activated Sludge*, J. Sanit. Eng. Div., Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 88, SA3, 1962.
- Mueller A., *Entwicklung eines integrierten Fuzzy - Kontrollsystems zum Belastungsausgleich von industriellen Abwasserkläranlagen mit anaerober Vorbehandlung*, Ph.D. Thesis, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Germany, 101, 1997.

- Nejjari F., Dahhou B., Benhammou A., Roux G., *Non-linear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process*, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 13(5): 347-365, 1999.
- Nezam N., *Tehnici inteligente pentru conducerea proceselor de epurare a apelor reziduale*, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica București, 2003.
- Olsson G., Jeppsson U., *Establishing cause-effect relationships in activated sludge plants – What can be controlled?*, Proceeding Workshop Modelling, Monitoring and Control of Wastewater Treatment Plants, Med. Fac. Landbouww., Univ. Gent, 59: 2057-2070, 1994.
- Renard P., Dochain D., Bastin G., Haveau H., Nyns E.-J., *Adaptive control of anaerobic digestion processes – A pilot-scale application*, Biotechnol. Bioeng., 31: 287-294, 1988.
- Roeleveld P.J., van Loosdrecht M.C.M., Experience with guidelines for waster characterization in The Netherlands. Water Sci. Technol., 45(6): 77–87, 2002.
- Sánchez-Peña R.S., Sznaier M., *Robust Systems Theory and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- Spanjers H., Vanrolleghem P.A., Nguyen K., Vanhooren H., Patry G.G., *Towards a simulation benchmark for evaluating respirometry - based control strategies*, Water Science and Technology, 37(12): 219-226, 1998.
- Steyer J.-P., Esteban M., Polit M., *Fuzzy control of an anaerobic digestion process for the treatment of an industrial wastewater*, In: Proceedings 6th International Conference on Fuzzy Systems - FUZZ-IEEE'97, Barcelona, Spain. July 1-5 1997, Vol. III, 1245-1250, 1997.
- Tzoneva R., *Methods for real time optimal control of the activated sludge process*, Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens, Greece, 27-29 July, 2007.
- Yoo C.K., Kim M.H., *Industrial experience of process identification and set-point decision algorithm in a full-scale treatment plant*, Journal of Environmental Management, 90(8): 2823-2830, 2009.

