



UNIUNEA EUROPEANĂ



IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI
Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumatul tezei de doctorat

CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ

Doctorand,

Ing. Larisa CONDRACHI (DIACONU)

Conducător științific,

Prof. Dr. Ing. Marian BARBU

Seria: I8: Ingineria Sistemelor Nr. 9

GALAȚI

2022



Universitatea
Ștefan cel Mare
Suceava



INSTITUTUL DE CERCETĂRI PENTRU ECHIPAMENTE ȘI TEHNOLOGII ÎN CONSTRUCȚII
ICECON S.A.
RESEARCH INSTITUTE FOR CONSTRUCTION EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES



CAMERA DE COMERT, INDUSTRIE,
NAVIGATIE ȘI AGRICULTURĂ CONSTANȚA
Împreună pentru afaceri





UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Instrumente Structurale
2014-2020

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI
Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumatul tezei de doctorat

CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ

Doctorand,

Ing. Larisa CONDRACHI (DIACONU)

Președinte,

Prof. dr. ing. Eugen-Victor-Cristian RUSU,
Membru corespondent al Academiei Române
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Conducător științific,

Prof. dr. ing. Marian BARBU
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Referenți Științifici,

Prof. dr. ing. Dan SELIȘTEANU
Universitatea din Craiova
Prof. dr. ing. Corneliu LAZĂR
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
Prof. dr. ing. Sergiu-Viorel CARAMAN
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Seria: I8: Ingineria Sistemelor Nr. 9

GALAȚI

2022



Universitatea
Ștefan cel Mare
Suceava



IOECUN S.A.
INSTITUTUL DE CERCETĂRI PENTRU ECHIPAMENTE ȘI TEHNOLOGII ÎN CONSTRUCȚII
RESEARCH INSTITUTE FOR CONSTRUCTION EQUIPMENT AND TECHNOLOGY



CAMERA DE COMERT, INDUSTRIE,
NAVIGATIE SI AGRICULTURA CONSTANTA
Împreună pentru succesul tău



Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE ȘI ARTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOLOGICE ȘI BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**

CUPRINS TEZĂ DOCTORAT

INTRODUCERE	IX
LISTĂ FIGURI	XVII
LISTĂ TABELE	XXI
ABREVIERI	XXIII
Capitolul 1: PROCESE DE DIGESTIE ANAEROBĂ	1
1.1 Tipuri de digestie anaerobă.....	1
1.2 Descrierea fenomenelor care au loc într-un digester anaerob.....	2
1.3 Instrumentația existentă în cazul proceselor de digestie anaerobă.....	4
1.4 Stadiul actual în modelarea matematică a proceselor de digestie anaerobă.....	6
1.5 Stadiul actual în conducerea automată a procesului de digestie anaerobă.....	7
Capitolul 2: MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ ...	11
2.1 Modelul matematic ADM1.....	11
2.1.1 Implementarea modelului ADM1 în Simulink.....	14
2.2 Modelul de ordin redus AM2.....	21
2.2.1 Implementarea modelului matematic AM2 în Simulink.....	23
2.3 Compatibilitatea modelelor matematice ADM1 și AM2.....	25
Capitolul 3: CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ UTILIZÂND METODA MODEL FREE CONTROL	29
3.1 Definierea problemei de conducere automată în cazul proceselor de digestie anaerobă.....	29
3.2 Utilizarea metodei Model Free Control în conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă.....	31
3.2.1 Considerații generale privind metoda Model Free Control.....	31
3.2.2 Acordarea controllerului la utilizarea abordării MFC pentru PDA.....	33
3.2.3 Adaptarea parametrilor controllerului la modificarea regimului de sarcină al digesterului anaerob.....	37
3.2.4 Concluzii.....	39
Capitolul 4: CONDUCEREA AUTOMATĂ BAZATĂ PE DATE A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ	41
4.1 Conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Virtual Reference Feedback Tuning.....	41
4.1.1 Algoritm VRFT sintetizat cu date provenind din instalația virtuală.....	41
4.1.2 Sinteza controllerului folosind algoritmul uzual VRFT.....	43
4.1.3 Algoritm VRFT simplificat sintetizat cu date provenind din instalația virtuală....	48
4.1.4 Sinteza controllerului folosind algoritmul VRFT simplificat.....	50

4.1.5	Rezultate privind controlul PDA utilizând abordarea VRFT	55
4.2	Conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Internal Model Control	56
4.2.1	Principiul abordării metodei IMC bazate pe date	57
4.2.2	Alegerea modelului de referință în cadrul metodei IMC.....	59
4.2.3	Proiectarea structurii de control în cadrul metodei IMC.....	65
4.2.4	Verificarea stabilității robuste în cadrul metodei IMC.....	66
4.2.5	Validarea prin simulare a legii de control obținute prin metoda IMC bazate pe date	68
4.3	Conducerea automată proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Fictitious Reference Iterative Tuning.....	73
4.3.1	Principiul variantei uzuale a metodei FRIT	73
4.3.2	Utilizarea metodei FRIT la obținerea unui controller de tip PI în cazul PDA	76
4.3.3	Utilizarea metodei FRIT la obținerea unui controller de tip PID în cazul PDA.....	80
4.3.4	Utilizarea variantei Fictitious Reference Non-Iterative Tuning în cazul PDA.....	83
4.4	Concluzii.....	85
Capitolul 5: IMPLEMENTAREA UNEI PLATFORME BAZATĂ PE PRINCIPUL HILS PENTRU TESTAREA SOLUȚIILOR DE CONTROL.....		87
5.1	Structura și implementarea platformei de testare	87
5.2	Descrierea aplicațiilor software dezvoltate și descrierea procesului de rulare a modelului în timp real	94
5.3	Rezultate experimentale obținute cu platforma de testare.....	101
5.3.1	Estimarea concentrației influentului folosind un estimator neuronal	101
5.3.2	Estimator neuronal pentru concentrația influentului construit cu date colectate în buclă deschisă	102
5.3.3	Estimator neuronal pentru concentrația influentului construit cu date colectate în buclă închisă.....	104
5.3.4	Testarea unei soluții de control aplicate pe platforma de tip HILS	106
5.4	Concluzii.....	108
Capitolul 6: CONCLUZII		109
6.1	Contribuțiile originale	109
6.2	Diseminarea rezultatelor obținute	110
6.3	Direcții viitoare de cercetare.....	111
BIBLIOGRAFIE		112
ANEXE		119

CUPRINS REZUMAT

INTRODUCERE.....	VII
Capitolul 1: PROCESE DE DIGESTIE ANAEROBĂ.....	1
1.1 Tipuri de digestie anaerobă.....	1
1.2 Descrierea fenomenelor care au loc într-un digester anaerob	1
1.3 Instrumentația existentă în cazul proceselor de digestie anaerobă.....	2
1.4 Stadiul actual în modelarea matematică a proceselor de digestie anaerobă	2
1.5 Stadiul actual în conducerea automată a procesului de digestie anaerobă.....	3
Capitolul 2: MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ	4
2.1 Modelul matematic ADM1	4
2.1.1 Implementarea modelului ADM1 în Simulink.....	5
2.2 Modelul de ordin redus AM2.....	5
2.2.1 Implementarea modelului matematic AM2 în Simulink	6
2.3 Compatibilitatea modelelor matematice ADM1 și AM2	6
Capitolul 3: CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ UTILIZÂND METODA MODEL FREE CONTROL	7
3.1 Definirea problemei de conducere automată în cazul proceselor de digestie anaerobă	7
3.2 Utilizarea metodei Model Free Control în conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă.....	8
3.2.1 Considerații generale privind metoda Model Free Control	8
3.2.2 Acordarea controllerului la utilizarea abordării MFC pentru PDA	10
3.2.3 Adaptarea parametrilor controllerului la modificarea regimului de sarcină al digesterului anaerob.....	12
3.2.4 Concluzii	13
Capitolul 4: CONDUCEREA AUTOMATĂ BAZATĂ PE DATE A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ.....	14
4.1 Conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Virtual Reference Feedback Tuning	14
4.1.1 Algoritmul VRFT sintetizat cu date provenind din instalația virtuală	14
4.1.2 Sinteza controllerului folosind algoritmul uzual VRFT	15
4.1.3 Algoritmul VRFT simplificat sintetizat cu date provenind din instalația virtuală	17
4.1.4 Sinteza controllerului folosind algoritmul VRFT simplificat	18
4.1.5 Rezultate privind controlul PDA utilizând abordarea VRFT.....	19
4.2 Conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Internal Model Control.....	20

4.2.1	Principiul abordării metodei IMC bazate pe date	20
4.2.2	Alegerea modelului de referință în cadrul metodei IMC.....	21
4.2.3	Proiectarea structurii de control în cadrul metodei IMC.....	23
4.2.4	Verificarea stabilității robuste în cadrul metodei IMC.....	24
4.2.5	Validarea prin simulare a legii de control obținute prin metoda IMC bazate pe date	25
4.3	Conducerea automată proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Fictitious Reference Iterative Tuning.....	26
4.3.1	Principiul variantei uzuale a metodei FRIT	26
4.3.2	Utilizarea metodei FRIT la obținerea unui controller de tip PI în cazul PDA	27
4.3.3	Utilizarea metodei FRIT la obținerea unui controller de tip PID în cazul PDA.....	28
4.3.4	Utilizarea variantei Fictitious Reference Non-Iterative Tuning în cazul PDA.....	29
4.4	Concluzii	30
Capitolul 5: IMPLEMENTAREA UNEI PLATFORME BAZATĂ PE PRINCIPUL HILS PENTRU TESTAREA SOLUȚIILOR DE CONTROL.....		31
5.1	Structura și implementarea platformei de testare	31
5.2	Descrierea aplicațiilor software dezvoltate și descrierea procesului de rulare a modelului în timp real.....	32
5.3	Rezultate experimentale obținute cu platforma de testare.....	34
5.3.1	Estimarea concentrației influentului folosind un estimator neuronal	35
5.3.2	Estimator neuronal pentru concentrația influentului construit cu date colectate în buclă deschisă.....	36
5.3.3	Estimator neuronal pentru concentrația influentului construit cu date colectate în buclă închisă.....	36
5.3.4	Testarea unei soluții de control aplicate pe platforma de tip HILS	37
5.4	Concluzii	38
Capitolul 6: CONCLUZII		39
6.1	Contribuțiile originale	39
6.2	Diseminarea rezultatelor obținute	40
6.3	Direcții viitoare de cercetare.....	40
BIBLIOGRAFIE.....		41

INTRODUCERE

Dezvoltarea continuă și susținută a societății contribuie în mod activ la afectarea mediului înconjurător. În cazul apelor, acest lucru se face printr-un dublu mecanism: prin generarea unui consum excesiv de apă și prin deversările de apă poluantă. Fără luarea unor măsuri care să limiteze efectul activităților umane asupra calității apei, societatea nu își poate continua dezvoltarea curentă.

Consumul excesiv de apă constituie o problemă îngrijorătoare deoarece conduce la cantități imense de apă poluată. Această apă poartă denumirea de apă uzată și este nevoie să o colectăm și să o supunem unor procese de tratare, înainte ca ea să fie reintrodusă în circuitul natural prin deversarea în râuri, lacuri, mări etc. În ultimii ani s-au făcut pași importanți în acest sens, soluția adoptată fiind dezvoltarea de sisteme de colectare și tratare a apelor uzate. Evident, aceste soluții trebuie să țină cont de natura poluanților care afectează apa, de tipul comunității pentru care se dezvoltă aceste soluții, dar și de costul implicat de implementarea și operarea sistemelor de tratare a apelor uzate.

Există multiple tehnologii de tratare a apelor uzate, dar ele pot fi grupate în două mari categorii: aerobe și anaerobe. Conform literaturii de specialitate, în cazul comunităților urbane mari și medii se preferă tehnologiile de tratare aerobă cu nămol activ [1]. Această tehnologie presupune consumul poluanților organici din apa uzată, în prezența oxigenului, de către populații de microorganisme numite nămol activ. Deși este o soluție eficientă, aceasta prezintă trei mari dezavantaje: un consum de energie electrică mare din cauza aerării, o eficiență scăzută în cazul concentrațiilor mari ale influentului și o cantitate mare de nămol activ excedentar, rezultată de la unitățile de tratare aerobă.

În cazul în care influentul are o concentrație mare, situație existentă în cazul apelor uzate industriale sau al apelor uzate provenite din comunități izolate, o soluție eficientă este utilizarea tehnologiilor anaerobe. Această tehnologie presupune descompunerea poluanților organici din apa uzată în absența oxigenului. Tratarea anaerobă a apelor uzate prezintă avantajul faptului că nu necesită suprafețe mari pentru construcție. Dar, cel mai important aspect este că această tehnologie are o eficiență crescută din punct de vedere al tratării apelor uzate cu încărcare mare și din punct de vedere energetic. Eficiența energetică crescută este determinată de faptul că în cadrul acestei tehnologii se produce biogaz, care este o sursă de energie regenerabilă.

Ținând cont de restricțiile de mediu adoptate la nivel mondial, și în mod special la nivelul Uniunii Europene, este nevoie ca tehnologiile de tratare a apelor uzate să devină mai performante, atât din perspectiva eficienței tratării apelor uzate, cât și din perspectiva consumului energetic implicat. Utilizarea tehnicilor de conducere automată reprezintă o metodă sigură pentru creșterea eficienței tehnologiilor de tratare a apelor uzate în raport cu cele două aspectele menționate anterior. Importanța acestui aspect este dovedită și de numărul foarte mare de lucrări cu această tematică din fluxul principal de publicații apărute în ultimii 10 ani.

OBIECTIVUL ȘI STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat intitulată „CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ” își propune analiza și aplicarea unor tehnici moderne de conducere automată în cazul proceselor de digestie anaerobă cu testarea lor într-un mediu cât mai apropiat de realitatea industrială. Pentru aceasta s-a considerat un model

matematic complex în proiectarea și validarea structurilor de control automat, model matematic care în literatura de specialitate este considerat drept standard în ceea ce privește descrierea procesului de digestie anaerobă. De asemenea, a fost proiectată și realizată o platformă de testare utilizând principiul Hardware In The Loop Simulation, platformă care permite testarea unor structuri de control și transmiterea datelor către o componentă de cloud - computing, pentru procesări la nivel superior.

Capitolul 1 conține o prezentare a procesului abordat și a stadiului actual privind cercetările în domeniu. Astfel, sunt prezentate principalele tipuri de digestoare anaerobe existente, descrierea fenomenelor care au loc într-un digester anaerob, precum și instrumentația existentă. În finalul capitolului se prezintă stadiul actual în domeniul modelării matematice și controlului proceselor de digestie anaerobă.

În **Capitolul 2**, intitulat *Modelarea matematică a proceselor de digestie anaerobă*, sunt prezentate principalele modele matematice existente în literatura de specialitate pentru procesul de digestie anaerobă. Astfel, sunt prezentate: modelul complex Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1), considerat ca standard din punct de vedere al profunzimii descrierii fenomenelor care au loc în cadrul unui digester anaerob, și modelul simplificat AM2, care realizează o descriere la nivel global a producerii de biomasă, consumului de substrat organic și producției de biogaz în cazul digestiei anaerobe. În finalul capitolului este prezentată compatibilitatea modelelor descrise ADM1, respectiv AM2.

Capitolul 3, *Conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Model Free Control*, propune utilizarea modelului matematic complex ADM1 ca *instalație virtuală* și investighează posibilitatea utilizării metodei Model Free Control în cazul proceselor de digestie anaerobă. Astfel, în cadrul capitolului se pornește de la studiul proprietăților statice și dinamice ale procesului de digestie anaerobă și formularea problemei de control. Având în vedere complexitatea modelului utilizat drept *instalație virtuală*, o metodă adecvată ar fi cea Model Free Control. Astfel, se prezintă mai întâi abordarea generală, propusă de către grupul condus de profesorul Fliess, abordare care conduce la obținerea unui controller numit inteligent de tip iP, iPI etc., fiind analizate și metodele principale de acordare a acestor controllere. Pornind de la observația că în aplicațiile reale regimul de sarcină (concentrația influentului) al digesterului anaerob este variabil în timp, este propusă o metodă de acordare a parametrilor controllerului pentru a asigura stabilitatea sistemului într-o gamă largă de regimuri de funcționare, metoda propusă fiind validată prin simulare numerică

Capitolul 4, intitulat *Conducerea automată bazată pe date al proceselor de digestie anaerobă*, investighează aplicabilitatea a trei metode de tip data-driven, fiind propuse adaptări ale acestor metode în raport cu particularitățile procesului studiat, iar validarea s-a făcut prin simulare numerică considerând din nou modelul matematic complex ADM1 ca *instalație virtuală*. O primă metodă considerată este Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT), în acest caz fiind utilizate două soluții pentru determinarea parametrilor controllerului: algoritmul aferent metodei uzuale VRFT și un algoritm simplificat. Proiectarea controllerului în cazul ambelor soluții este analizată în contextul proceselor de digestie anaerobă. A doua metodă considerată este Internal Model Control. Un aspect important al acestei abordări îl constituie alegerea modelului de referință. Acesta trebuie ales având în vedere următoarele aspecte: informații esențiale despre dinamica dorită pentru procesul în buclă închisă, nivelul erorilor dinamice care rezultă într-o buclă închisă pentru modelul de referință adoptat și amplitudinea maximă a perturbației care ar determina o deteriorare majoră a calității controlului. Toate aspectele abordate sunt particularizate pentru cazul proceselor de digestie anaerobă. În cazul acestei metode, având în vedere incertitudinile care afectează acest tip de procese, este considerată și problematica verificării stabilității robuste. Astfel, analiza prin simulare numerică a performanțelor legii de

control sintetizate a urmărit trei aspecte: urmărirea referinței, rejecția perturbației și efectul zgomotului de măsurare asupra mărimii reglate. Ultima metodă studiată a fost Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT). În acest caz, a fost analizată utilizarea metodei FRIT pentru obținerea în cazul proceselor de digestie anaerobă a unor controllere de tip PI și PID, fiind considerat atât acordarea iterativă, cât și non-iterativă a parametrilor controllerului. În finalul capitolului sunt prezentate principalele concluzii privind utilizarea metodelor de control de tip data-driven în cazul proceselor de digestie anaerobă.

Capitolul 5 prezintă proiectarea și implementarea unei platforme bazată pe principiul Hardware In The Loop Simulation (HILS) pentru testarea și validarea soluțiilor de control. Particularitatea acestei platforme o reprezintă capacitatea de a rula în timp real și faptul că se poate utiliza pentru orice tip de proces. De asemenea, aceasta mai cuprinde și o componentă de cloud computing care oferă posibilitatea de stocare și prelucrare a semnalelor de interes achiziționate, permițând astfel prelucrări ale datelor din proces la un nivel ierarhic superior.

Capitolul 6 al tezei expune concluziile extrase în urma cercetărilor întreprinse, contribuțiile originale ale temei de cercetare doctorală, dar și lucrările științifice în care au fost diseminate contribuțiile științifice ale lucrării.

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijinul financiar al proiectului „Excelența academică și valori antreprenoriale - sistem de burse pentru asigurarea oportunităților de formare și dezvoltare a competențelor antreprenoriale ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – ANTREPRENORDOC”, Contract nr. 36355/23.05.2019 POCU/380/6/13 - Cod SMIS: 123847

Capitolul 1: PROCESE DE DIGESTIE ANAEROBĂ

Odată cu dezvoltarea durabilă a societății a crescut și nivelul de poluare al apelor. În prezent activitățile industriale, activitățile casnice și cele agricole contribuie la producerea unui volum mare de apă uzată, dar au ca rezultat și un consum ridicat de energie.

În aceste condiții, pentru reducerea volumului de apă uzată, o soluție adoptată a fost tratarea apelor uzate utilizând procesul de digestie anaerobă. Avantajele majore ale acestui proces sunt reprezentate de posibilitatea tratării unui influent cu concentrație mare de poluanți organici și de producerea de biogaz. Biogazul este o resursă de energie regenerabilă, care poate fi exploatat pentru a reduce consumul de energie.

Procesul de digestie anaerobă reprezintă unul dintre cele mai îndelungate procese utilizate pentru tratarea apelor uzate și stabilizarea nămolului [2]. Cercetările asupra aplicabilității procesului de digestie anaerobă au vizat domeniul pornind de la nămolul de canalizare municipal până la fracțiunea organică lichidă, în special industrială, apoi municipală din deșeuri solide și reziduuri agricole [3].

Digestia anaerobă este un proces biochimic, prin care microorganismele descompun materie organică în absența oxigenului, în urma căruia rezultă dioxid de carbon (CO_2) și metan (CH_4) [4].

Un factor cheie în ceea ce privește obținerea unei producții valoroase de metan îl constituie influentul. Compoziția acestuia necesită o atenție deosebită deoarece condițiile de biodegradabilitate diferă în funcție de proveniență. Cele mai comune tipuri de materie organică utilizate pentru obținerea de biogaz sunt [5]: Gunoiul de grajd și nămol; Reziduuri agricole și subproduse; Deșeuri organice din industria alimentară și agroalimentară (de origine vegetală și animală); Frațiuni organice ale deșeurilor municipale și din alimentație; Ape uzate și nămol de canalizare; Culturi energetice dedicate.

1.1 Tipuri de digestie anaerobă

În ceea ce privește activitatea considerată, sistemele de tratare a apelor uzate care includ procesul de digestie anaerobă, sunt de două tipuri:

- ✚ Digestoare independente de uz casnic sau industrial;
- ✚ Digestoare care sunt incluse în stațiile de tratare a apelor uzate orășenești.

1.2 Descrierea fenomenelor care au loc într-un digester anaerob

O cunoaștere a acestor fenomene este utilă atât în proiectarea și funcționarea digesterelor anaerobe, cât și în înțelegerea apariției perturbațiilor și atenuarea acestora. Conceptual, procesul de digestie anaerobă include mai multe etape, care descriu principalele procese biochimice și fizico-chimice care au loc într-un digester anaerob. Etapele procesului de digestie anaerobă sunt [6]: dezintegrarea, hidroliza, acidogeneza, acetogeneza și metanogeneza.

Dezintegrarea reprezintă o primă etapă a procesului de digestie anaerobă. În această etapă particulele compozite complexe sunt dezintegrate în carbohidrați, proteine, lipide și inerte solubile.

Hidroliza reprezintă cea de-a doua etapă și are rolul de a hidroliza carbohidrații, proteinele, lipidele și inertele solubile prin intermediul bacteriilor hidrolitice. În urma acestei etape, carbohidrații sunt transformați în monozaharide, lipidele în lanțuri de acizi grași (LCFA) și proteinele în aminoacizi.

Acidogeneza reprezintă etapa prin care bacteriile acidogene convertesc monozaharidele, aminoacizi și acizii grași în: hidrogen dizolvat, dioxid de carbon și acizi grași volatili (VFA), constând în principal în acizi propionici, butirici, valerici și acetici.

Acetogeneza reprezintă etapa în care bacteriile acetogene acționează asupra acizilor grași volatili și lanțurilor de acizi grași pentru a produce acetat și hidrogen.

Metanogeneza marchează etapa finală a procesului de digestie anaerobă. În această etapă bacteriile acetoclastice și hidrogenofile transformă acidul acetic și hidrogenul în metan.

1.3 Instrumentația existentă în cazul proceselor de digestie anaerobă

În ceea ce privește monitorizarea și controlul proceselor de digestie anaerobă, un aspect esențial îl reprezintă existența instrumentației, evident cu un accent pe existența instrumentației on-line [7], [8]. Prin urmare, un număr mare de variabile sunt de interes când se monitorizează procesul de digestie anaerobă și, implicit, există mai multe tipuri de instrumentație capabile să genereze informații relevante. O clasificare a tipurilor de instrumentație disponibile în literatura de specialitate este:

- **Instrumentația on-line** este capabilă să achiziționeze și trimită date, în timp real către un computer sau un alt sistem de achiziție;
- **Instrumentația off-line** este capabilă să măsoare și să stocheze date;
- **Instrumentația in-line** implică senzori sau instrumente care sunt plasate direct într-un flux de proces care oferă în mod natural date on-line.

1.4 Stadiul actual în modelarea matematică a proceselor de digestie anaerobă

Cunoașterea procesului de digestie anaerobă reprezintă un pas important pentru monitorizarea și controlul performanței fermentației anaerobe. În consecință, modelele matematice pot constitui un instrument util pentru aprofundarea și înțelegerea sistemelor complexe, pentru a facilita proiectarea și funcționarea unui proces. În anul 1983 a fost prezentat un model capabil să realizeze o descriere cât mai complexă a fenomenelor fizice, chimice și biologice care au loc în procesul de digestie anaerobă. Modelul matematic poartă denumirea Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1) [9] și, fără îndoială, este considerat cel mai evoluat model chiar și la acest moment. Cu toate acestea, complexitatea acestui model, cu 35 de variabile de stare, face dificilă utilizarea acestuia în probleme de control.

În consecință, a existat un efort continuu pentru a obține modele simplificate care permit aplicarea metodelor pentru a obține soluții software pentru estimarea variabilelor de stare și a parametrilor de interes sau pentru implementarea soluțiilor de control. Astfel, poate fi menționat

modelul matematic propus în [10], în care este propus un model cu 6 variabile de stare. O descriere detaliată a celor mai importante modele matematice ce descriu procesul de digestie anaerobă este realizată în Capitolul 2.

1.5 Stadiul actual în conducerea automată a procesului de digestie anaerobă

Există o varietate de structuri de control care au fost raportate în literatura de specialitate, cu scopul de a aduce îmbunătățiri substanțiale procesului de digestie anaerobă. Implementarea unei prime aplicații a controlului clasic asupra procesului de digestie anaerobă a fost realizată în anul 1974 [11]. Autorii au aplicat un control de tip on/off asupra unui tip de reactor de tip reactor cu flux continuu de agitare. Datorită factorilor limitativi pe care îi prezintă controlul clasic, atenția cercetătorilor s-a îndreptat asupra dezvoltării unor noi tipuri de control avansat, pentru a îmbunătăți precizia controlului procesului de digestie anaerobă.

Prin urmare o primă categorie de control avansat este reprezentată de sisteme expert bazate pe reguli și sisteme expert fuzzy. De exemplu, în lucrarea [12] a fost testat un sistem expert de supraveghere în timp real. Un alt tip de control, elaborat în [13], prevede aplicarea cu succes a unui control bazat pe tehnici de logică fuzzy și tehnici de cunoaștere implementată pe reguli asupra unui reactor hibrid UASB+AF.

În schimb, controlul liniarizării se concentrează pe modelele matematice existente [3]. Un exemplu de control al liniarizării cu adăugarea unei substanțe simulate (acetat) aplicat asupra procesului de digestie anaerobă fost aplicat în [14]. Rezultate satisfăcătoare, au fost raportate și în [15], pentru controlul un reactor AFB utilizând tehnica de control al liniarizării exacte. Pentru a fi aproape de situațiile practice, o nouă structură robustă de control adaptiv folosind o lege de control liniarizantă combinată cu un observer pe intervale capabil să estimeze o limită inferioară și superioară a stărilor nemăsurabile și cu un estimator de parametri pentru cinetica necunoscută a procesului, a fost propusă în [16]. Alte lucrări care utilizează controlul liniarizant în cazul proceselor de digestie anaerobă sunt ilustrate în: [17], [18].

În literatura științifică au mai fost identificate și alte tipuri de control aplicate procesului de digestie anaerobă. Prin urmare, pentru a trata problemele de optimizare și de dinamică în [7], [19], s-a investigat un algoritm pentru controlul extremum seeking a digestoarelor anaerobe. Alte abordări din literatura de specialitate sunt bazate pe controlul multivariabil adaptiv [20], controlul predictiv [21] sau controlul robust [22], [23].

Analiza stadiului actual privind conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă a arătat că în literatura de specialitate s-au dezvoltat două tipuri de aplicații: structuri clasice sau bazate pe inteligența artificială, care au fost validate pe procesul fizic sau prin simulare numerică pe un model matematic complex de tip ADM1, și structuri de control avansat, care au fost validate pe modele matematice simplificate. Totuși, având în vedere „distanța” existentă între modelele matematice simple și modelul matematic complex ADM1, se justifică demersul asumat prin această teză de doctorat de a găsi metode avansate de control care să poată fi utilizate pentru problema de conducere automată a procesului de digestie anaerobă.

Capitolul 2: MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ

În cadrul acestui capitol sunt prezentate principalele modele matematice existente în literatura de specialitate pentru procesul de digestie anaerobă.

Așa cum a fost menționat în prezentarea stadiului actual în domeniu, în literatura de specialitate au fost dezvoltate două tipuri de modele matematice: un model complex, dedicat în special problematicii cunoașterii și analizei procesului, și un model simplificat, utilizat în proiectarea unor structuri de control avansate. În continuare, se prezintă o descriere a modelului matematic complex ADM1 și a modelului matematic de ordin redus AM2.

2.1 Modelul matematic ADM1

Modelul matematic ADM1 propus de International Water Association [6] este considerat cel mai detaliat model, care oferă o imagine de ansamblu a proceselor care au loc într-un digester anaerob. Inițial, modelul original ADM1 [9] conținea 24 de ecuații de stare, însă, ulterior, acesta a suferit modificări aduse de autorii Blumensaat și Keller, pentru a îl face mai robust. În urma modificărilor, modelul conține 35 de ecuații de stare care descriu dinamica procesului, 19 rate de proces biochimic, 6 procese cinetice acid-bazice și 3 transferuri de gaz-lichid [24].

Cele 19 rate de proces biochimic au loc în mediul lichid. Acestea sunt: dezintegrarea; hidroliza carbohidraților; hidroliza proteinelor; hidroliza lipidelor; absorbția de monozaharide; absorbția de aminoacizi; absorbția de acizi grași cu catenă lungă; absorbția de valerianat; absorbția de butirat; absorbția de propionat; absorbția de acetat; absorbția de hidrogen; descompunerea de X_{su} ; descompunerea de X_{aa} ; descompunerea de X_{fa} ; descompunerea de X_{c_4} ; descompunerea de X_{pro} ; descompunerea de X_{ac} ; descompunerea de X_{h_2} [25].

În cadrul ADM1, etapa de acidogeneză este descrisă de vitezele de desfășurare a reacțiilor. Acestea sunt de trei tipuri [25]: proporțional, cum ar fi în cazul hidrolizei proteinelor sau lipidelor; parametrizări de tip Monod; parametrizări de tip dublu Monod. Reacțiile care au loc în mediul lichid din interiorul digesterului anaerob sunt descrise prin intermediul a 24 de ecuații de stare, din care 12 ecuații descriu componentele de substrat și restul descriu componentele de biomasă:

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} \cdot (S_{i,in} - S_i) + \sum_{j=1}^{19} v_{i,j} \cdot \rho_j; \quad i = \overline{1,12}; \quad (2.1)$$

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{Q_{ad}}{V_{ad,liq}} \cdot (X_{i,in} - X_i) + \sum_{j=1}^{19} v_{i,j} \cdot \rho_j; \quad i = \overline{13,24}; \quad (2.2)$$

unde: $\sum_{j=1}^{19} v_{i,j} \cdot \rho_j$ reprezintă suma ratelor cinetice, $i = 1 \dots 12$ reprezintă indexul componentelor de substrat, $i = 13 \dots 24$ reprezintă indexul componentelor de biomasă, $j = 1 \dots 19$ reprezintă cele 19 reacții biochimice considerate, v sunt considerați coeficienți de stoichiometrie, care dau

ponderea cu care o reacție apare în cazul unui termen, Q_{ad} este debitul de influent în digestor, $V_{ad,liq}$ este volumul de lichid din digestor, $S_{i,in}$ este concentrația componentei S_i în influent [25].

Determinarea debitului se gaz se realizează cu ajutorul relației de mai jos:

$$Q_{gas} = k_p \cdot (P_{gas} - P_{atm}) \quad (2.3)$$

unde k_p este coeficientul fluxului de ieșire, P_{atm} este presiunea atmosferică, iar P_{gas} este presiunea gazului.

Presiunea gazului este dată de formula:

$$P_{gas} = S_{gas,h2} \cdot \frac{R \cdot T_{ad}}{16} + S_{gas,ch4} \cdot \frac{R \cdot T_{ad}}{64} + S_{gas,co2} \cdot R \cdot T_{ad} + p_{gas,h2} \quad (2.4)$$

unde R este constanta universală a gazului ideal, T_{ad} este temperatura în digestorul anaerob (considerată constantă egală cu 35°C) și $p_{gas,h2}$ este presiunea vaporilor de apă [25].

2.1.1 Implementarea modelului ADM1 în Simulink

Implementarea și simularea modelului matematic ADM1 s-a realizat în mediul MATLAB, toolbox-ul Simulink. Pentru implementarea și punerea în aplicare a modelului ADM1 au fost analizate patru tipuri de influent: nămol activ, vinasă brută, zer de lapte și apă menajeră.

2.2 Modelul de ordin redus AM2

Modelul AM2 a fost elaborat în cadrul unui proiect al Comunității Economice Europene [10]. Acest model a avut două obiective: simularea numerică a dinamicii procesului de digestie anaerobă și proiectarea unui sistem util în probleme de monitorizare și control. În consecință, modelul implică două etape: în prima etapă a acidogenezei bacteria acidogenă X_1 degradează substratul organic S_1 și produce acizi grași volatili S_2 și CO_2 . Acizii grași formează substratul S_2 , care la rândul lui hrănește populația bacteriană X_2 . Populația bacteriilor metanogene X_2 utilizează, în etapa a doua, cea de metanizare, acizii grași volatili ca substrat pentru creșterea și producerea de CO_2 și metan [26].

În final, modelul este definit prin 4 ecuații diferențiale: două pentru balanțele masice ale populațiilor bacteriene X_1 , respectiv X_2 și două pentru substratul organic S_1 și VFA (S_2) [26].

$$\frac{dX_1}{dt} = [\mu_1(S_1) - \alpha D]X_1 \quad (2.5)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = [\mu_2(S_2) - \alpha D]X_2 \quad (2.6)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{1in} - S_1) - k_1\mu_1(S_1)X_1 \quad (2.7)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = D(S_{2in} - S_2) + k_2\mu_1(S_1)X_1 - k_3\mu_2(S_2)X_2 \quad (2.8)$$

unde S_{1in} ($gCOD/L$) și S_{2in} ($mmol/L$) sunt concentrațiile de influent ale lui S_1 respectiv S_2 și D este rata de diluție.

Mai mult decât atât, avem următoarea ecuație algebrică pentru debitul de gaz metan.

$$q_{CH_4} = k_6 \mu_2 (S_2) X_2 \quad (2.9)$$

2.2.1 Implementarea modelului matematic AM2 în Simulink

Pentru modelarea și simularea modelului matematic AM2 s-a utilizat mediul MATLAB, toolbox-ul Simulink.

2.3 Compatibilitatea modelelor matematice ADM1 și AM2

Pentru o mai bună înțelegere a compatibilității celor două modele matematice s-a recurs la o asociere a variabilelor de stare ale modelului ADM1 cu variabilele de stare ale modelului AM2.

Populațiile bacteriene (X_{su} , X_{aa} , X_{fa} , X_{ac} , X_{h2} , X_{c4} , X_{pro}) corespunzătoare modelului ADM1, sunt asociate în modelul AM2 în două populații: o populație responsabilă pentru etapa de acidogeneză (X_1) și o populație responsabilă pentru etapa de metanizare (X_2).

Etapa de acidogeneză X_1 , constituie suma degradărilor de monozaharide, de aminoacizi și de acizi grași cu catenă lungă [27].

$$X_1 = X_{su} + X_{aa} + X_{fa} \quad (2.10)$$

Populația bacteriilor metanogene este reprezentată de suma degradărilor de acetat, de hidrogen, de valerianat, butirat și de propionat [27].

$$X_2 = X_{ac} + X_{h2} + X_{c4} + X_{pro} \quad (2.11)$$

Concentrația de substrat organic (S_1) prezintă corespondența în substraturi solubile ADM1, respectiv monozaharide, aminoacizi, acizi grași cu catenă lungă, particule compozite, carbohidrați, proteine și lipide [27]. Practic S_1 este caracterizat de COD [26].

$$S_1 = S_{su} + S_{aa} + S_{fa} + X_C + X_{ch} + X_{pr} + X_{li} \quad (2.12)$$

Corespondența concentrației acizilor organici (S_2) este dată de compuși solubili: valerianat, acetat, butirat și propionat, practic S_2 se comportă ca un acetat pur [26].

$$S_2 = S_{va} + S_{ac} + S_{bu} + S_{pro} \quad (2.13)$$

$COD - ul$ total este compus din suma dintre S_1 și S_2 , unde S_1 reprezintă concentrația componentelor substratului organic și S_2 reprezintă concentrația de acizi grași volatili.

$$COD = S_1 + S_2 \quad (2.14)$$

$TSS - ul$ reprezintă concentrația totală de solide în suspensie.

$$TSS = X_1 + X_2 \quad (2.15)$$

Capitolul 3: CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ UTILIZÂND METODA MODEL FREE CONTROL

În cadrul acestui capitol este prezentată utilizarea metodei Model Free Control în cazul proceselor de digestie anaerobă. Astfel, se pornește de la studiul proprietăților statice și dinamice ale procesului de digestie anaerobă și formularea problemei de control. Având în vedere complexitatea modelului matematic utilizat, modelul ADM1, se propune utilizarea acestuia drept *instalație virtuală*, iar o metodă adecvată de control a acesteia ar fi Model Free Control.

3.1 Definirea problemei de conducere automată în cazul proceselor de digestie anaerobă

Digestorul anaerob utilizat în studiul de caz prezentat are volumul de lichid $V_l = 3400m^3$ și volumul de gaz $V_g = 300m^3$. Așa cum a fost precizat în capitolele anterioare, în prezent există două abordări privind procesele de digestie anaerobă: 1) utilizarea unor modele simplificate, (de exemplu, modelele de tip AM2); 2) dezvoltarea unui model matematic detaliat, de mare complexitate, cum este ADM1. De regulă, în problema controlului procesului de digestie anaerobă se utilizează modele simplificate, care permit utilizarea observerelor și a metodologiilor de control bazate pe modele analitice. Modelul matematic complex ADM1 este neadecvat pentru sinteza algoritmilor de control, însă permite detalierea fenomenologiei din proces și evidențierea influențelor unor factori endogeni asupra dinamicii procesului. În aceste condiții, ADM1 simulat numeric poate fi utilizat ca *instalație virtuală* pentru investigarea calitativă a proprietăților statice și dinamice ale procesului de digestie anaerobă și pentru validarea preliminară, prin simularea numerică a performanțelor algoritmilor de control. Această abordare este utilizată în cadrul acestui capitol, în contextul investigării aplicabilității metodei Model Free Control (MFC) în cazul proceselor de digestie anaerobă. Acest lucru se datorează faptului că abordarea MFC nu necesită utilizarea unui model analitic, așa cum este cazul în majoritatea algoritmilor citați în literatură.

Proprietățile dinamice ale PDA în raport cu mărimea de comandă Q_{ad} și cu perturbația S_{1in} sunt ilustrate în Figura 3.1. Aici s-au considerat 4 regimuri de funcționare, definite prin valorile medii $[200; 300]$ $[m^3/d]$ ale debitului Q_{ad} și valorile medii $[27; 37]$ $[mg/l]$ ale perturbației S_{1in} . În aceste regimuri de funcționare s-au aplicat variații în treaptă ale debitului de influent de amplitudine egală cu 20 $[m^3/d]$

Având în vedere aspectele menționate anterior, obiectivul problemei de control este reglarea la o referință impusă a variabilei Chemical Oxygen Demand (COD) definită prin relația $COD = S_1 + S_2$, unde S_1 este suma concentrațiilor componentelor substratului organic, iar S_2 este suma concentrațiilor acizilor grași volatili. Mărimea de comandă a buclei de reglare este diluția D (sau debitul de influent în digestorul anaerob, $Q_{ad} = V_l \cdot D$), iar mărimile perturbatoare sunt variațiile concentrațiilor din influent, S_{1in} și S_{2in} .

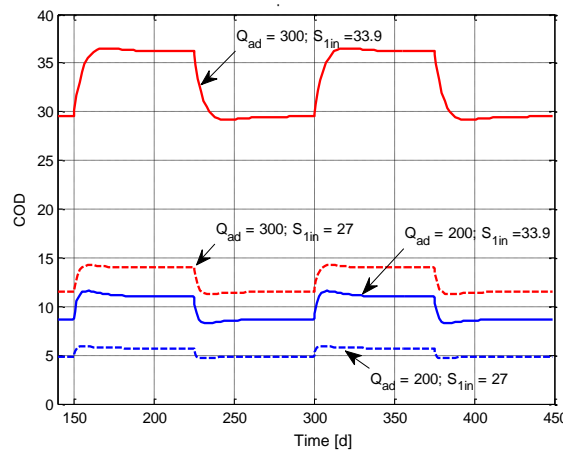


Fig. 3.1 Răspunsuri la semnale treaptă ale PDA în diferite regimuri de funcționare, definite prin valorile medii ale Q_{ad} și S_{1in}

3.2 Utilizarea metodei Model Free Control în conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă

3.2.1 Considerații generale privind metoda Model Free Control

Forma cea mai generală a modelului PDA este:

$$F(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(m)}, u_{pk}, \dot{u}_{pk}, \dots, u_{pk}^{(m_k)}) = 0 \tag{3.1}$$

unde y este mărimea controlată ($y = COD$), u este comanda ($u = Q_{ad}$) și u_{pk} , $k = 1, 2$, sunt mărimile perturbatoare ($u_{p1} = S_{1in}$, $u_{p2} = S_{2in}$). În abordarea MFC, în locul modelului necunoscut (3.1) se utilizează modelul „ultralocal” [28], [29]:

$$y^{(v)} = F + \alpha u \tag{3.2}$$

unde: ordinul derivatei v are o valoare redusă, 1 sau 2, F este o variabilă care se estimează la fiecare moment discret de calcul al comenzii, iar α este ales de proiectant astfel încât $\alpha \cdot u$ și $y^{(v)}$ „să fie de aceeași mărime” [29], [30], [31].

Comanda ideală MFC este de forma:

$$u = [-F + \dot{y}_r + R(e)]/\alpha \tag{3.3}$$

unde $R(e)$ este componenta comenzii dată de un controller clasic:

$$R(e) = K_p e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \dot{e} \tag{3.4}$$

unde $e = y_r - y$, iar y_r este referința buclei. După cum se aleg valorile nenule ale parametrilor K_p , T_i , T_d , se obțin regulatoarele numite iP , respectiv iPI , iPI , iP^2 , etc. Din relațiile (3.2),(3.3) și (3.4) se obține:

$$(1 + T_d)\dot{e} + K_p e + \frac{1}{T_i} \int e dt = 0 \tag{3.5}$$

Pe baza acestei ecuații, variabila în condițiile idealului și comanda necunoscută dată de ecuația (3.3), se bazează pe aprecierea nerealistă din [29], că acordarea parametrilor K_P , T_i și T_d „devine prin urmare simplă”. În realitate comanda utilizată efectiv este:

$$u = [-\hat{F} + \dot{\hat{y}}_r + R(e)]/\alpha \quad (3.6)$$

unde \hat{F} și $\dot{\hat{y}}_r$ sunt estimările curente ale variabilelor F și \dot{y}_r .

Pentru a determina estimarea \hat{F} sunt întâlnite două abordări în literatură. Prima dintre acestea, utilizată în [29] și [30] pornește de la modelul „ultralocal” pentru timpul discret:

$$\dot{y}[k] = F[k] + \alpha u[k - 1] \quad (3.7)$$

de unde rezultă:

$$\hat{F}[k] = \dot{\hat{y}}[k] + \alpha u[k - 1] \quad (3.8)$$

în care $\dot{\hat{y}}[k]$ este estimarea derivatei ieșirii. Din (3.6) și (3.8) rezultă legea de comandă:

$$u[k] = u[k - 1] + \frac{1}{\alpha} [\dot{\hat{y}}_r[k] - \dot{\hat{y}}[k] + R(e[k])] \quad (3.9)$$

Dacă derivatele din ecuația (3.9) se calculează cu relațiile simple:

$$\dot{\hat{y}}_r[k] = \frac{1}{T_s} (y_r[k] - y_r[k - 1]) \quad (3.10)$$

$$\dot{\hat{y}}[k] = \frac{1}{T_s} (y[k] - y[k - 1]) \quad (3.11)$$

unde T_s este perioada de eșantionare, atunci se obțin diverse legi de comandă prin explicitarea lui $R(e[k])$. Dacă $R(e[k]) = K_p e[k]$ se obține un controller iP cu legea de comandă:

$$u[k] = u[k - 1] + \frac{1}{\alpha T_s} [e[k] - e[k - 1]] + \frac{K_p}{\alpha} e(k) \quad (3.12)$$

Comparând această relație cu expresia comenzii unui controller clasic PI cu parametrii K_P și K_I , rezultă că ecuația (3.9) a controllerului de tip iP este o lege de comandă de tip PI cu parametrii:

$$K_P = \frac{1}{\alpha T_s}; K_I = \frac{K_p}{\alpha T_s} \quad (3.13)$$

În același mod se stabilește legătura dintre parametrii controllerului iPI cu cei ai controllerului clasic PI^2 . În cele ce urmează se utilizează numai reglatoarele de tip iP și iPI .

Cea de-a doua abordare de determinare a estimării \hat{F} , utilizată în [29] și [32], are la bază ecuația (3.6). Din această ecuație se obține \hat{F} , căreia i se aplică o filtrare de tip fereastră mobilă. În cazul cel mai simplu, al controllerului iP , când $R(e) = K_p \cdot e$, rezultă:

$$\hat{F}(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t [\dot{y}_r(\zeta) - \alpha u(\zeta) + K_p e(\zeta)] d\zeta \quad (3.14)$$

unde $\tau > 0$ este ales la acordarea controllerului.

O problemă importantă ce apare la implementarea reglatoarelor din abordarea MFC este diminuarea zgomotului, având în vedere necesitatea determinării mărimii \dot{y} . În lucrările [28] și [33] se recomandă utilizarea unei proceduri de obținere a acestei mărimi pe baza unui filtru *Finite Impulse Response* (FIR), care se sintetizează pornind de la dezvoltarea în serie Taylor a variabilei $y(t)$.

3.2.2 Acordarea controllerului la utilizarea abordării MFC pentru PDA

În lipsa unui suport teoretic bazat pe modelul analitic al procesului, la acordarea parametrilor controllerului se utilizează frecvent metoda „trial and error”. Pentru evidențierea efectelor asupra dinamicii buclei de control produse de fiecare parametru, în schema de principiu a sistemului de control al procesului de digestie anaerobă, dată în Figura 3.2, s-au pus în evidență cele două componente ale comenzii $u[k]$: componenta $u_p[k]$, care derivă din ecuația modelului „ultralocal”, și componenta $u_R[k]$, care este introdusă de legea de comandă $R(e)$. Parametrul K_p depinde numai de α , pe când restul parametrilor legii de control depind, în plus, și de parametrii incluși în $R(e[k])$.

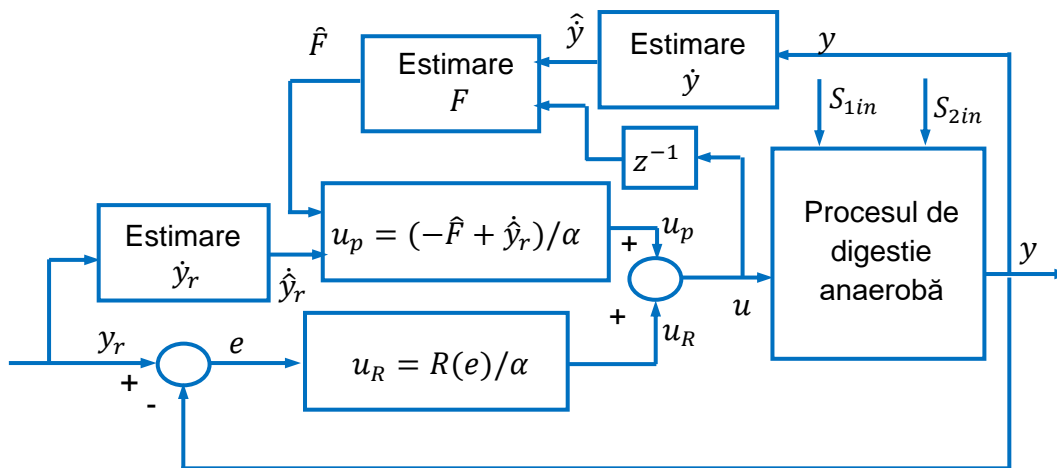


Fig. 3.2 Schema de principiu a sistemului de control al PDA utilizând MFC

În procesul de acordare a parametrilor se consideră mai întâi situația când $u_p[k] \neq 0$ și $u_R[k] = 0$. Atunci se aplică o variație în treaptă referinței $y_r(t)$, răspunsul buclei de control fiind dat în Figura 3.3.

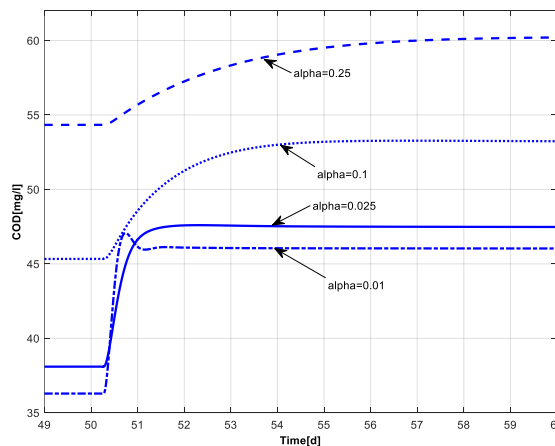


Fig. 3.3 Răspunsurile la treaptă ale sistemului cu comanda u_p pentru diferite valori ale parametrului α

Prin urmare, acordarea controllerului iP prin metoda „trial and error” a condus la parametrii $\alpha = 0.025$ și $K_p = 0.35$, care determină pe K_p , respectiv K_I în funcție de T_s . Performanțele

sistemului de control al PDA cu regulatorul iP , în condițiile inexistenței zgomotului care afectează ieșirea procesului, sunt ilustrate în Figura 3.4.

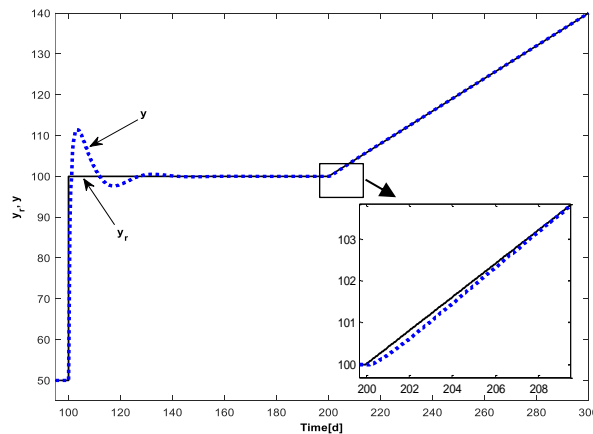


Fig. 3.4 Răspunsurile la semnale treaptă și rampă ale sistemului cu regatoare iP

Determinarea estimării derivatei \hat{y} , în condițiile existenței zgomotului de la ieșire, este o problemă importantă la controlul PDA, ca și la orice alt proces biotehnologic. În această privință, au fost utilizate două soluții. Prima dintre acestea constă în utilizarea relației (3.14). Ecuația filtrului FIR se obține prin discretizarea timpului și calculul integralei printr-o metodă numerică, de exemplu metoda trapezelor.

Cea de a doua soluție constă în utilizarea unui derivator cu funcția de transfer $s/(T_0s + 1)$, urmat de un filtru de ordin superior de tip *Infinite Impulse Response*. S-au utilizat filtre de tip Chebyshev II și filtre Bessel de ordinul 8. Comportarea sistemului de control cu controller iPI , atunci când sistemul este perturbat, este ilustrat în Figura 3.5.

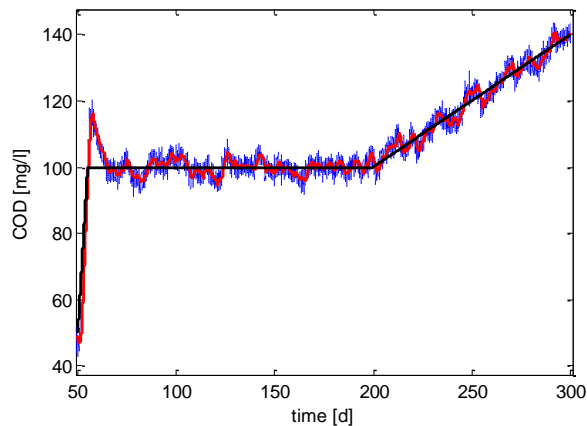


Fig. 3.5 Răspunsul sistemului perturbat cu zgomot: referința (negru);
 COD când S_{1in} are o componentă aleatoare (roșu);
 COD când ieșirea este contaminată de zgomot (albastru punctat)

3.2.3 Adaptarea parametrilor controllerului la modificarea regimului de sarcină al digesterului anaerob

Sistemul de control al PDA funcționează în regim de stabilizare a COD la un punct de referință impus, când perturbarea principală S_{1in} rămâne constantă. În aplicațiile reale S_{1in} are o valoare variabilă și conține o componentă aleatorie importantă. Figura 3.6, ilustrează funcționarea sistemului de control atunci când punctul de referință are o variație a rampei, urmată de un regim de stabilizare, în condițiile în care regimul de încărcare are o componentă aleatorie, iar controllerul iPI are parametri constanți, corespunzători câștigului static obținut pentru $\alpha = 0.025$.

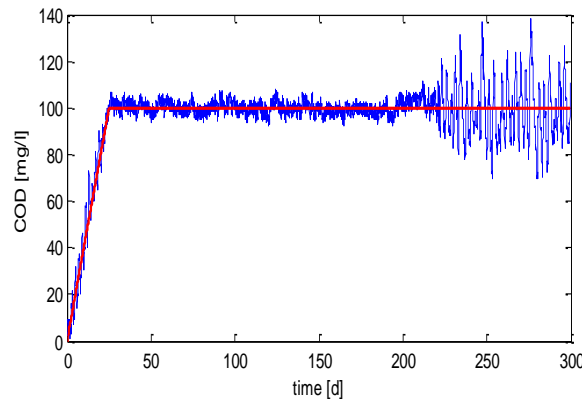


Fig. 3.6 Referința (roșu) și mărimea reglată (albastru)

Există două zone de operare instabile:

- a) când valoarea de referință este foarte mică și controllerul reduce foarte mult rata de intrare;
- b) când sarcina este mare și valoarea de referință poate fi asigurată numai prin reducerea substanțială a debitului de intrare.

Dacă se examinează caracteristicile prezentate în Figura 3.1, se poate observa că există o creștere semnificativă a caracterului nelinier al caracteristicilor statice la valori mici ale Q_{ad} . În aceste condiții, pentru a asigura stabilitatea sistemului, este necesar să se reducă câștigul static al controllerului prin creșterea parametrului α . Prin urmare această soluție, trebuie activată periodic, la scară de timp corespunzătoare regimului de adaptare al controllerului. Activarea ei în orice moment de timp ar însemna modificarea radicală și inoportună a legii de control. Structura de principiu a soluției de adaptare a parametrului α este dată în Figura 3.7.

Ecuția $\alpha = F(Q_{ad})$ este liniară:

$$\alpha = 0.2375 - 0.000385Q_{ad} \tag{3.15}$$

Ecuția (3.15) asigură valori mici ale lui α la debite Q_{ad} mari și valori de ordinul 0.2 la debite mici și foarte mici. Modificarea parametrului α se face periodic la scară de timp corespunzătoare modificării valorii medii a sarcinii. În acest scop se utilizează ansamblul sampler-hold (zero order hold), care lucrează cu perioadă de eșantionare $T_a = 10[d]$, mult mai mare decât perioada de eșantionare T_s . Rezultatele obținute sub prezența perturbației S_{1in} și a unui zgomot de frecvență înaltă care afectează variabila controlată sunt ilustrate în Figura 3.8. Aceasta ilustrează funcționarea stabilă a sistemului într-o gamă foarte largă de regim de sarcină.

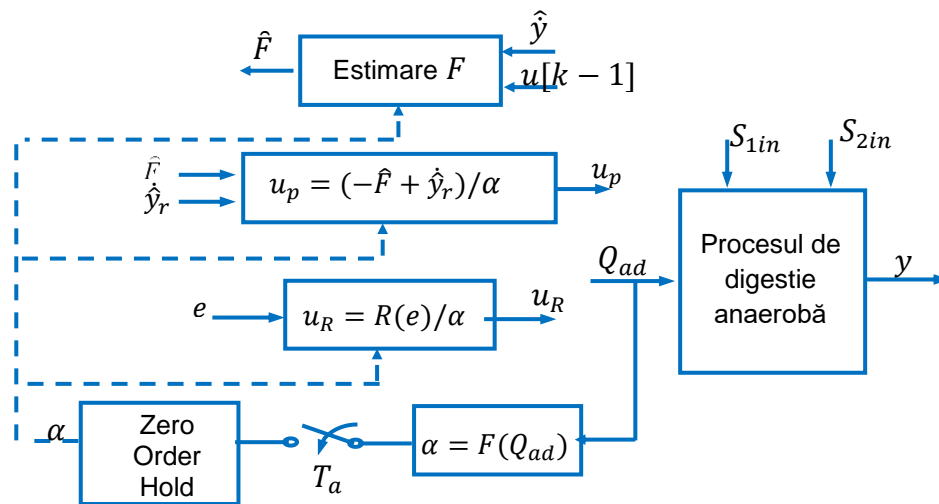


Fig. 3.7 Structura de adaptare a parametrilor controllerului

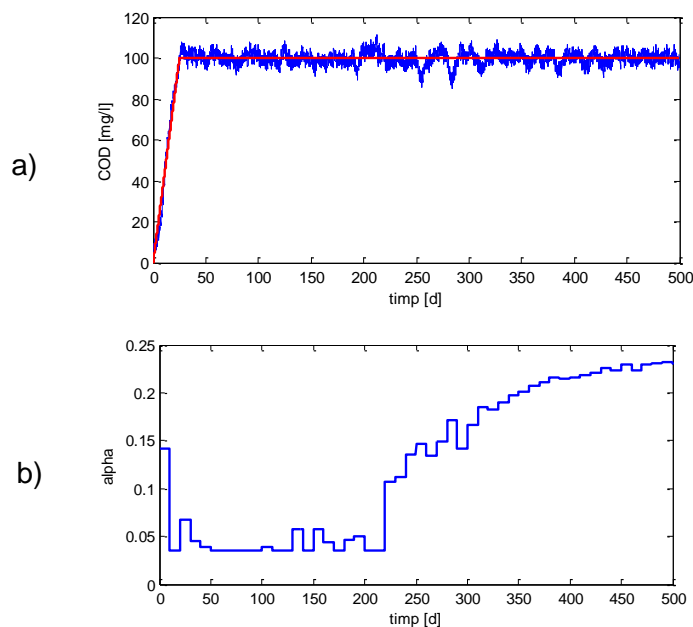


Fig. 3.8 Referința (roșu) și mărimea reglată (albastru) (a); comanda (b), parametrul α (c)

3.2.4 Concluzii

Deoarece identificarea experimentală a PDA pentru a obține modelul matematic al acestuia este mai puțin atractivă datorită duratei îndelungate a regimului dinamic și a necesității de a repeta această procedură ca urmare a variației procesului, abordarea MFC poate fi o soluție viabilă pentru controlul acestui proces. În absența unui model analitic al procesului, MFC propune o metodologie în care metoda „trial and error” are o pondere importantă în determinarea parametrilor legii controllerului. În acest context, cunoașterea calitativă a proprietăților statice și dinamice ale PDA bazată pe modelul ADM1, utilizat ca o *instalație virtuală*, este foarte utilă.

Rezultatele obținute confirmă acest lucru, în special cele referitoare la utilizarea unui sistem de adaptare a parametrilor pentru a asigura stabilitatea sistemului într-o gamă largă de regimuri de funcționare, ceea ce corespunde cu testarea soluției de control în condiții realiste, apropiate cu condițiile de funcționare ale digestoarelor anaerobe din practică.

Capitolul 4: CONDUCEREA AUTOMATĂ BAZATĂ PE DATE A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ

În cadrul acestui capitol se investighează aplicabilitatea metodelor de tip data-driven în cazul proceselor de digestie anaerobă, fiind propuse adaptări a trei metode în raport cu particularitățile procesului studiat, iar validarea s-a făcut prin simulare numerică considerând din nou modelul matematic complex ADM1 ca *instalație virtuală*. O primă metodă considerată este Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT), în acest caz fiind utilizate două soluții pentru determinarea parametrilor controllerului: algoritmul aferent variantei uzuale a metodei VRFT și un algoritm simplificat. A doua metodă considerată este Internal Model Control. Un aspect important al acestei abordări îl constituie alegerea modelului de referință. Ultima metodă studiată a fost Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT). În acest caz, a fost analizată utilizarea metodei FRIT pentru obținerea în cazul proceselor de digestie anaerobă a unor controllere de tip PI și PID, fiind considerată atât acordarea iterativă, cât și non-iterativă a parametrilor controllerului. În finalul capitolului sunt prezentate principalele concluzii privind utilizarea metodelor de control de tip data-driven în cazul proceselor de digestie anaerobă

4.1 Conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Virtual Reference Feedback Tuning

4.1.1 Algoritmul VRFT sintetizat cu date provenind din instalația virtuală

Utilizând modelul ADM1 se determină prin simulare numerică datele $\{\Delta u(t) = \Delta Q_{ad}(t), \Delta y(t) = \Delta COD(t)\}$, în care $\Delta Q_{ad}(t)$ este o secvență aleatoare al cărei model spectral este considerat cunoscut. Utilizând înregistrarea $\{\Delta u(t), \Delta y(t)\}_{t=1, N}$ algoritmul de control se deduce în conformitate cu schema de principiu din Figura 4.1, unde RM este un model de referință, DC reprezintă un compensator dinamic și Δd reprezintă perturbația. Semnalul $\Delta y(t)$ obținut prin simularea modelului ADM1, este transferat prin modelul invers RM^{-1} și se obțin succesiv referința virtuală \hat{r} , eroarea virtuală $\hat{\varepsilon}$ și integrala acesteia $\hat{\varepsilon}_1$.

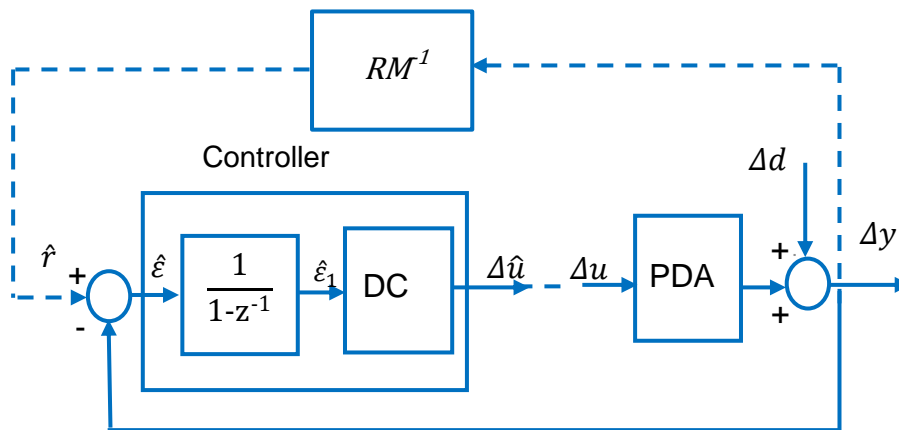


Fig. 4.1 Structura buclei de control propusă pentru metoda VRFT

În conformitate cu [34] RM se alege sub forma:

$$H_{RM}(z^{-1}) = \frac{z^{-(n_r+1)}(1-\alpha)^{n_r}}{(1-\alpha z^{-1})^{n_r}}, \alpha = \exp(-T_s \tilde{\omega}) \quad (4.1)$$

unde $n_r, \tilde{\omega}$ sunt parametri aleși de proiectant, care determină lățimea de bandă a sistemului în buclă închisă și T_s este perioada de eșantionare. Model invers este:

$$H^{-1}_{RM}(z^{-1}) = \frac{(1-\alpha z^{-1})^{n_r}}{z^{-n_r}(1-\alpha)^{n_r}} \quad (4.2)$$

Pentru determinarea parametrilor controllerului se pot aplica două soluții:

- algoritmul aferent variantei uzuale a metodei VRFT [34], în care RM joacă efectiv rolul unui model de referință al sistemului în buclă închisă.
- un algoritm simplificat, în care RM are rol diferit de cel al unui model de referință [35].

În cele ce urmează aceste soluții se adaptează situației particulare de obținere a datelor $\{\Delta u(t), \Delta y(t)\}_{t=\overline{1,N}}$, acestea fiind colectate din *instalația virtuală* considerată, pe baza modelului ADM1.

În metoda VRFT uzuală, prezentată în [34], sinteza controllerului pornește de la ipoteza că secvența de date este obținută de la procesul real, care implică prezența zgomotului în $\Delta y(t)$. Provocarea constă în adoptarea valorii optime a vectorului parametrilor controllerului în raport cu criteriul de performanță:

$$I_{VR} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\Delta u_L(t) - C(z, a) \hat{\varepsilon}_L(t))^2 \quad (4.3)$$

Cunoscând setul de date $\{\hat{\varepsilon}_L(t), \Delta u_L(t)\}_{t=\overline{1,N}}$, vectorul parametrilor a se deduce printr-o procedură de identificare (de exemplu metoda celor mai mici pătrate), care realizează minimizarea criteriului (4.3).

În metoda VRFT care utilizează date reale din proces, determinarea vectorului parametrului a necesită utilizarea metodei variabilelor instrumentale, pentru a evita obținerea unui vector deplasat.

4.1.2 Sinteza controllerului folosind algoritmul uzual VRFT

În ceea ce privește sinteza controllerului au fost considerate două regimuri de funcționare pentru PDA: când $\bar{S}_{1in} = 34[g/m^3]$ și când \bar{S}_{2in} este practic neglijabil ($\bar{S}_{2in} = 0.355[g/m^3]$). Pentru primul regim de funcționare a fost impus $\bar{u} = \bar{Q}_{ad} = 147[m^3/d]$ căruia îi corespunde $\bar{y} = \overline{COD} = 4.47[g/m^3]$, iar pentru al doilea regim de funcționare a fost impus $\bar{u} = \bar{Q}_{ad} = 332[m^3/d]$, căruia îi corespunde $\bar{y} = \overline{COD} = 40[m^3/d]$. În principiu, semnalul de comandă $\Delta u(t)$ influențează funcția de transfer a filtrului prin densitatea spectrală de putere. $\Phi_{\Delta u}(\omega)$. În cea mai simplă abordare, s-a adoptat un semnal de înaltă frecvență de tipul unei succesiuni aleatoare de trepte pentru comanda, $\Delta u(t)$, unde intervalul în care semnalul de intrare se păstrează constant este foarte mic ($T = 0.5[d]$). Este evident că acest semnal de intrare, ilustrat în Figura 4.2, are o densitate spectrală de putere practic constantă în banda de frecvență corespunzătoare modelului de referință.

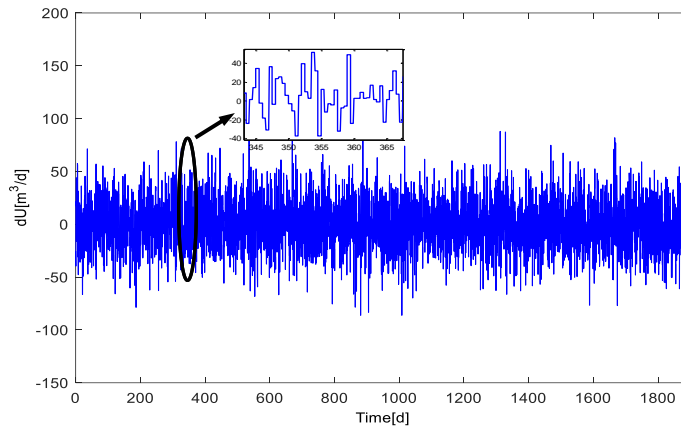


Fig. 4.2 Semnalul $\Delta u(t)$ utilizat la sinteza controllerului

În aceste condiții, funcția de transfer a filtrului este:

$$L(z) \cong (1 - M(z))M(z) \tag{4.4}$$

Funcția de transfer DC se alege sub forma:

$$H_{DC}(z^{-1}) = \sum_{i=0}^m a_i z^{-i} \tag{4.5}$$

prin urmare, modelul inițial DC se poate scrie sub forma:

$$\Delta \hat{u} = a^T \varphi(t); t = \overline{m, N} \tag{4.6}$$

în care:

$$a = [a_0 a_1 \dots a_m]^T; \varphi(t) = [\hat{\varepsilon}_1(t) \hat{\varepsilon}_1(t-1) \dots \hat{\varepsilon}_1(t-m)]^T \tag{4.7}$$

unde t este timpul discret.

Pentru a verifica performanța sistemului în buclă închisă, a fost utilizat setul de date $\{\Delta u(t), \Delta y(t)\}_{t=\overline{1, N}}$, ca o operație suplimentară pentru identificarea procesului. În Figura 4.3 sunt prezentate caracteristicile Bode ale modelului de referință (linia roșie) și ale sistemului în buclă închisă (linia albastră), iar Figura 4.4 ilustrează răspunsul sistemului în buclă închisă $\Delta y(t)$ la o secvență de variații de trepte ale referinței $\Delta y_{ref}(t)$ în al doilea regim de funcționare.

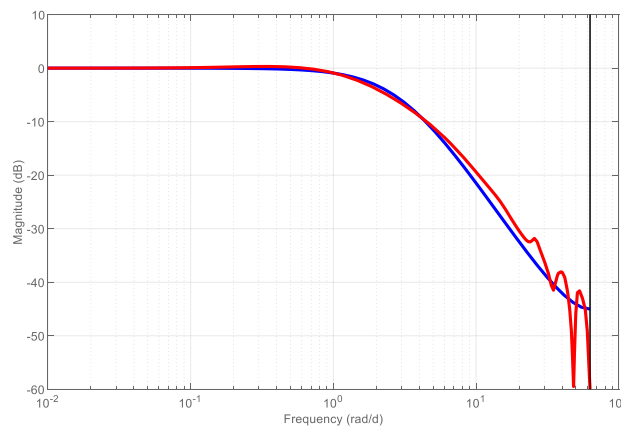


Fig. 4.3 Caracteristicile Bode ale RM (albastru) și sistemului în buclă închisă (roșu)

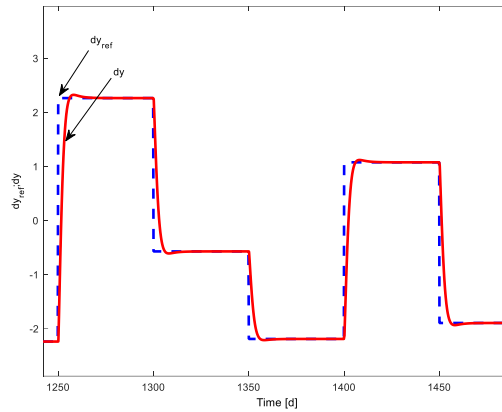


Fig. 4.4 Răspunsul sistemului la o secvență de variații de trepte ale referinței

4.1.3 Algoritmul VRFT simplificat sintetizat cu date provenind din instalația virtuală

Obiectivul impus pentru sintetizarea controllerului folosind abordarea VRFT uzuală este de a minimiza un criteriu care reflectă diferența dintre modelul de sistem în buclă închisă și modelul de referință adoptat. În cazul metodei VRFT simplificate, cerința de proiectare este cu totul diferită [35]: dorim să compensăm dinamica procesului și să obținem, prin interacțiunea cu proiectantul, un compromis între durata regimului dinamic și indicatorii marjei de stabilitate.

Schema de control din Figura 4.1 este păstrată, însă în cazul acesta blocul RM nu acționează ca model de referință, deși alegerea lui este ca în cazul abordării uzuale VRFT. Acest bloc ajută la obținerea semnalului $\hat{\varepsilon}_1(t)$ pornind de la ieșirea $\Delta y(t)$. Considerând $n_r = 2$ în modelul de bloc RM , funcția de transfer a legăturii între $\Delta y(t)$ și $\hat{\varepsilon}_1(t)$ este:

$$H_{in}(z^{-1}) = \left(\frac{(1 - \alpha z^{-1})^{n_r}}{z^{-n_r}(1 - \alpha)^{n_r}} \right) \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} \quad (4.8)$$

cu $\alpha = \exp(-T_s \tilde{\omega})$. Parametrul $\tilde{\omega}$ care influențează lățimea de bandă a RM , este ales în funcție de durata regimului dinamic al procesului, iar această durată depinde de regimul de funcționare curent al procesului. În Figura 4.5 sunt prezentate caracteristicile Bode legate de funcția de transfer (4.8) și blocul RM pentru 3 valori ale acestui parametru: $\tilde{\omega} \in \{1, 2, 3\}$.

Pentru toate aceste valori, se constată că lățimea de bandă RM este inclusă într-o bandă de frecvență în care subsistemul $H_{in}(z^{-1})$ are un câștig constant dependent de $\tilde{\omega}$. Rezultă că acest subsistem transferă la intrarea DC un semnal $\hat{\varepsilon}_1(t)$ cu o formă care este practic identică cu ieșirea $\Delta y(t)$, dar cu amplitudine diferită $\hat{\varepsilon}_1(t) \cong H_{in}(1) \cdot \Delta y(t)$.

În aceste condiții, prin identificarea DC cu intrarea $\hat{\varepsilon}_1(t)$ și cu ieșirea $\Delta y(t)$, se obține un subsistem care, până la un coeficient cu câștig static, reprezintă o aproximare a modelului invers al procesului și funcția de transfer în buclă deschisă este aproape de cea a integratorului până în apropierea frecvenței Shannon. Calcularea eficientă a acestei funcții de transfer necesită următoarele date $\{\Delta u(t), \Delta y(t)\}_{t=1, N}$ pentru identificarea procesului. Spre deosebire de metoda uzuală VRFT, unde identificarea procesului este necesară numai pentru validarea performanței

sistemului cu buclă închisă, metoda VRFT simplificată necesită calcularea funcției de transfer $\hat{P}(z)$ a procesului prin identificare, pentru a obține coeficientul de câștig static al controllerului.

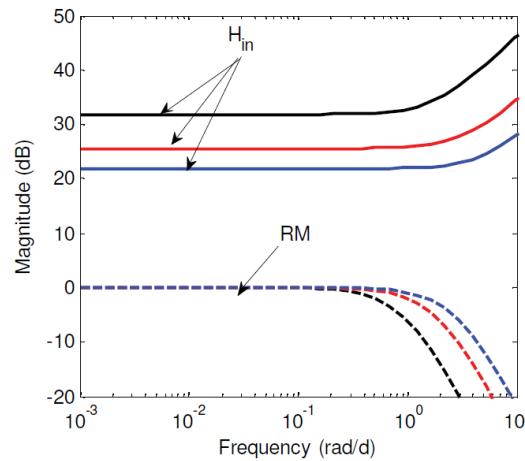


Fig. 4.5 Caracteristicile Bode ale subsistemului dat în ecuația (4.10) (line continuă) și a blocului RM (linia punctată)

Funcția de transfer a buclei deschise este:

$$H_{ol}(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \rho \sum_{i=0}^m a_i z^{-i} \cdot \hat{P}(z) \tag{4.9}$$

unde coeficientul ρ , considerat inițial ca o valoare unitară, este utilizat pentru a regla coeficientul de câștig static al controllerului.

4.1.4 Sinteza controllerului folosind algoritmul VRFT simplificat

Pentru a ilustra rezultatele obținute în sinteza controllerului, a fost considerat un al doilea regim de funcționare, la care debitul de intrare este $\bar{u} = 332[m^3/d]$, și ieșirea $\bar{y} = 40[g/m^3]$. Deoarece noul regim dinamic este mai rapid decât cel din primul regim de funcționare, se adoptată $\tilde{\omega} = 3[rad/d]$ în modulul blocului RM .

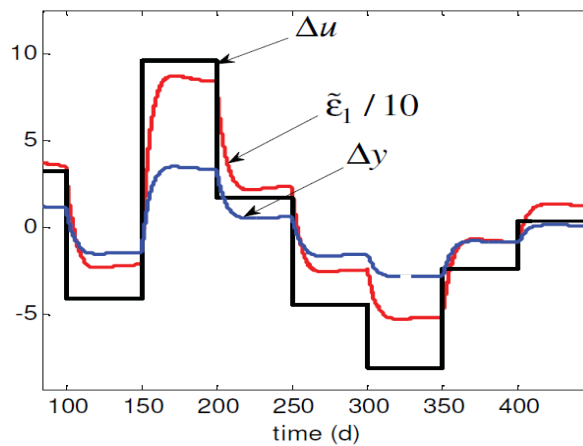


Fig. 4.6 Evoluția semnalelor $\Delta u(t)$, $\Delta y(t)$ și $\hat{\epsilon}_1(t)$

În Figura 4.6 este ilustrată evoluția ieșirii $\Delta y(t)$, precum și semnalele de intrare și de ieșire ale DC, $\hat{\varepsilon}_1(t)$ și $\Delta u(t)$.

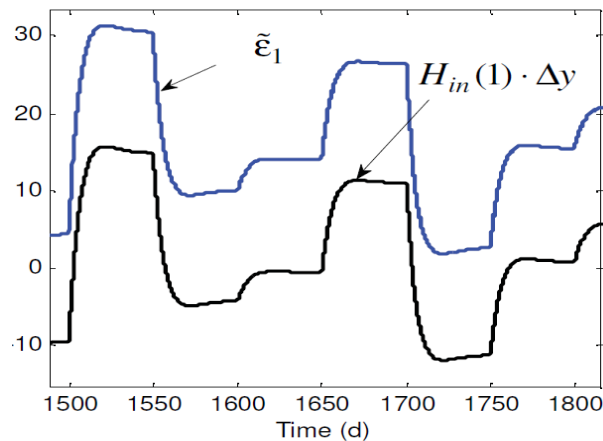


Fig. 4.7 Detalii privind forma semnalelor $\Delta y(t)$ și $\hat{\varepsilon}_1(t)$

Figura 4.7 ilustrează că semnalele $\hat{\varepsilon}_1(t)$ și $\Delta u(t)$ au practic aceeași formă, astfel încât, prin identificarea DC, se obține o bună aproximare a modelului invers al procesului la o scară modificată de coeficientul de amplificare statică $H_{in}(1)$.

Validarea performanței sistemului cu buclă închisă cu controllerul sintetizat a fost efectuată într-o buclă în care procesul îl reprezintă instalația virtuală simulată cu modelul nelinier ADM1. În Figura 4.8 este reprezentat răspunsul buclei la o secvență de variații de trepte ale valorii stabilite.

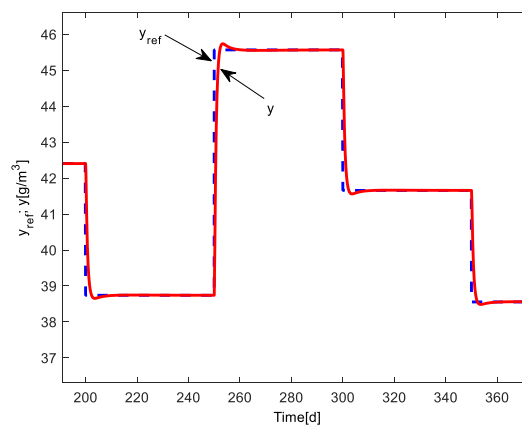


Fig. 4.8 Răspunsul sistemului la o secvență de variații de trepte ale valorii de referință

4.1.5 Rezultate privind controlul PDA utilizând abordarea VRFT

Rezultatele prezentate în această secțiune se referă la performanța sistemului de control al COD folosind un control sintetizat de algoritmul VRFT uzual. Aceste performanțe au fost stabilite în cadrul buclei de control care are în vedere instalația virtuală, simulată cu modelul matematic complex ADM1. Sistemul funcționează cu un punct de referință impus, care poate fi modificat în conformitate cu cerințele de protecție a mediului corelat cu ținta de producție de gaz metan. Principala perturbație care afectează sistemul este variația aleatorie a concentrației de influent $S_{1in}(t)$.

Din rezultatele prezentate se observă o comportare foarte bună a soluției de control bazată pe metoda VRFT, chiar și în condițiile prezenței perturbației asupra concentrației de influent și a zgomotului de măsură.

4.2 Conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Internal Model Control

Internal Model Control (IMC) a fost introdus în 1982 [36] și este în prezent una din cele mai răspândite structuri de control utilizate în ingineria proceselor [37], [38], [39]. IMC a luat amploare în domeniul controlului datorită mecanismului său simplu și proiectării intuitive. În consecință, adoptarea structurii IMC asupra controlului proceselor de digestie anaerobă reprezintă o soluție de real interes. Implementarea IMC este o adevărată provocare când vine vorba de a calcula inversul matricei funcției de transfer a procesului de digestie anaerobă, deoarece acesta este un proces complex de dimensiuni mari.

În continuare, sunt detaliate aspectele aplicării metodei IMC bazate pe date în cazul proceselor de digestie anaerobă.

4.2.1 Principiul abordării metodei IMC bazate pe date

O reprezentare a structurii IMC este prezentată în Figura 4.9, împreună cu notațiile corespunzătoare.

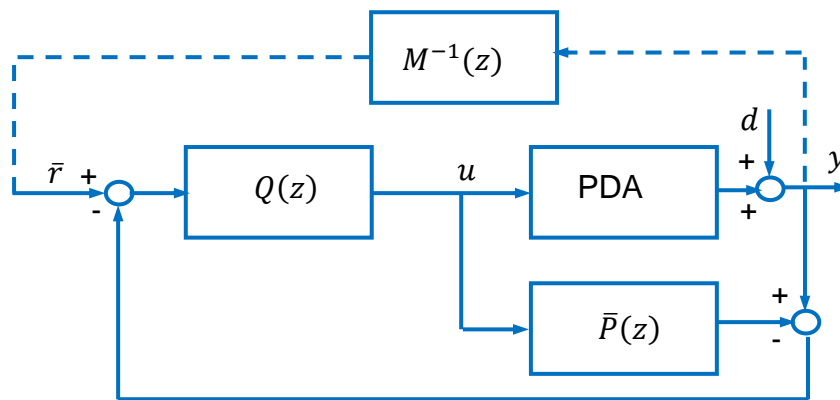


Fig. 4.9 Controlul PDA utilizând structura IMC: $M(z)$ - modelul de referință, $\bar{P}(z)$ - modelul liniar al procesului inclus în controllerul IMC, $Q(z)$ – controller

Modelul neliniar al PDA de tip ADM1 nu se utilizează explicit în proiectarea controllerului, ci numai prin datele intrare-ieșire pe care le furnizează. Obiectivul urmărit este realizarea unui transfer referință-ieșire ($r \rightarrow y$) în conformitate cu modelul de referință impus, $M(z)$, și obținerea unui efect redus al perturbației d asupra ieșirii y . Se notează cu $\bar{P}(z)$ funcția de transfer a modelului liniarizat în punctul de operare curent, obținut printr-o liniarizare ideală. Evident, $P(z)$ nu este cunoscută.

Structura de control conține controllerul propriu-zis, cu funcția de transfer ideală $Q(z)$, precum și modelul liniar intern al procesului, $\bar{P}(z)$.

Dacă se adoptă un model de referință $M(z)$ astfel încât funcția de transfer:

$$Q(z) = M(z)P^{-1}(z) \quad (4.10)$$

să fie inversabilă (adică să reprezinte un sistem la limită causal), atunci:

$$y(t) = M(z) \cdot r(t) + (1 - M(z)) \cdot d(t) \quad (4.11)$$

unde t este timpul discret, iar o notație de forma $y(t) = H(z) \cdot u(t)$ semnifică transferul $u \rightarrow y$ prin sistemul $H(z)$.

Fie $\bar{Q}(z)$ un controller impus, care să compenseze dinamica procesului, la un nivel de performanță. Prin analogie cu relația (4.10), valabilă în ipoteza modelelor idealizate, se deduce o aproximare a lui $P(z)$, fie acesta $\bar{P}(z)$, care intră în structura de comandă IMC:

$$\bar{P}(z) = M(z)\bar{Q}^{-1}(z) \quad (4.12)$$

Dacă se adoptă o structură a controllerului liniară în parametrii θ , adică un sistem FIR cu funcția de transfer $\bar{Q}(z, \theta)$, atunci determinarea vectorului parametrilor se face prin minimizarea criteriului:

$$J(\theta) = \sum_{t=1}^N (u(t) - \bar{Q}(z, \theta) \cdot \bar{r}(t))^2 \quad (4.13)$$

utilizând metoda celor mai mici pătrate.

În concluzie, proiectarea bazată pe date a controllerului $\bar{Q}(z)$ utilizează datele $u(t)$, $y(t)$, colectate la funcționarea PDA, în buclă deschisă într-un punct de operare dat, precum și "referința" $\bar{r}(t)$ după alegerea modelului de referință. Deci, parametrii optimali θ^* obținuți prin minimizarea criteriului (4.13) nu sunt afectați de zgomotul colorat $y(t) - \bar{y}(t)$.

O problemă esențială, care se pune la proiectarea bazată pe date a structurii IMC, este asigurarea stabilității robuste. Această cerință se impune având în vedere incertitudinile existente la adoptarea modelului $\bar{P}(z)$ din structura de comandă. Se consideră că, la alegerea modelului, limita superioară a incertitudinilor multiplicative, exprimată în domeniul frecvență, este $\bar{l}_m(\omega)$, adică:

$$\left| \frac{P(e^{j\omega}) - \bar{P}(e^{j\omega})}{\bar{P}(e^{j\omega})} \right| \leq \bar{l}_m(\omega) \quad (4.14)$$

Dacă într-un sistem în buclă închisă, modelul $\bar{P}(z)$ adoptat se abate de la modelul real $P(z)$ până la limita dată de (4.17), atunci sistemul este stabil robust. Condiția ca sistemul în buclă închisă să fie robust stabil, dată în [39] de asemenea și în [40], [41], este:

$$|M(e^{j\omega})| < \left| \frac{1}{\bar{P}(e^{j\omega})\bar{Q}(e^{j\omega})\bar{l}_m(\omega)} \right|; \forall \omega \quad (4.15)$$

4.2.2 Alegerea modelului de referință în cadrul metodei IMC

Alegerea modelului de referință $M(z)$ se face numai pe baza datelor de intrare-ieșire disponibile pentru sinteza controllerului și impune performanțele dorite ale buclei închise. Alegerea lui $M(z)$ este o problemă esențială în proiectarea structurii de control, deoarece

determină expresiile concrete ale funcțiilor de transfer $\bar{Q}(z)$ și $\bar{P}(z)$, precum și asigurarea stabilității robuste.

Modelul de referință trebuie să fie între două limite:

1. Un model inversabil de bandă largă, a cărui frecvență înaltă de tăiere este limitată de frecvența Shannon impusă la colectarea datelor

2. Un model inversabil de frecvență joasă, la limită o amplificarea statică, teoretic egală cu inversul amplificării statice a procesului: $\bar{Q}(z) = 1/P(1)$. În acest caz, este de așteptat ca performanțele dinamice ale sistemului în buclă închisă să fie foarte modeste.

S-a considerat un regim de operare al procesului în jurul punctului static de funcționare $COD = 1.5[g/m^3]$ și $Q_{ad} = 0.4[m^3/d]$.

Funcția de transfer a modelului de referință utilizat în cele ce urmează este [34]:

$$H_{RM}(z^{-1}) = \frac{z^{-(n_r+1)}(1-\alpha)^{n_r}}{(1-\alpha z^{-1})^{n_r}}, \alpha = \exp(-T_s \tilde{\omega}) \quad (4.16)$$

în care n_r este ordinul modelului, $\tilde{\omega}$ - parametrul care determină lărgimea benzii de frecvență a acestuia, iar T_s este perioada de eșantionare. La creșterea parametrului $\tilde{\omega}$, durata regimului dinamic al modelului de referință se reduce.

Modelul invers este:

$$H_{RM}^{-1}(z^{-1}) = \frac{(1-\alpha z^{-1})^{n_r}}{z^{-n_r}(1-\alpha)^{n_r}} \quad (4.17)$$

Proiectarea controllerului IMC se face pe baza datelor de intrare-ieșire ale procesului, obținute atunci când acesta lucrează în buclă deschisă. În Figura 4.10 sunt date variațiile față de valorile medii ale mărimilor de ieșire ale procesului și modelului identificat cu metoda celor mai mici pătrate, în situația când s-a considerat că ordinul modelului liniar este de ordinul 4.

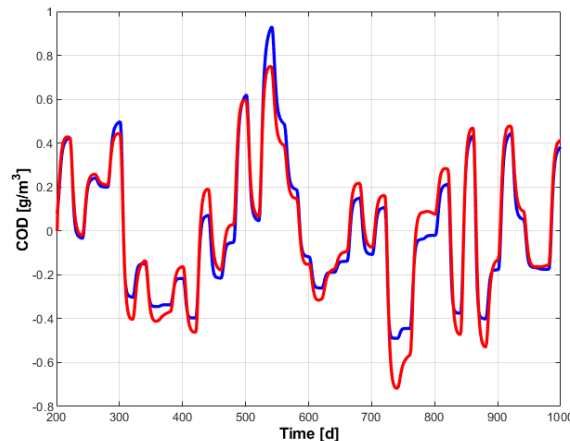


Fig. 4.10 Variațiile față de valorile medii ale mărimilor de ieșire ale procesului (albastru) și modelului identificat (roșu)

În modelul de referință (4.16) se adoptă $n_r = 2$, care asigură o dinamică fără suprareglare. Alegerea parametrului $\tilde{\omega}$, care determină durata regimului tranzitoriu, se face pe baza cunoștințelor apriorice privind dinamica procesului. Se adoptă valorile „candidat”: $\tilde{\omega}_k, k = \overline{i, L}$, care se testează în cadrul următoarei proceduri:

1. Se analizează calitativ răspunsurile la semnal treaptă ale modelului $M(z)$, în raport cu dinamica reflectată prin datele din proces, dar și în raport cu informațiile din practica inginerescă, privitoare la timpul de răspuns al procesului în buclă închisă.

2. Se determină referința fictivă $\bar{r}(t)$ prin transferul semnalului $y(t)$ prin $M^{-1}(z)$;

3. Pe baza datelor $\{y(t), \bar{r}(t)\}_{t=1, N}$ se face identificarea modelului liniar.

$$\bar{Q}(z, \theta) = \sum_{i=0}^m \theta_i z^{-i} \quad (4.18)$$

4. Se face reprezentarea grafică a caracteristicilor de frecvență ale lui $\bar{Q}(z, \theta)$, pentru toate valorile „candidat” ale parametrului $\tilde{\omega}$ al modelului de referință.

4.2.3 Proiectarea structurii de control în cadrul metodei IMC

Pentru o mai bună transparență a corelării parametrilor controllerului cu parametrii modelului de referință, s-a procedat la conversia digital-analitic a funcțiilor de transfer implicate în analiza structurii de control.

Funcția de transfer a modelului de referință $M(s)$ pentru $\tilde{\omega} = 2.5$ este:

$$M(s) \simeq \frac{1}{(0.4s + 1)^2} \quad (4.19)$$

După identificarea modelului $\bar{Q}(z, \theta)$ pentru $m = 4$ și reducerea ordinului modelului analogic echivalent, se obține:

$$\bar{Q}(s) = \frac{0.1046(0.3978s + 1)}{(0.005s + 1)} \quad (4.20)$$

În Figura 4.11 se prezintă caracteristica Bode a controllerului analogic (4.20) (maro), în comparație cu cea a controllerului $\bar{Q}(z, \theta)$ identificat (roșu).

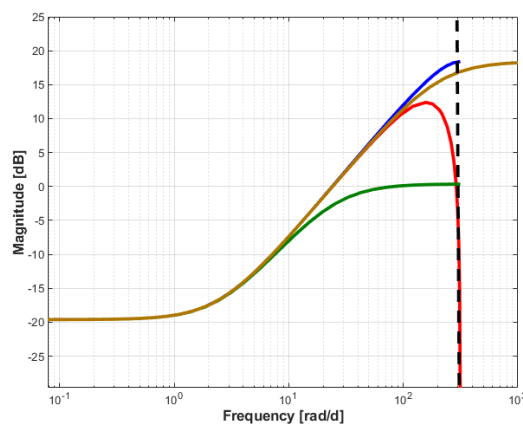


Fig. 4.11 Caracteristici Bode pentru: $\bar{Q}(z, \theta)$ identificat (roșu), analogic de ordin redus (maro), digital de ordin redus (albastru) și digital cu bandă de frecvență limitată (verde)

Este cunoscut faptul că structura IMC realizează o lege de control corespunzătoare unui controller clasic cu funcția de transfer:

$$C(s) = \frac{\bar{Q}(s)}{1 - \bar{P}(z)\bar{Q}(s)} \tag{4.21}$$

4.2.4 Verificarea stabilității robuste în cadrul metodei IMC

Verificarea condiției (4.15) necesită evaluarea limitei superioare a incertitudinilor multiplicative $\bar{l}_m(\omega)$. Întrucât singurele informații disponibile privind procesul condus sunt datele de intrare-ieșire $\{u(t), y(t)\}_{t=1, \dots, N}$, obținerea funcției de transfer $\bar{l}_m(\omega)$, pe baza acestor date și a funcțiilor de transfer din structura legii de comandă, se face prin metoda *Empirical Transfer Function Estimate* (ETFE), introdusă de Ljung [42] și utilizată, de asemenea, în [40] și [41].

Operațiile necesare la verificarea efectivă a stabilității robuste sunt incluse în următorul algoritm, propus în lucrările [40] și [41]:

Date inițiale:

$$\{u(t), y(t)\}_{t=1, \dots, N}, \alpha \geq 0, \bar{Q}(e^{j\omega}, \theta^*), \bar{P}(e^{j\omega}, \theta^*), \quad \omega_k = 2\pi k/N, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

1. Se calculează $y_{diff}(t) = y(t) - \bar{P}(e^{j\omega}, \theta^*) \cdot u(t)$;
2. Se calculează $y_{model}(t) = \bar{P}(e^{j\omega}, \theta^*) \cdot u(t)$;
3. Se calculează $\hat{H}_{diffN}(e^{j\omega})$ definită prin $y_{diff}(t)$ ca ieșire și $u(t)$ ca intrare, utilizând ETFE;
4. Se calculează $\hat{P}_N(e^{j\omega})$ definită prin $y_{model}(t)$ ca ieșire și $u(t)$ ca intrare, utilizând ETFE;
5. Se calculează $\bar{l}_m(\omega) = \frac{|\hat{H}_{diffN}(e^{j\omega})|}{|\hat{P}_N(e^{j\omega})|}$
6. Pentru fiecare $\omega_k, k = 0, N - 1$ se verifică condiția $|\bar{P}(e^{j\omega}, \theta^*)\bar{Q}(e^{j\omega}, \theta^*)\bar{l}_m(\omega)| \leq 1 - \alpha$

Adoptând $\alpha = 0.2$, condiția (4.15) de stabilitate robustă este verificată pe baza reprezentării în Figura 4.12 a funcțiilor $\frac{1-\alpha}{\bar{l}_m(\omega)}$ și $|\bar{P}(e^{j\omega}, \theta^*)\bar{Q}(e^{j\omega}, \theta^*)|$.

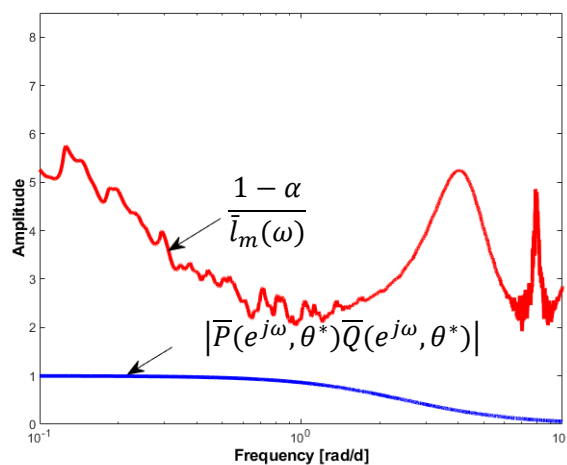


Fig. 4.12 Verificarea stabilității robuste a sistemului

4.2.5 Validarea prin simulare a legii de control obținute prin metoda IMC bazate pe date

Analiza prin simulare numerică a performanțelor legii de control sintetizate a urmărit 3 aspecte:

1. urmărirea referinței $COD^{ref}(t)$;
2. rejecția perturbației $COD_{in}(t)$;
3. efectul zgomotului de măsură asupra mărimii reglate.

Performanțele de urmărire a referinței sunt ilustrate în Figura 4.13a și 4.13b.

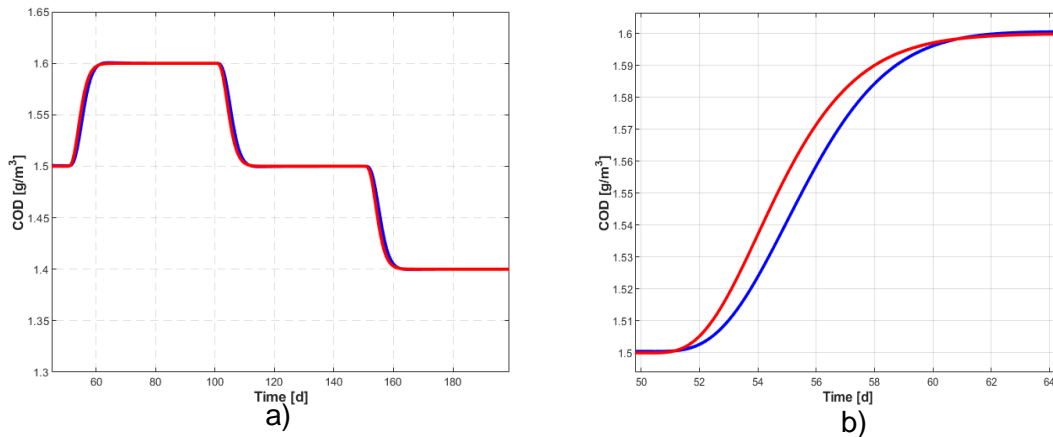


Fig. 4.13 Urmărirea referinței: referință COD (roșu), mărime reglată (COD - albastru) (a); zoom (b)

1. Întârzierea mărimii reglate în raport cu referința, atunci când aceasta are o variație apropiată de o rampă, este mai mică de o zi, iar eroarea maximă în cursul regimului dinamic este de $\varepsilon_{COD,max}$.
2. Rejecția perturbației a fost examinată în raport cu variația din Figura 4.14a a COD în influent ($COD_{in}(t)$).

Evoluția mărimii reglate, $COD(t)$ – cu albastru, în raport referința $Q_{ref}(t)$ – cu roșu, este dată în Figura 4.14b.

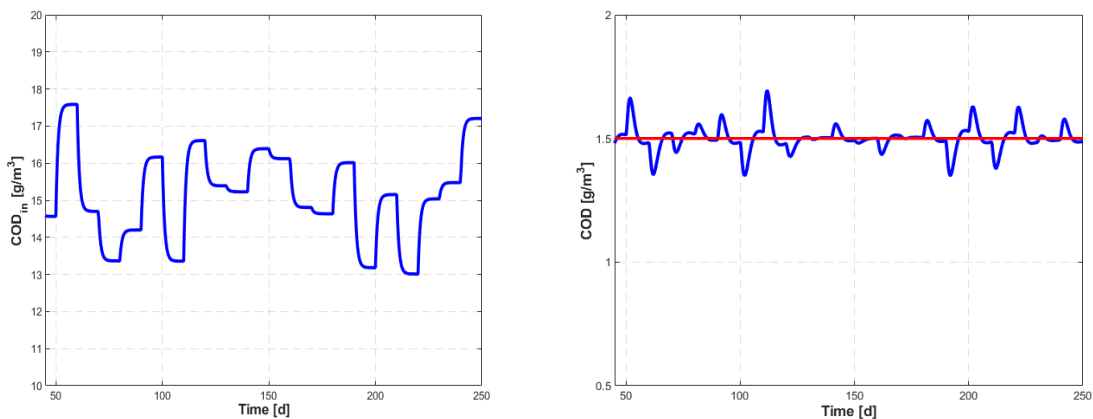


Fig. 4.14 Evoluția $COD_{in}(t)$ (a) și Evoluția referinței (roșu) și a mărimii reglate (albastru) (b)

3. S-a testat efectul unui zgomot de măsurare cu abaterea standard $\sigma_n = 0.0233$ asupra mărimii reglate. În aceste condiții, abaterea standard a mărimii reglate a fost $\sigma_{COD} = 0.0233$, iar evoluția acestei mărimi este dată în Figura 4.15.

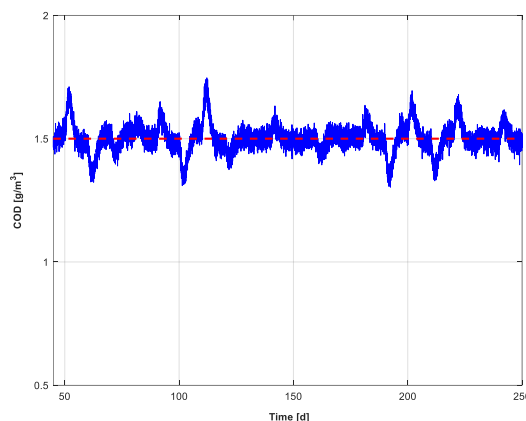


Fig. 4.15 Efectul zgomotului de măsurare asupra mărimii reglate

4.3 Conducerea automată proceselor de digestie anaerobă utilizând metoda Fictitious Reference Iterative Tuning

Metoda Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT) a apărut frecvent în literatura de specialitate în urma publicării în 2004 și 2005 a lucrărilor [43] și [44], și este o procedură utilizată ca o alternativă la metoda VRFT. În cadrul metodei FRIT se minimizează un criteriu pătratic de performanță în care intervine eroarea definită ca diferența dintre mărimea de ieșire a procesului și mărimea de ieșire a modelului de referință, atunci când la intrarea acestuia se aplică o referință "fictivă". Calculul acesteia din urmă necesită transferul mărimii de intrare a procesului prin controllerul inversat. Optimizarea criteriului se face iterativ, printr-o metodă de căutare în spațiul parametrilor controllerului.

Spre deosebire de metodele anterioare de proiectare bazate pe date, în cazul metodei FRIT se utilizează un set de date de intrare-ieșire din proces, atunci când acesta este în buclă închisă conform lucrărilor [43], [44], [45], [46].

4.3.1 Principiul variantei uzuale a metodei FRIT

Sinteza legii de comandă pentru procesele de digestie anaerobă se face luând în considerare următoarele condiții inițiale:

1. funcția de transfer a modelului de referință, $M(s)$, prin care se impun caracteristicile statice și dinamice ale sistemului în buclă închisă;
2. structura controllerului cu o funcție de transfer inversabilă, $C(s, \rho)$, în care ρ este vectorul parametrilor;
3. valoarea inițială a acestui vector, ρ^0 , pentru care sistemul în buclă închisă este stabil;
4. setul de date $\{u(t), y(t)\}_{t=1, N}$ cules în buclă închisă, în jurul punctului de operare asigurat de referința buclei de reglare.

Problema acordării controllerului pornește de la cerința de minimizare a erorii de reglare. Parametrul optimal, ρ^* , este:

$$\rho^* = \operatorname{argmin} \sum_{t=1}^N \|e(t, \rho)\|^2 \quad (4.22)$$

unde:

$$e(t, \rho) = y(t, \rho) - M(s) \cdot r(t) \quad (4.23)$$

în care prin $M(s) \cdot r(t)$ s-a notat răspunsul modelului $M(s)$ la referința $r(t)$. În condițiile în care modelul procesului nu este cunoscut, deci $y(t, \rho)$ nu poate fi calculat, metoda FRIT propune înlocuirea erorii $e(t, \rho)$ cu o estimare $\tilde{e}(t, \rho)$, numită în continuare „eroare fictivă”, care poate fi dedusă pe baza setului de date intrare-ieșire. Criteriul de performanță care trebuie minimizat printr-o procedură numerică iterativă este:

$$J(\rho) = \sum_{t=1}^N \|\tilde{e}(t, \rho)\|^2 \quad (4.24)$$

Minimizarea criteriului (4.24) se face prin metode numerice clasice. La utilizarea metodei Gauss-Newton, algoritmul de ajustare a parametrilor:

$$\rho^{i+1} = \rho^i - \gamma R_i^{-1} \left. \frac{\partial J(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho^i} \quad (4.25)$$

implică calculul gradientului criteriului, cât și a lui R , care reprezintă aproximarea matricei Hessian.

4.3.2 Utilizarea metodei FRIT la obținerea unui controller de tip PI în cazul PDA

Se consideră semnalele de intrare-ieșire $\{u(t, \rho^0), y(t, \rho^0)\}_{t=1, \overline{N}}$, obținute prin simularea în buclă deschisă a modelului ADM1 în jurul unui punct de operare impus.

În problema controlului PDA s-a considerat un model de referință de forma:

$$M(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.26)$$

în care $\omega_n = 2.5 \left[\frac{\text{rad}}{\text{a}} \right]$ iar $\zeta = 1$.

S-a impus obiectivul acordării unui controller PI cu funcția de transfer:

$$C(s, \rho) = \frac{s + \rho_2}{\rho_1 s} \quad (4.27)$$

unde:

$$\rho = [\rho_1 \quad \rho_2] \quad (4.28)$$

iar parametrii inițiali sunt: $\rho_1 = 80$; $\rho_2 = 3$.

Parametrii finali ai controllerului obținuți prin acordare sunt: $\rho_1^* = 10.47$; $\rho_2^* = 1.351$.

O validare mai concludentă a controllerului se face utilizând modelul ADM1 în bucla de control. S-a considerat o serie de variații în treaptă ale referinței în jurul punctului de operare al

procesului și, în plus, s-a aplicat o variație în treaptă a perturbației (COD_{inf1}). Răspunsul sistemului este ilustrat în Figura 4.16.

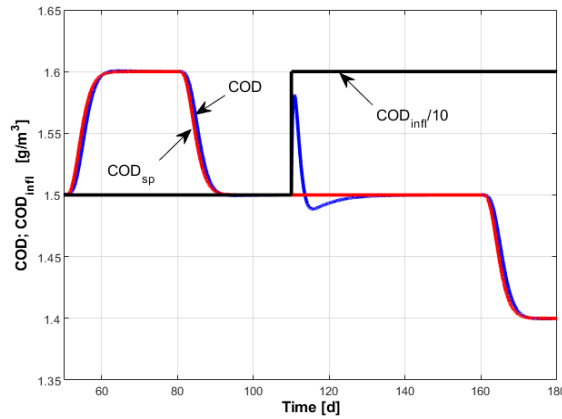


Fig. 4.16 Evoluțiile referinței (roșu), perturbației (negru) și COD (albastru) din bucla de reglare cu controller PI acordat cu metoda FRIT

4.3.3 Utilizarea metodei FRIT la obținerea unui controller de tip PID în cazul PDA

S-a considerat controllerul cu funcția de transfer:

$$C(s, \rho) = \frac{(s + \rho_2)(s + \rho_3)}{\rho_1 s(s + \rho_4)} \tag{4.29}$$

În cazul utilizării datelor în bucla închisă, s-a considerat vectorul parametrilor inițiali: $\rho^0 = [13 \ 3.7 \ 16 \ 100]^T$. La ajustarea parametrilor controllerului s-a utilizat pasul $\gamma = 0.02$, rezultând evoluția lui J din Figura 4.17. După 140 pași de ajustare, s-au obținut parametrii: $\rho^* = [17.36 \ 1.646 \ 87.45 \ 20.12]^T$.

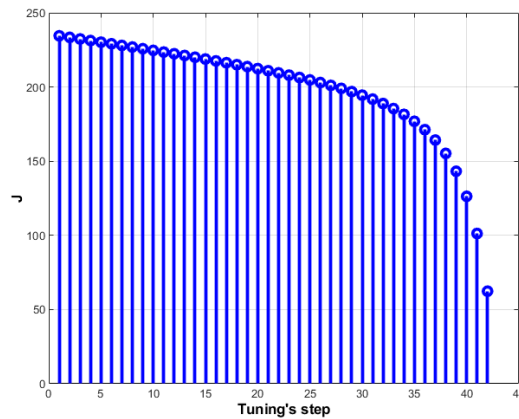


Fig. 4.17 Evoluția criteriului la acordarea controllerului PID cu date din bucla deschisă

În Figura 4.18 sunt date rezultatele de validare a reguletoarelor obținute după 80 și 140 pași de ajustare a parametrilor.

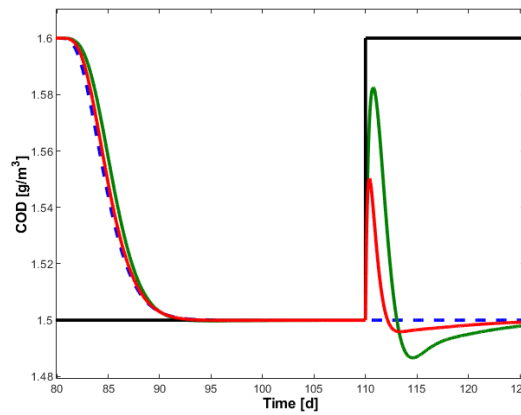


Fig. 4.18 Evoluțiile referinței (albastru - linie întreruptă), perturbației (negru) și a mărimii reglate după 80 și 140 pași de ajustare a parametrilor (verde, respectiv roșu)

4.3.4 Utilizarea variantei Fictitious Reference Non-Iterative Tuning în cazul PDA

În lucrarea [47] este menționată utilizarea referinței fictive în cadrul unei proceduri non-recursive de determinare a parametrilor controllerului, varianta fiind numită Fictitious Reference Non-Iterative Tuning (FRNIT). Procedura va fi prezentată și ilustrată în cele ce urmează. În acest caz este de preferat să se lucreze cu modele cu timp discret.

Fie:

$$M(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \tag{4.30}$$

funcția de transfer a modelului de referință, iar controllerul ai cărui parametri trebuie estimați se consideră sub forma:

$$C(z^{-1}) = \frac{P(z^{-1})}{Q(z^{-1})} = \frac{\rho_0 + \rho_1 z^{-1} + \rho_2 z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1/p - (1/p - 1)z^{-1})} \tag{4.31}$$

în care $p < 1$ este un pol care asigură o filtrare într-o bandă din apropierea frecvenței Shannon și care asigură realizabilitatea calculului funcției de transfer $C^{-1}(z^{-1})$.

Referința fictivă se calculează în mod similar procedurii FRIT. Utilizând date intrare-ieșire culese în buclă deschisă, colectate din simularea procesului de digestie anaerobă cu ADM1, aplicarea variantei FRNIT a condus la un controller cu caracteristica Bode din Figura 4.24, similar celui obținut după 80 pași de ajustare a parametrilor controllerului PID cu algoritmul FRIT, utilizat cu date culese în buclă închisă.

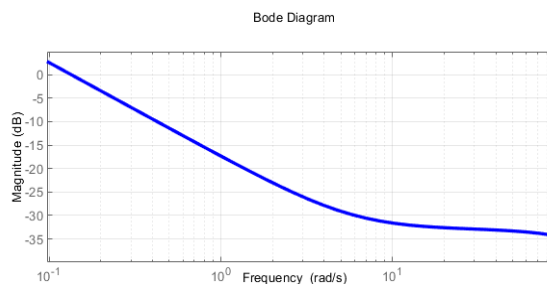


Fig. 4.19 Caracteristica Bode a controllerului obținut cu algoritmul FRNIT

4.4 Concluzii

Metoda VRFT a fost dezvoltată în ideea de a utiliza date experimentale prelevate de la instalații fizice. În cazul PDA, colectarea acestor date experimentale poate fi dificilă, mai ales ținând cont de caracterul neliniar al procesului. Acest caracter neliniar impune o abordare de tip gain scheduling, cu o ajustare a parametrilor în funcție de punctul de funcționare selectat. În acest caz, seturile de date trebuie colectate pentru a obține controllere locale, care implică operațiuni de lungă durată și costisitoare. În abordarea prezentată, datele sunt obținute pe baza unei *instalații virtuale* realizată prin simularea unui model matematic complex de digestie anaerobă, cum este ADM1. Spre deosebire de datele colectate de la instalația fizică, cele două variante de algoritmi VRFT prezentate funcționează cu date fără zgomot. Ipoteza care stă la baza algoritmilor prezentați este că atunci când se utilizează modelul ADM1 și versiunile sale îmbunătățite, aceste efecte nu duc la erori care să depășească practica inginerescă.

Ambele variante de algoritmi VRFT prezintă avantaje specifice care le recomandă pentru utilizare. Aspectul remarcabil al aplicării celor două metode VRFT la controlul PDA este faptul că ansamblul integrator-*DC* din structura controllerului are o caracteristică Bode neparametrică de tip PI, din care se obține imediat funcția de transfer a unui controller clasic PI echivalent. Prin urmare, aceste metode permit calcularea rapidă a controllerelor locale în cadrul unei structuri de tip gain scheduling a controlului PDA.

Abordarea IMC reprezintă o soluție extrem de atractivă pentru proiectarea bazată pe date a legii de control destinată procesului de digestie anaerobă. Cu toate acestea, adoptarea acestor metode necesită luarea în considerare a particularităților acestor procese. Așa cum s-a precizat, datorită neliniarităților procesului, legea de comandă trebuie să se bazeze pe strategia gain scheduling, iar proiectarea controllerelor locale se bazează pe proceduri care, conform rezultatelor prezentate, asigură o bună rezervă de stabilitate robustă. Un pas esențial al procedurii de proiectare bazată pe date a legii de control în structura IMC o reprezintă alegerea modelului de referință, care este implicat în calculul funcțiilor de transfer $\bar{Q}(z)$ și $\bar{P}(z)$.

În cazul metodei FRIT, acordarea controllerului PI pentru procesul de digestie anaerobă se realizează pe baza unui proces iterativ convergent și monoton, inclusiv la utilizarea datelor culese în buclă deschisă. Evident, este de preferat ca datele să fie obținute în buclă închisă. În ceea ce privește controllerul PID acordat prin metoda FRIT procesul iterativ de acordare cu date în buclă deschisă este divergent. La varianta uzuală a FRIT, cu date în buclă închisă, acordarea iterativă poate conduce la o lege de comandă de tip PI, iar prin rafinarea procesului de minimizare a criteriului se obține un controller a cărui caracteristică Bode este mai apropiată de cea a unui controller PI decât de a unui PID.

Referința fictivă poate fi utilizată și în cadrul unui procedeu non-iterativ de determinare a parametrilor. Rezultatele obținute cu FRNIT pentru obținerea parametrilor controllerului unui proces de digestie anaerobă coincid cu cele obținute de FRIT: controllerul PID obținut este mai apropiat de un controller PI decât PID.

Utilizarea FRNIT în cazul PDA, ca și în cazul altor bioprocese, are un avantaj față de VRFT. Este cunoscut că măsurarea mărimilor fizice reglate din bioprocese este dificilă și însoțită de un nivel ridicat de zgomot. Transferarea mărimii reglate $y(t)$ prin modelul de referință inversat amplifică acest zgomot. În cazul FRNIT se transferă comanda $u(t)$ prin modelul inversat al controllerului, operație mai simplă, deoarece nivelul de zgomot ce afectează comanda dată de controller, este redus.

Validarea metodelor bazate pe date pentru conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă utilizând o instalație virtuală care este implementată folosind modelul complex ADM1, împreună cu considerarea perturbațiilor ce afectează influența și zgomotul de măsură, justifică alegerea acestor metode de control în cazul procesului analizat.

Capitolul 5: IMPLEMENTAREA UNEI PLATFORME BAZATĂ PE PRINCIPUL HILS PENTRU TESTAREA SOLUȚIILOR DE CONTROL

În cadrul acestui capitol se prezintă proiectarea și implementarea unei platforme bazată pe principiul Hardware In The Loop Simulation (HILS) pentru testarea și validarea soluțiilor de control. Particularitatea acestei platforme o reprezintă capacitatea de a rula în timp real și faptul că se poate utiliza pentru orice tip de proces. De asemenea, aceasta mai cuprinde și o componentă de cloud computing ce oferă posibilitatea de stocare și prelucrare a semnalelor de interes achiziționate, permițând astfel prelucrări ale datelor din proces la un nivel ierarhic superior.

5.1 Structura și implementarea platformei de testare

În continuare, se prezintă o detaliere a componentelor utilizate pentru dezvoltarea platformei, dar și o prezentare a procesului de implementare a unei platforme de testare bazată pe principiul Hardware in the Loop Simulation, pentru testarea soluțiilor de control în timp real.

Deși, așa cum a fost prezentat anterior, există pe piață mai multe modele matematice care permit simularea procesului de digestie anaerobă, inclusiv modele complexe precum ADM1, care pot fi tratate ca *instalații virtuale*, totuși, pentru a face un pas înainte în direcția testării soluțiilor de control într-un mediu cât mai apropiat de cel real, în cadrul acestui capitol se propune implementarea unei platforme bazată pe principiul HILS pentru a simula și testa soluții de control pentru procesele de digestie anaerobă.

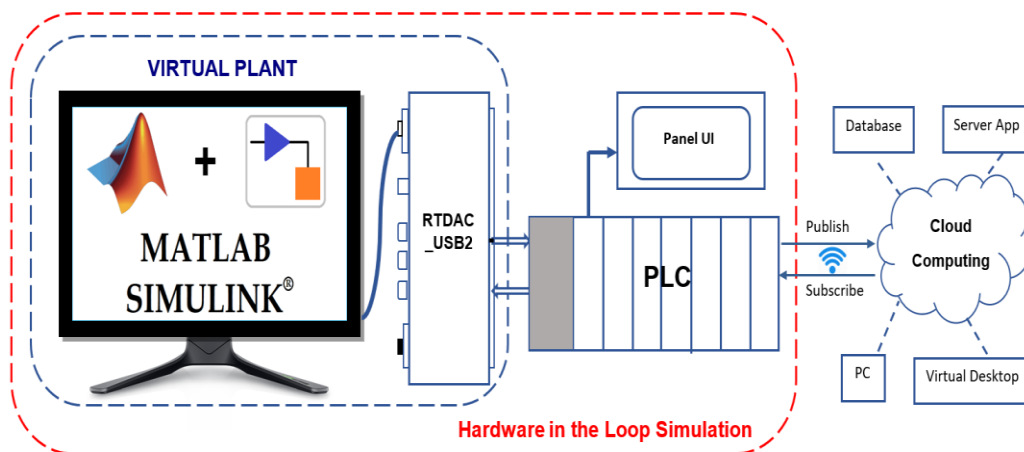


Fig. 5.1 Structura platformei de testare în timp real bazată pe HILS

Componentele principale ale platformei de testare, prezentate în Figura 5.1, sunt:

- ✓ Procesul de digestie anaerobă dat printr-un model matematic și implementat în Simulink. Astfel, procesul constituie partea simulată prin intermediul unui calculator care rulează sub Windows 10,
- ✓ O placă de achiziție Inteco care este instalată pe calculator,
- ✓ Un automat programabil (PLC) de tip Micro 850,
- ✓ Un ecran interactiv de tip Panel View 800,
- ✓ O componentă cloud computing cu rol de stocare și procesare a datelor.

În Figura 5.2 se prezintă automatul programabil utilizat împreună cu componentele adiționale.

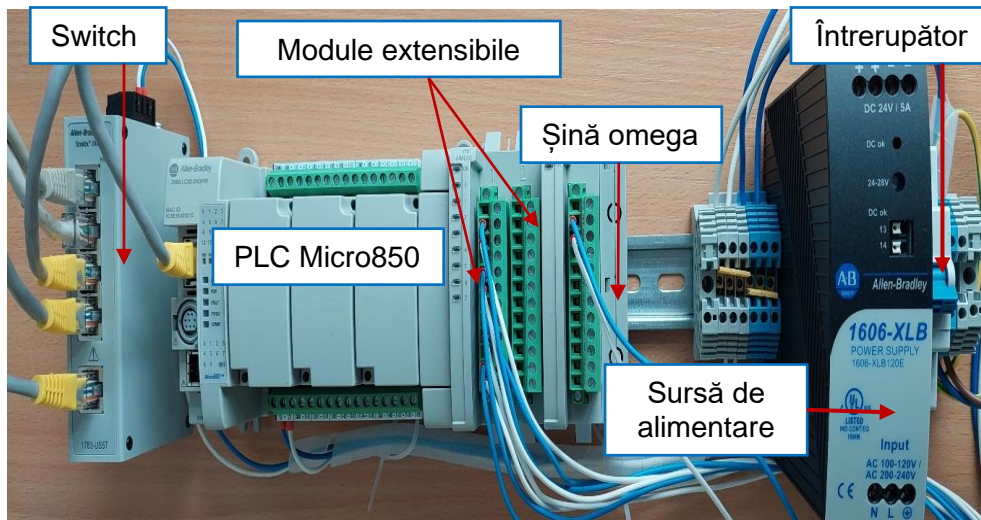


Fig. 5.2 PLC-ul Micro 850 utilizat pentru dezvoltarea platformei

Componenta Cloud Computing are rolul de a stoca și de a prelucra date transmise de PLC. Transmiterea datelor în cloud este realizată prin protocolul MQTT. În cazul nostru, PLC-ul reprezintă componenta care publică datele, printr-o bibliotecă MQTT (vezi figura 5.3).

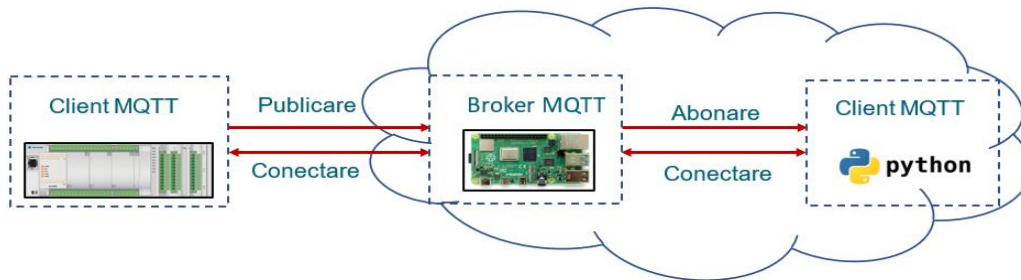


Fig. 5.3 Structura de transmitere a datelor în Cloud

Brokerul, la rândul său, are rolul de a direcționa mesajele către un alt client cu rol de ascultător, care le stochează și apoi le prelucrează. Atât brokerul, cât și clientul care ascultă, rulează într-o mașină virtuală bazată pe Linux ca sistem de operare și care se află în cloud. Mașina virtuală menționată are capacitatea de a rula 24 de ore pe zi și poate fi accesată de la distanță prin SSH sau folosind aplicații desktop (exemplu Putty). Pe aceasta, rulează o aplicație de tipul Producer-Consumer în limbajul de programare Python. Scopul aplicației are rolul de a prelua datele prin intermediul protocolului MQTT și de a le stoca într-o bază de date folosind SQLite. Ulterior, datele stocate pot fi interogate și exportate sub formă de fișiere la alegerea utilizatorului.

5.2 Descrierea aplicațiilor software dezvoltate și descrierea procesului de rulare a modelului în timp real

Configurarea PLC-ului și implementarea aplicațiilor atât pe PLC, cât și pe Panel View a fost realizată în software-ul Connected Components Workbench.

Prin urmare, pentru PLC au fost realizate 9 programe care asigură transferul datelor între cele trei părți componente ale platformei dezvoltate. Programele dezvoltate au rol de taskuri cu sarcini bine definite, care acționează sub controlul sistemului de operare al PLC-ului.

Pentru Panel View au fost realizate 5 meniuri care sunt destinate utilizatorilor și care conțin informații cu referire la procesul care se dorește a fi testat. Navigarea între ecrane se realizează prin intermediul butoanelor dispuse în partea de jos a meniului principal.

MAIN (vezi Figura 5.4) reprezintă pagina de start care conține informații referitoare la structura de testare.

CFG este un buton implicit care permite configurarea Panel View-ului. Acesta permite modificări indiferent dacă o aplicație rulează.

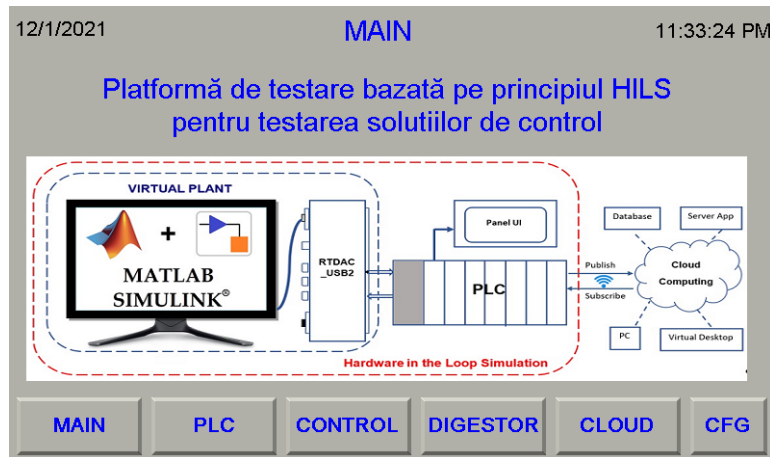


Fig. 5.4 Captură ecran MAIN

PLC permite vizualizarea semnalelor de intrare/ieșire, cât și posibilitatea modificării unei variabile.

CONTROL (vezi Figura 5.5) permite activarea/dezactivarea tipului de control implementat, cât și reprezentarea grafică a comenzii. Dacă aplicarea controllerului este dezactivată, comanda către proces poate fi setată manual de către utilizator.

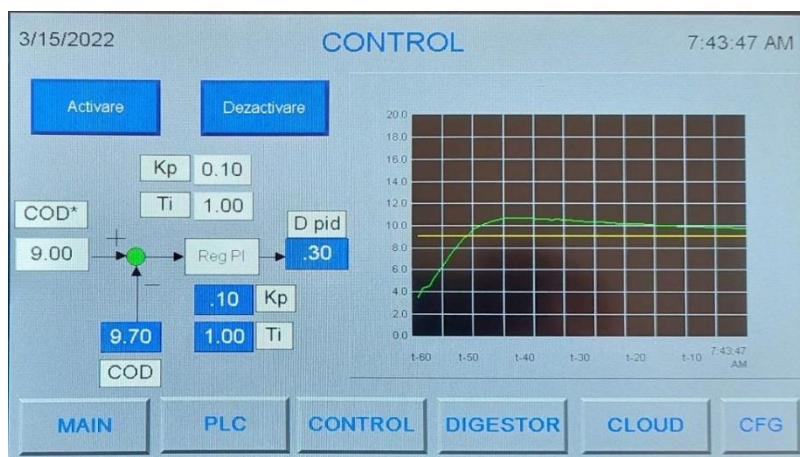


Fig. 5.5 Captură ecran CONTROL

DIGESTOR permite vizualizarea valorilor de interes.

CLOUD prezintă soluția pentru transmiterea datelor în cloud. Acest meniu prevede 4 butoane: dintre care 2 permit utilizatorului să conecteze/deconecteze PLC-ului și 2 sunt pentru a stabili momentul în care se dorește achiziția de date.

Aplicația de tip Producer-Consumer, dezvoltată în *Python* are ca scop preluarea datelor de la PLC prin intermediul unui broker MQTT și stocarea acestora într-o bază de date.

În Figura 5.6 este prezentată diagrama de secvențe conceptuală a procesului de stocare a datelor în Cloud. După cum se poate observa există trei entități principale: *PLC*, *brokerul MQTT* și *Clientul*.

Un aspect important de menționat este faptul că avem de a face cu problema de tip Producer-Consumer. Aceasta se regăsește atât între PLC și brokerul MQTT, cât și în interiorul Clientului. Rolul PLC-ului este de a publica datele către brokerul MQTT, iar Clientul la rândul său face subscribe la topicul *mico800/topic1* și ascultă mesajele primite pe topicul la care a făcut subscribe. În momentul în care un mesaj este primit, acesta este introdus într-un buffer FIFO.

La nivelul Clientului există un *Thread SQLWriter*, care monitorizează bufferul și în momentul în care apar mesajele introduce valorile în baza de date.

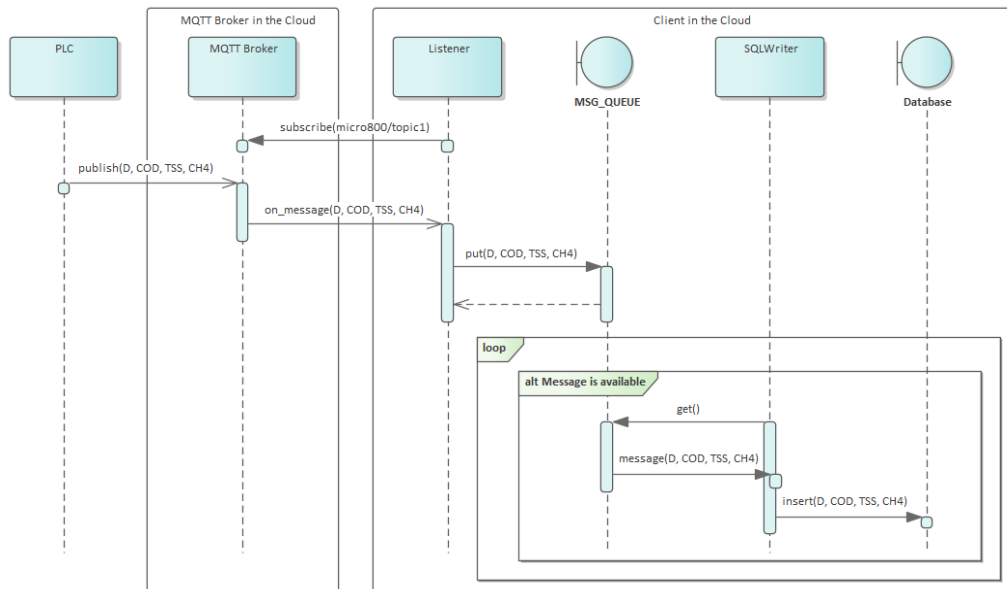


Fig. 5.6 Diagrama de secvențe conceptuală a procesului de stocare a datelor

5.3 Rezultate experimentale obținute cu platforma de testare

Pentru validarea platformei de testare au fost considerate atât componenta de cloud computing, cât și cea de testare a soluțiilor de control. Astfel, a fost implementat ca modul software al platformei de testare modelul matematic AM2 al procesului de digestie anaerobă (model descris în subcapitolul 2.2). Această alegere a fost determinată de necesitatea ca platforma în integralitatea ei să funcționeze în timp real. Prin urmare *instalația virtuală* din cadrul platformei de testare este reprezentată de implementarea în Simulink a modelului matematic neliniar AM2.

5.3.1 Estimarea concentrației influentului folosind un estimator neuronal

În formularea problemei de conducere automată a proceselor de digestie anaerobă pot fi urmărite două scopuri:

- Obținerea unui efluent de o calitate cât mai bună, caz în care se urmărește exclusiv impactul asupra mediului înconjurător;
- Obținerea unei cantități cât mai mari de biogaz, caz în care se urmărește exclusiv beneficiul economic.

Astfel, pot fi considerați doi termeni care exprimă două cerințe diferite, o soluție de compromis putând fi adoptarea unui criteriu de tipul [48]:

$$\max_D J = \max_D (q_{CH_4} + \gamma \cdot COD_{ef}) \quad (5.1)$$

unde COD_{ef} exprimă calitatea efluentului, iar γ este un parametru cu valoare negativă. Astfel, problema este formulată ca una de maximizare a producerii de biogaz, limitând, cu o pondere dată termenul γ , însă efectul negativ pe care efluentul îl produce este asupra mediului.

Pentru a studia comportarea acestui criteriu a fost considerată evoluția criteriului J în raport cu calitatea efluentului pentru diferite valori ale calității influentului, mărime perturbatoare. În Figura 5.8 este prezentată evoluția criteriului de optimizare J în raport cu valoarea de referință aplicată sistemului de control proiectat, COD_{sp} , pentru diferite valori ale calității influentului, COD_{in} .

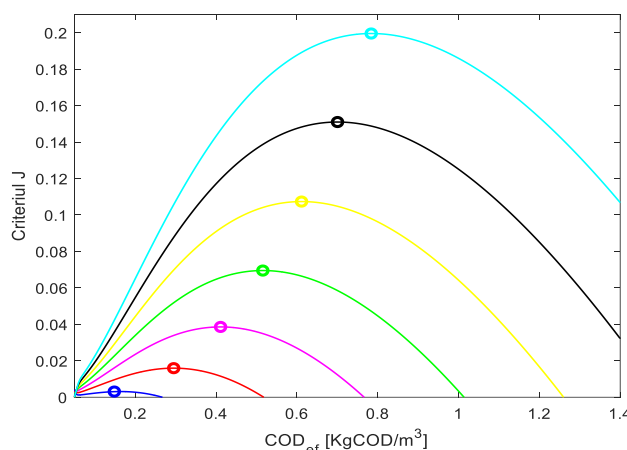


Fig. 5.7 Evoluția criteriului J în raport cu COD_{sp} pentru diferite valori ale COD_{in} și caracteristici de regim optim (albastru $COD_{in} = 0.965$; roșu $COD_{in} = 1.4475$; magenta $COD_{in} = 1.93$; verde $COD_{in} = 2.4125$; galben $COD_{in} = 2.895$; negru $COD_{in} = 3.3775$; turcoaz $COD_{in} = 3.86$)

Din figură putem observa că valoarea maximă a criteriului J depinde de COD_{in} . Caracteristicile de regim optim ale procesului sunt date de funcția $COD_{sp} = f(COD_{in})$, unde pentru COD_{sp} obținem valoarea maximă a criteriului J când calitatea influentului este COD_{in} . Astfel, pe baza modelului AM2 (descriș în capitolul 2) și având în vedere calitatea influentului, COD_{in} , putem determina în orice moment valoarea optimă a punctului de referință pentru bucla de control $Q_{ad} - COD$.

Astfel, având în vedere că punctul optim de funcționare depinde de concentrația influentului, devine de interes estimarea concentrației influentului la intrarea digesterului anaerob. O soluție este implementarea unui estimator neuronal pentru estimarea COD_{in} . Ținând cont de componenta de cloud computing dezvoltată în cadrul platformei, vom testa în continuare atât colectarea și

transmiterea datelor de la automatul programabil, cât și implementarea unui estimator neuronal în cadrul componentei cloud.

În cazul de față au fost analizate două abordări: antrenarea rețea neuronală cu date colectate în buclă deschisă, respectiv cu date colectate în buclă închisă. Pentru fiecare abordare s-a utilizat un model de rețea neuronală pentru a estima concentrația influentului, exprimată prin COD_{in} . Rețeaua neuronală propusă are o arhitectură multistrat alcătuită din două straturi neuronale, stratul ascuns având 10 neuroni.

Datele pentru instruirea și validarea rețelelor neuronale dezvoltate, sunt date colectate prin intermediul componentei cloud (date trimise de PLC în cloud), pe o perioadă de 3500 ore. Pentru procesul de instruire, datele au fost împărțite aleatoriu: 90% pentru procesul de instruire, 5% pentru testare și 5% pentru validare.

5.3.2 Estimator neuronal pentru concentrația influentului construit cu date colectate în buclă deschisă

Pentru antrenarea rețelei neuronale considerând cazul în care digesterul anaerob funcționează în buclă deschisă, s-a luat în considerare o evoluție a variabilei de comandă, Q_{ad} . Aici s-au analizat două cazuri: un caz în care s-au considerat ca variabile de intrare Q_{ad} , CH_4 și COD , respectiv Q_{ad} , CH_4 și TSS .

Așadar, rezultatele obținute pentru primul caz sunt ilustrate în Figura 5.8.

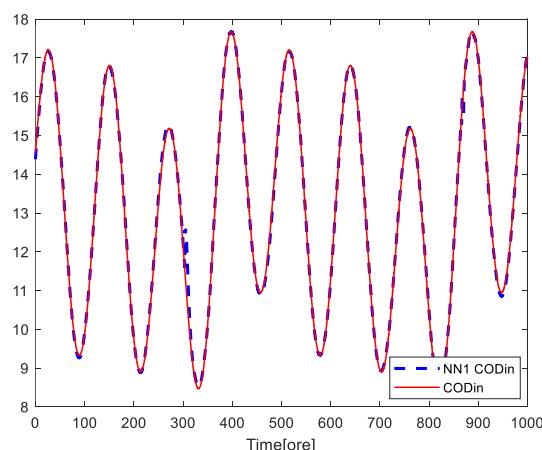


Fig. 5.8 Reprezentarea grafică a rețelei neuronale NN1 (Q_{ad} , CH_4 și COD) comparativ cu evoluția COD_{in}

După cum se poate observa ieșirea rețelei neuronale urmărește foarte bine ieșirea procesului, lucru care denotă capacitatea rețelei neuronale de a furniza rezultate foarte de bune privind estimarea concentrației de influent.

5.3.3 Estimator neuronal pentru concentrația influentului construit cu date colectate în buclă închisă

Pentru antrenarea rețelei neuronale considerând cazul în care digesterul anaerob funcționează în buclă închisă, s-a colectat un nou set de date. Și în cazul acesta s-a luat în considerare o evoluție a variabilei de comandă, Q_{ad} , rezultată din utilizarea unui regulator de tip

PI. Au fost analizate două cazuri pentru a estima cantitatea de COD_{in} : caz în care s-au considerat ca variabile de intrare Q_{ad} , CH_4 și COD , respectiv Q_{ad} , CH_4 și TSS . Astfel, rezultatele obținute pentru primul caz utilizării rețelei neuronale NN3 sunt ilustrate în Figura 5.9.

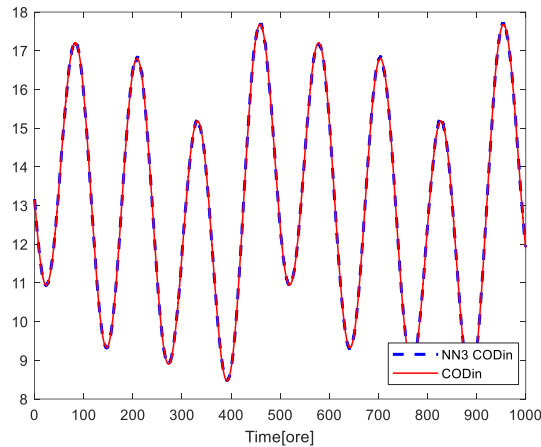


Fig. 5.9 Reprezentarea grafică a rețelei neuronale NN3 (Q_{ad} , CH_4 și COD) comparativ cu evoluția COD_{in}

După cum se poate observa ieșirea rețelei neuronale urmărește foarte bine concentrația de influent înregistrată din proces, rezultatul estimatorului analizat fiind astfel foarte bun.

5.3.4 Testarea unei soluții de control aplicate pe platforma de tip HILS

În continuare sunt prezentate rezultatele aplicării unui controller de tip PI implementat pentru validarea platformei de testare dezvoltată. Proiectarea controllerului de tip PI a luat în considerare caracterul nelinier al procesului, modelul nelinier a fost liniarizat în jurul unui punct de operare dat de variabila de comandă Q_{ad} . Prin urmare sistemul de control al procesului de digestie anaerobă funcționează în regim de stabilizare a COD_{out} la o variație de referințe impuse, când perturbația S_{1in} este constantă. Figura 5.10 ilustrează funcționarea sistemului de control atunci când referința privind concentrația efluentului COD_{out} , are o variație de tip treaptă urmată de un regim de stabilizare.

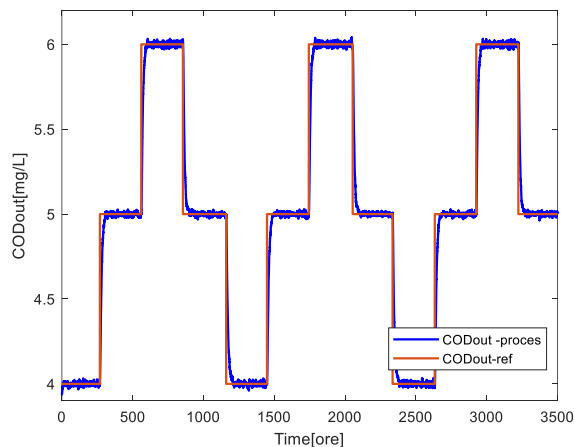


Fig. 5.10 Referința reprezentată cu roșu și mărimea ieșire reprezentată cu albastru

5.4 Concluzii

Platforma dezvoltată este eficientă deoarece: permite testarea amănunțită în situații extreme, permite repetabilitatea testelor, reduce posibilitatea unor situații dezastruoase și, nu în ultimul rând, reduce timpul și costurile în comparație cu experimentele efectuate pe un proces real. Componentă cloud computing încorporată și-a dovedit utilitatea practică deoarece are capacitatea de a stoca o cantitate semnificativă de date și, în același timp, permite sincronizarea datelor, date care pot fi accesate de utilizator prin intermediul mai multor dispozitive remote prin intermediul internetului.

A fost testată atât componenta de control, implementată în cadrul automatului programabil, cât și componenta cloud, prin intermediul unei rețele neuronale utilizată pentru estimarea concentrației influentului. Rezultatele prezentate arată performanțele foarte bune ale platformei de testare bazată pe principiul HILS și certifică astfel demersul parcurs.

Capitolul 6: CONCLUZII

În cadrul tezei de doctorat intitulată „CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA AUTOMATĂ A PROCESELOR DE DIGESTIE ANAEROBĂ” a fost abordată problematica adoptării unor metode avansate de control în cazul unei categorii importante de procese biotehnologice. Astfel, s-a pornit de la analiza stadiului actual care a reliefat că s-au dezvoltat două tipuri de aplicații de conducere automată: structuri clasice sau bazate pe inteligență artificială, care au fost validate pe procesul fizic sau prin simulare numerică pe un model matematic complex de tip ADM1, și structuri de control avansat, care au fost validate pe modele matematice simplificate. Totuși, având în vedere „distanța” existentă între modelele matematice simple și modelul matematic complex ADM1, se justifică demersul asumat prin teza de doctorat de a găsi metode avansate de control care să poată fi utilizate pentru problema de conducere automată a procesului de digestie anaerobă.

6.1 Contribuțiile originale

În cadrul tezei pot fi considerate următoarele contribuții originale:

Capitolul 2:

- Prezentarea principalelor modele matematice existente în cazul proceselor de digestie anaerobă, modelul complex ADM1 și modelul simplificat AM2, precum și a compatibilității existente între aceste modele.

Capitolul 3:

- Studiul și dezvoltarea unei structuri de control bazată pe metoda Model Free Control pentru procesele de digestie anaerobă;

- Pornind de la observația că în aplicațiile reale regimul de sarcină (concentrația influentului) al digesterului anaerob este variabil în timp, este propusă o metodă de acordare a parametrilor controllerului pentru a asigura stabilitatea sistemului într-o gamă largă de regimuri de funcționare;

- Validarea prin simulare numerică a structurii de control bazată pe metoda Model Free Control folosind modelul matematic complex ADM1 ca instalație virtuală.

Capitolul 4:

- Studiul și dezvoltarea unei structuri de control bazată pe metoda Virtual Reference Feedback Tuning pentru procesele de digestie anaerobă, considerând atât varianta uzuală a metodei, cât și o variantă simplificată a acesteia;

- Validarea prin simulare numerică a structurii de control bazată pe metoda Virtual Reference Feedback Tuning folosind modelul matematic complex ADM1 ca instalație virtuală;

- Studiul și dezvoltarea unei structuri de control bazată pe metoda Internal Model Control pentru procesele de digestie anaerobă;

- Validarea prin simulare numerică a structurii de control bazată pe metoda Internal Model Control folosind modelul matematic complex ADM1 ca instalație virtuală;

- Studiul și dezvoltarea unei structuri de control bazată pe metoda Fictitious Reference Iterative Tuning pentru procesele de digestie anaerobă;

- Validarea prin simulare numerică a structurii de control bazată pe metoda Fictitious Reference Iterative Tuning folosind modelul matematic complex ADM1 ca instalație virtuală.

Capitolul 5:

- Proiectarea și dezvoltarea unei platforme bazate pe principiul Hardware In the Loop Simulation pentru testarea soluțiilor de control implementabile pe un automat programabil;

- Dezvoltarea unei componente de Cloud Computing pentru dezvoltarea de aplicații la nivelul ierarhic superior al structurii de conducere automată și conectarea acesteia cu platforma bazată pe principiul HILS;

- Testarea platformei bazate pe principiul HILS și a componentei de Cloud Computing pentru procesul de digestie anaerobă.

6.2 Diseminarea rezultatelor obținute

O parte din cercetările expuse în cadrul tezei de doctorat au fost valorificate prin publicarea de articole științifice:

- Articole în reviste cotate ISI:

1.Larisa Condrachi, Ramon Vilanova, Montse Meneses, Marian Barbu, Anaerobic Digestion Process Control Using a Data-Driven Internal Model Control Method, *Energies* 2021, Vol 14(20), 6746, (Factor de impact calculat de către ISI pentru anul 2021: 3.004).

- Articole prezentate în conferințe internaționale indexate:

2.Larisa Condrachi, Ramon Vilanova, Marian Barbu, Data-Driven Internal Model Control of an Anaerobic Digestion Process, 25th International Conference System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 20-23 October 2021, Iași, România (Articol indexat SCOPUS).

3.Irina Luca, Larisa Condrachi, Laurențiu Luca, Ramon Vilanova, Marian Barbu, Testing Platform for Real-time Controllers Based on Hardware In the Loop Simulation, 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 7-10 September 2021, Vasteras, Sweden (Articol indexat ISI Proceedings).

4.Larisa Condrachi, Emil Ceangă, Ramon Vilanova, Cezar Bichescu, Marian Barbu, The Anaerobic Digestion Process Control Using Data Driven Methods, 23th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 9-11 October 2019, Sinaia, România (Articol indexat ISI Proceedings).

5.Larisa Condrachi, Ramon Vilanova, Emil Ceangă, Marian Barbu, The Tuning of a Model-Free Controller for an Anaerobic Digestion Process using ADM1 as Virtual Plant, 7th IFAC Symposium on System Structure and Control SSSC, 9-11 September 2019, Sinaia, România, Vol 52, Issue 17, Pages 99-104 (Articol ISI Proceedings).

6.Larisa Condrachi, Emil Ceangă, Lucian Puiu Georgescu, Gabriel Murariu, Ramon Vilanova, Marian Barbu, Model-Based Optimization of an Anaerobic Digestion Process, 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) 10-12 October 2018, Sinaia, România (Articol indexat ISI Proceedings).

7.Larisa Condrachi, Marian Barbu, Anaerobic Digestion Processes Controller Tuning Using Fictitious Reference Iterative Method, 13Th IFAC Symposium on Dynamic and Control of Process System, including Biosystems (DYCOPS 2022) 14-17 June 2022, Republic of Korea (Articolul a fost acceptat pentru a fi prezentat în cadrul simpozionului).

Articole prezentate în conferințe internaționale:

1.Larisa Condrachi, Marian Barbu, Fictitious reference iterative tuning method applied for an anaerobic digestion process controller, 11th International Conference on Environmental Engineering and Management, 8-10 September 2021, Munttenz, Switzerland.

6.3 Direcții viitoare de cercetare

Prezentele cercetări realizate în cadrul acestei teze de doctorat pot fi continuate astfel:

- Utilizarea tehnicilor de inteligență artificială pentru dezvoltarea de senzori software și structuri avansate de conducerea automată a proceselor de digestie anaerobă;
- Extinderea platformei de testare bazată pe principiul HILS prin includerea de noi elemente de validare și de asemenea se poate lua în considerare problematicile care asigură siguranța cibernetică de conectare a elementelor și siguranța cibernetică de transmitere a datelor în cloud.

BIBLIOGRAFIE

- [1] I. Santín, M. Barbu, C. Pedret, and R. Vilanova, "Control strategies for nitrous oxide emissions reduction on wastewater treatment plants operation," *Water Res.*, vol. 125, pp. 466–477, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.WATRES.2017.08.056.
- [2] Y. Feng, J. Behrendt, C. Wendland, and R. Otterpohl, "Parameter analysis of the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 for the anaerobic digestion of blackwater with kitchen refuse," *Water Sci. Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 139–147, Aug. 2006, doi: 10.2166/WST.2006.535.
- [3] J. Jimenez *et al.*, "Instrumentation and control of anaerobic digestion processes: a review and some research challenges," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 14, no. 4, pp. 615–648, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9382-6.
- [4] W. Wukovits and W. Schnitzhofer, "Fuels - Hydrogen Production | Biomass: Fermentation," *Encycl. Electrochem. Power Sources*, no. 2003, pp. 268–275, 2009, doi: 10.1016/B978-044452745-5.00312-9.
- [5] K. F. Adekunle and J. A. Okolie, "A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion," *Adv. Biosci. Biotechnol.*, vol. 06, no. 03, pp. 205–212, 2015, doi: 10.4236/abb.2015.63020.
- [6] "Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1) - IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes - Google Cărți." https://books.google.ro/books/about/Anaerobic_Digestion_Model_No_1_ADM1.html?id=dIZ7BA5EFBgC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jul. 27, 2021).
- [7] M. Barbu, E. Ceangă, R. Vilanova, S. Caraman, and G. Ifrim, "Extremum-Seeking Control Approach Based on the Influent Variability for Anaerobic Digestion Optimization," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 12623–12628, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2029.
- [8] L. Condrachi, R. Vilanova, E. Ceanga, and M. Barbu, "The tuning of a model-free controller for an anaerobic digestion process using ADM1 as virtual plant," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 17, pp. 99–104, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.034.
- [9] D. J. Batstone *et al.*, "The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)," *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 65–73, May 2002, doi: 10.2166/WST.2002.0292.
- [10] O. Bernard, Z. Hadj-Sadok, D. Dochain, A. Genovesi, and J. P. Steyer, "Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 75, no. 4, pp. 424–438, 2001, doi: 10.1002/bit.10036.
- [11] J. F. Andrews, "Dynamic models and control strategies for wastewater treatment processes," *Water Res.*, vol. 8, no. 5, pp. 261–289, May 1974, doi: 10.1016/0043-1354(74)90090-6.
- [12] K. Boe, J. P. Steyer, and I. Angelidaki, "Monitoring and control of the biogas process based on propionate concentration using online VFA measurement," *Water Sci. Technol.*, vol. 57, no. 5, pp. 661–666, 2008, doi: 10.2166/wst.2008.046.
- [13] C. Garcia, F. Molina, E. Roca, and J. M. Lema, "Fuzzy-based control of an anaerobic reactor treating wastewaters containing ethanol and carbohydrates," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, no. 21, pp. 6707–6715, 2007, doi: 10.1021/ie0617001.
- [14] I. Simeonov and I. Queinnec, "Linearizing control of the anaerobic digestion with addition of acetate (control of the anaerobic digestion)," *Control Eng. Pract.*, vol. 14, no. 7, pp. 799–810, 2006, doi: 10.1016/j.conengprac.2005.04.011.

- [15] F. Angulo, G. Olivar, and A. Rincón, "Control of an anaerobic upflow fixed bed bioreactor," *2007 Mediterr. Conf. Control Autom. MED*, pp. 0–5, 2007, doi: 10.1109/MED.2007.4433758.
- [16] E. Petre, D. Selișteanu, and D. Șendrescu, "Adaptive and robust-adaptive control strategies for anaerobic wastewater treatment bioprocesses," *Chem. Eng. J.*, vol. 217, pp. 363–378, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2012.11.129.
- [17] E. Petre, D. Selișteanu, D. Șendrescu, M. Barbu, and S. Caraman, "An adaptive control structure for an anaerobic digestion process with unknown inputs," *2017 18th Int. Carpathian Control Conf. ICC 2017*, pp. 58–63, Jul. 2017, doi: 10.1109/CARPATIANCC.2017.7970371.
- [18] E. Petre and D. Selisteanu, "Adaptive and robust-adaptive control schemes for an anaerobic bioprocess with biogas production," *2013 17th Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput. ICSTCC 2013; Jt. Conf. SINTES 2013, SACCS 2013, SIMSIS 2013 - Proc.*, pp. 404–409, 2013, doi: 10.1109/ICSTCC.2013.6688992.
- [19] S. Caraman, G. Ifrim, E. Ceanga, M. Barbu, M. Titica, and R. E. Precup, "Extremum seeking control for an anaerobic digestion process," *2015 19th Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput. ICSTCC 2015 - Jt. Conf. SINTES 19, SACCS 15, SIMSIS 19*, pp. 243–248, Nov. 2015, doi: 10.1109/ICSTCC.2015.7321300.
- [20] S. Mu, Y. Zeng, and P. Wu, "Multivariable control of anaerobic reactor by using external recirculation and bypass ratio," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2008, doi: 10.1002/jctb.1888.
- [21] C. A. Aceves-Lara, E. Latrille, and J. P. Steyer, "Optimal control of hydrogen production in a continuous anaerobic fermentation bioreactor," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 19, pp. 10710–10718, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.110.
- [22] J. Rodríguez, G. Ruiz, F. Molina, E. Roca, and J. M. Lema, "A hydrogen-based variable-gain controller for anaerobic digestion processes," *Water Sci. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 57–62, 2006, doi: 10.2166/wst.2006.486.
- [23] D. Selișteanu, "Conducerea Automată a Bioreactorului Enzimatic," Universitatea din Craiova, 1999.
- [24] F. Blumensaat and J. Keller, "Modelling of two-stage anaerobic digestion using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)," *Water Res.*, 2005, doi: 10.1016/j.watres.2004.07.024.
- [25] R. științific și tehnic.-E. I. Biocon, "RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC – ETAPA I , PROIECT Nr . 269 / 2014 – BIOCON," Galați, 2014. [Online]. Available: http://www.biocon.ugal.ro/documentation/RST_ETAPA1_269_2014.pdf.
- [26] O. Bernard, Z. Hadj-Sadok, D. Dochain, A. Genovesi, and J. P. Steyer, "Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process," *Biotechnol. Bioeng.*, 2001, doi: 10.1002/bit.10036.
- [27] G. Giovannini, M. Sbarciog, J. P. Steyer, R. Chamy, and A. Vande Wouwer, "On the derivation of a simple dynamic model of anaerobic digestion including the evolution of hydrogen," *Water Res.*, vol. 134, pp. 209–225, 2018, doi: 10.1016/j.watres.2018.01.036.
- [28] M. Fliess and C. Join, "Model-free control and intelligent PID controllers: Towards a possible trivialization of nonlinear control?," 2009, doi: 10.3182/20090706-3-FR-2004.0443.
- [29] M. Fliess and C. Join, "Model-free control," *Int. J. Control*, 2013, doi: 10.1080/00207179.2013.810345.
- [30] Y. Xu, E. Bideaux, and D. Thomasset, "Robustness Study on the Model-Free Control and the Control with Restricted Model of a High Performance Electro-Hydraulic System," 2013, doi: 10.3384/ecp1392a52.

- [31] F. Lafont, J. F. Balmat, N. Pessel, and M. Fliess, "A model-free control strategy for an experimental greenhouse with an application to fault accommodation," *Comput. Electron. Agric.*, 2015, doi: 10.1016/j.compag.2014.11.008.
- [32] S. Tebbani, M. Titica, C. Join, M. Fliess, and D. Dumur, "Model-based versus model-free control designs for improving microalgae growth in a closed photobioreactor: Some preliminary comparisons," 2016, doi: 10.1109/MED.2016.7535870.
- [33] Z. Xiao, "Model-free motion control of positioning stage," MS Thesis Delft University of Technology., 2016.
- [34] M. C. Campi, A. Lecchini, and S. M. Savaresi, "Virtual reference feedback tuning: A direct method for the design of feedback controllers," *Automatica*, 2002, doi: 10.1016/S0005-1098(02)00032-8.
- [35] D. Carp, M. Barbu, E. Ceanga, and R. Vilanova, "Process control engineering considerations on the application of Virtual Reference Feedback Tuning method," 2013, doi: 10.1109/ICSTCC.2013.6688941.
- [36] C. E. Garcia and M. Morari, "Internal Model Control. 1. a Unifying Review and Some New Results," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 21, no. 2, pp. 308–323, 1982, doi: 10.1021/i200017a016.
- [37] M. Morari, "Internal Model Control - Theory and Applications.," *IFAC Proc. Ser.*, vol. 16, no. 21, pp. 1–18, 1984, doi: 10.1016/S1474-6670(17)64183-1.
- [38] D. E. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad, "Internal Model Control: Pid Controller Design," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 25, no. 1, 1986, doi: 10.1021/i200032a041.
- [39] Manfred Morari, Evangelhos Zafiriou, *Robust Process Control*. New Jersey: Prentice-Hall International, 1989.
- [40] J. D. Rojas and R. Vilanova, "Data-driven based IMC control," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 8, no. 3 A, pp. 1557–1574, 2012.
- [41] Jose David Rojas, "Extensions and Applications of Virtual Reference Feedback Tuning," Universitat Autònoma de Barcelona, 2011.
- [42] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*. 1999.
- [43] S. Soma, O. Kaneko, and T. Fujii, "A new method of controller parameter tuning based on input-output data —Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT)—," in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2004, vol. 37, no. 12, doi: 10.1016/S1474-6670(17)31566-5.
- [44] S. Soma, O. Kaneko, and T. Fukii, "A New Approach to Parameter Tuning of Controllers by Using One-Shot Experimental Data-A Proposal of Fictitious Reference Iterative Tuning," *Trans. Inst. Syst. Control Inf. Eng.*, vol. 17, no. 12, pp. 528–536, 2004, doi: 10.5687/iscie.17.528.
- [45] O. Kaneko, S. Soma, and T. Fujii, "A fictitious reference iterative tuning (FRIT) in the two-degree of freedom control scheme and its application to closed loop system identification," in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2005, vol. 16, doi: 10.3182/20050703-6-cz-1902.00105.
- [46] J. D. R. Fernández, "Extensions and applications of the Virtual Reference Feedback Tuning," 2011.
- [47] R. Vilanova, "A Glimpse on Data Driven Control Systems Engineering Group," Universitat Autònoma Barcelona, 2012.
- [48] L. Condrachi, E. Ceanga, L. P. Georgescu, G. Murariu, R. Vilanova, and M. Barbu, "Model-based optimization of an anaerobic digestion process," 2018, doi: 10.1109/ICSTCC.2018.8540673.