

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

TEZĂ DE DOCTORAT

**Cercetări privind utilizarea
algoritmilor evolutivi în reglarea
automată avansată a proceselor de
fracționare**

AUTOR:

Ing. Marius Olteanu

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof.Dr.Ing. Nicolae Paraschiv

Cuvinte cheie: procese de separare, algoritmi genetici, algoritmi evolutivi, programare genetică, modele NARMAX, identificare

REZUMAT

Tehnicile de Inteligență Artificială constituie un domeniu relativ nou de cercetare, încurajat de puternica dezvoltare a tehnicii de calcul din ultimele decenii. Fundamentele teoretice ale Inteligenței Artificiale (IA) reprezintă un domeniu activ în care apar idei și modele noi, aplicațiile practice ale tehnicilor IA fiind încurajatoare.

Tematica abordată în această teză de doctorat se înscrie în direcția investigării posibilității de aplicare a tehnicilor evolutive ale Inteligenței Artificiale în reglarea avansată a proceselor. Fiind un domeniu mai recent de cercetare, tehnicile evolutive au un impact mai redus în metodele de abordare a reglării avansate, unde predomină tehnicile clasice, bine fundamentate teoretic.

Teza de doctorat are ca obiective:

- investigarea structurilor convenționale și avansate de automatizare pentru procesele de fracționare din perspectiva aplicării tehnicilor evolutive din Inteligența Artificială
- realizarea unui model matematic de simulare riguros pentru procesul de separare al amestecului propan-propenă, ținând cont de condițiile întâlnite în industrie
- proiectarea și realizarea unui simulator bazat pe modelul dezvoltat
- propunerea unui sistem de reglare avansat bazat pe modele neliniare de tip NARMAX determinate cu ajutorul algoritmilor genetici
- investigarea performanțelor unui sistem de reglare după perturbație bazat pe modelul Fenske-Underwood-Gilliland pentru care a fost dedusă o corelație utilizând tehnica programării genetice

Structura tezei de doctorat:

Introducere - prezintă problematica abordată în prezenta teză de doctorat, obiectivele propuse și oportunitatea alegerii temei

Capitolul 1 - prezintă fundamentele procesului de fracționare, având în vedere fracționarea binară, structurile convenționale de reglare și succint tehnici noi de reglare bazate pe model.

Capitolul 2 - fundamentează tehnicile evolutive din punctul de vedere al automatizării proceselor și totodată un studiu bibliografic cuprinzător pentru aplicațiile industriale ale acestor tehnici.

Capitolul 3 - prezintă contribuțiile autorului la caracterizarea și modelarea procesului de fracționare a amestecului propan-propenă și descrierea simulatorului realizat pentru a implementa modelul matematic dinamic dezvoltat.

Capitolul 4 - dezvoltă o metodă de identificare a procesului de fracționare bazat pe modele neliniare de tip NARMAX utilizând algoritmi genetici, este propusă o schemă de reglare avansată care utilizează predicția ieșirii procesului identificat și de asemenea este implementată o structură de reglare după perturbație având la bază o corelație dezvoltată folosind tehnica programării genetice.

Capitolul 5 - concluzii generale și direcții viitoare de cercetare

Conținut

Mulțumiri	i
Cuprins	ii
Lista figurilor	v
Lista tabelor	ix
Introducere	1
1 Stadiul actual al conducerii automate a proceselor de fracționare	3
1.1 Fundamente ale proceselor de fracționare	4
1.1.1 Noțiuni fundamentale pentru echilibrul lichid-vapori	6
1.1.2 Coloana de fracționare binară	13
1.2 Obiectivele conducerii proceselor de fracționare și comenzi disponibile . .	16
1.2.1 Stabilirea gradelor de libertate pentru coloana de fracționare	23
1.3 Structuri convenționale de reglare a coloanelor de fracționare	25
1.3.1 Reglarea concentrației x_D a componentului ușor în produsul de vârf	25
1.3.2 Reglarea presiunii în coloana de fracționare	28
1.4 Structuri de reglare automată avansată	32
1.4.1 Reglarea după perturbație	32
1.4.2 Reglarea bazată pe model	34
1.5 Concluzii parțiale	36
2 Caracterizarea algoritmilor evolutivi în calitate de suport al automa-	37
tizării avansate	
2.1 Algoritmi bazați pe paradigma evolutivă	38
2.2 Fundamente ale algoritmilor genetici	40
2.2.1 Algoritmul genetic fundamental sau canonic	40
2.2.2 Fundamente teoretice - ipoteza schemelor	41
2.3 Codificări utilizate în algoritmii genetici.	
Operatori genetici	45
2.3.1 Operatori genetici - selecția	46
2.3.2 Operatori genetici - încrucișarea (recombinarea)	50

2.3.3	Operatori genetici - mutația	54
2.4	Aplicații ale algoritmilor genetici în reglarea proceselor	55
2.4.1	Aplicații "off-line"	56
2.4.2	Aplicații "on-line"	58
2.5	Concluzii parțiale	60
3	Contribuții la modelarea și simularea procesului de separare propan-propenă	61
3.1	Caracterizarea procesului de separare propan - propenă	62
3.1.1	Caracterizarea procesului de separare propan-propenă din perspectivă tehnologică	62
3.1.2	Caracterizarea procesului de separare propan-propenă din perspectiva sistemică	64
3.2	Contribuții la modelarea echilibrului lichid-vapori	67
3.2.1	Metodă de interpolare cu polinoame Lagrange pentru o funcție de două variabile	67
3.2.2	Implementarea metodei de interpolare	71
3.3	Modelarea transferului de masă și căldură	76
3.4	Realizarea simulatorului	80
3.4.1	Modelarea unui taler teoretic	83
3.4.2	Modelarea reținerii	84
3.4.3	Modelarea condensatorului și vasului de reflux	89
3.4.4	Modelarea elementelor de execuție	92
3.4.5	Modelarea reguletoarelor de tip PID	96
3.5	Rezultate ale simulării	98
3.6	Concluzii parțiale	110
4	Contribuții la reglarea automată avansată bazată pe algoritmi genetici	111
4.1	Modele de tip NARMAX folosite în identificarea proceselor	112
4.2	Dezvoltarea algoritmului genetic pentru optimizarea modelului NARMAX	114
4.2.1	Codificarea soluțiilor pentru modelul NARMAX și operatorii genetici utilizați	114
4.2.2	Determinarea modelului NARMAX folosind algoritmi genetici	120
4.2.3	Codificarea algoritmului genetic pentru determinarea modelelor de tip NARMAX	131
4.3	Structură de reglare combinată PID și NARMAX	135
4.3.1	Acordarea regulatorului PID pentru concentrația x_D	135
4.3.2	Determinarea modelului NARMAX pentru corecția comenzii regulatorului PID	136
4.4	Structură de reglare după perturbație pentru coloana propan - propenă	138
4.4.1	Corelația Gilliland bazată pe tehnica programării genetice	138
4.4.2	Modelul de conducere Fenske-Underwood-Gilliland pentru coloana C_3-C_3'	142
4.5	Concluzii parțiale	147

5 Concluzii generale, sinteză a contribuțiilor originale și direcții de cercetare	150
5.1 Concluzii generale	150
5.2 Sinteza a contribuțiilor originale	154
5.3 Direcții de cercetare viitoare	155
Lucrări publicate de autor	156
Bibliografie	159
Anexa 1. Date izoterme propan-propenă	166
Anexa 2. Rutinele Fortran intlagr și equil_data	169
Anexa 3. Rutina Fortran equil_data_xT	172
Anexa 4. Rutine Fortran pentru simulator	174
Anexa 5. Rutine Fortran pentru integrare numerică	184
Anexa 6. Codificarea algoritmilor genetici pentru determinarea modelelor NARMAX	186

Lista figurilor

1.1	Curba punctelor de fierbere și curba punctelor de rouă pentru amestecul propan-propilenă la presiunea $P=20$ atm	10
1.2	Curba y-x pentru amestecurile propan-propenă și etan-propan	11
1.3	Mecanismul procesului de fracționare în trepte	14
1.4	Coloană de fracționare cu talere cu clopoței	15
1.5	Dependența prețului produsului și cheltuielile de operare în funcție de impuritate [1]; PV – preț de vânzare, CO – cheltuieli de operare, IM – impuritatea maximă admisă pentru calitatea A, PV_A , PV_B – prețurile de vânzare pentru calitatea A și B, BM – beneficiul maxim	17
1.6	Elementele unei coloane de fracționare	19
1.7	Mărimile de execuție și mărimile reglate la o coloană de fracționare binară	20
1.8	Proces multivariabil liniar cu două intrări și două ieșiri	20
1.9	Alocarea mărimilor de execuție - mărimilor reglate pentru o structură de reglare DV	22
1.10	Divizarea coloanei de fracționare în blocuri	23
1.11	Reglarea concentrației la vârf - structura A	26
1.12	Reglarea concentrației la vârf - structura B	27
1.13	Reglarea concentrației la vârf - structura C	28
1.14	Structura de reglare a compozițiilor SV [1]	29
1.15	Structura de reglare a compozițiilor SV/B [1]	30
1.16	Reglarea presiunii cu ajutorul debitului agentului de răcire	30
1.17	Reglarea presiunii cu ajutorul condensatorului ”îmecat”	31
1.18	Reglarea presiunii prin ocolirea condensatorului	31
1.19	Reglarea după perturbație utilizând comenzile L și B	33
1.20	Structura unui regulator predictiv după model	34
2.1	Încrucșarea în cazul a două scheme având lungimi caracteristice diferite	44
2.2	Reprezentarea binară	46
2.3	Algoritmul ruletei - divizarea unui disc proporțională cu adecvarea membrilor populației	48
2.4	Algoritmul ruletei	48
2.5	Selecția stochastică universală	49
2.6	Încrucșarea cu un singur punct de tăietură	51
2.7	Încrucșarea cu două puncte de tăietură	52
2.8	Încrucșarea uniformă	52

2.9	Încrucișarea discretă	53
2.10	Încrucișarea continuă	53
2.11	Mutația binară	54
2.12	Schema bloc a unui sistem de reglare GAGPC	59
3.1	Caracterizarea sistemică a procesului de separare C_3-C_3' din perspectiva proiectării (primul nivel de detaliere)	64
3.2	Caracterizarea sistemică a procesului de separare C_3-C_3' din perspectiva proiectării (al doilea nivel de detaliere): x_D, x_B, x_F - concentrații C în distilat, reziduu și alimentare; F - debitul alimentării; α - volatilitate relativă C față de C; HC - înălțime coloană; DC - diametru coloană; PTA - poziție taler alimentare; L - debit de reflux; H_R, H_B - nivelul în vasul de reflux, respectiv baza coloanei; P - Presiune; D,B - debite de distilat și reziduu; Q_{ati} - agent termic de încălzire; Q_{atr} - debit agent termic de răcire	65
3.3	Caracterizarea sistemică a procesului de separare C_3-C_3' din perspectiva conducerii	66
3.4	Polinomul generic $l_k(x)$	68
3.5	Date de echilibru experimentale <i>izoterme</i> pentru amestecul propan-propenă	69
3.6	Caracterizarea intrare-ieșire a rutinei <i>intlgr</i> : m - număr de puncte cu date cunoscute; α, β - vectorii datelor cunoscute; α_i - punctul în care se dorește interpolarea; β_i - valoare interpolată	71
3.7	Caracterizarea intrare-ieșire a rutinei <i>equil_data</i> x_c - concentrația curentă a propenei în faza lichid; P_c - presiunea curentă; y_c - valoarea interpolată pentru concentrația propenei în faza vapori; T_c - valoarea interpolată pentru temperatura curentă	72
3.8	Fluxul informațional asociat rutinei 'equil_data' pentru calculul echilibrului lichid-vapori x_c -concentrația curentă în faza lichid; P_c -presiune curentă; y_c -concentrația curentă în faza vapori; T_c -temperatura curentă; A11, A12, A21, A22 indică apelare	72
3.9	Caracterizarea intrare-ieșire a rutinei de test <i>equil_data_xT</i> : x_c - concentrația curentă a propenei în faza lichid; T_c - temperatura curentă la care sunt disponibile datele; P_c - presiunea curentă a amestecului; y_c - concentrația propenei în faza vapori	74
3.10	Treaptă de echilibru pentru o coloană de distilare	77
3.11	Schema de interacțiune cu simulatorul dedicat procesului de separare C_3-C_3'	81
3.12	Interfața grafică Java pentru vizualizarea grafică a mărimilor din simulator	82
3.13	Rutina "stage" - schemă bloc	83
3.14	Rutina "stgf" - schemă bloc	84
3.15	Refierbător de tip Kettle	85
3.16	Fluxurile de energie asociate refierbătorului T_t -temperatura tuburilor; T_c -temperatura condensatului; T_L -temperatura lichidului; Q_t -fluxul termic de la fluidul din manta la peretele tuburilor; Q_L -fluxul termic de la tuburi la lichidul din refierbător	86

3.17	Fluxurile masice asociate refierbătorului HL-acumulare de lichid; V-fluxul de vapori către coloană; L_B -fluxul de lichid de la baza coloanei; B-fluxul de ieșire din refierbător; x_B -concentrația propenei lichid; y_B -concentrația propenei vapori	87
3.18	Fluxul informațional asociat refierbătorului	89
3.19	Schema bloc a rutinei <i>reboiler</i>	90
3.20	Fluxurile de masă și energie asociate condensatorului total	90
3.21	Fluxul informațional asociat condensatorului total și vasului de reflux	91
3.22	Schema bloc a rutinei <i>temp</i>	91
3.23	Schema bloc a rutinei <i>ro_r290_r1270</i>	92
3.24	Schema principială a unui robinet de reglare	93
3.25	Tipuri de caracteristici intrinseci: 1-deschidere rapidă; 2-liniară; 3-de procentaj egal; 4-logaritmică	94
3.26	Mărimi de intrare și de ieșire pentru un robinet de reglare	95
3.27	Schema bloc a rutinei <i>valve</i>	96
3.28	Schema bloc a rutinei <i>contr3</i>	97
3.29	Fluxurile informaționale ale simulatorului dinamic	100
3.30	Concentrația x_D la modificarea debitului F cu +5%	101
3.31	Concentrația x_B la modificarea debitului F cu +5%	102
3.32	Concentrația x_D la modificarea debitului F cu -5%	102
3.33	Concentrația x_B la modificarea debitului F cu -5%	103
3.34	Concentrația x_D la modificarea debitului F cu +10%	103
3.35	Concentrația x_B la modificarea debitului F cu +10%	104
3.36	Concentrația x_D la modificarea debitului F cu -10%	104
3.37	Concentrația x_B la modificarea debitului F cu -10%	105
3.38	Concentrația x_D la modificarea concentrației x_F cu +5%	106
3.39	Concentrația x_B la modificarea concentrației x_F cu +5%	106
3.40	Concentrația x_D la modificarea concentrației x_F cu -5%	107
3.41	Concentrația x_B la modificarea concentrației x_F cu -5%	107
3.42	Concentrația x_D la modificarea concentrației x_F cu +10%	108
3.43	Concentrația x_B la modificarea concentrației x_F cu +10%	108
3.44	Concentrația x_D la modificarea concentrației x_F cu -10%	109
3.45	Concentrația x_B la modificarea concentrației x_F cu -10%	109
4.1	Codificarea unui cromozom pentru determinarea modelului NARMAX	115
4.2	Reprezentarea intrărilor/ieșirilor actuale și identificate	116
4.3	Selecția după rang pentru modelul NARMAX	117
4.4	Selecția <i>tournament</i> pentru modelul NARMAX	117
4.5	Încrucișarea continuă pentru termenii modelului NARMAX	118
4.6	Încrucișarea discretă pentru termenii modelului NARMAX	119
4.7	Mutația aplicată pentru modelul NARMAX	120
4.8	Mărimile principale asociate structurii L-B	121
4.9	Ieșirea x_D a procesului pentru o variație treaptă pe F de +5%	122
4.10	Ieșirea x_D a procesului pentru o variație treaptă pe F de +10%	123

4.11	Ieșirea x_D a procesului pentru o variație treaptă pe F de -5%	123
4.12	Ieșirea x_D a procesului pentru o variație treaptă pe F de -10%	124
4.13	Ieșirea x_D a procesului pentru o variație treaptă pe L de $+5\%$	125
4.14	Reprezentarea schematică a metodei de identificare a procesului de separare propan-propenă	125
4.15	Modelul NARMAX 300/200 și datele folosite la determinarea modelului NARMAX	128
4.16	Modelul NARMAX 400/300 și datele folosite la determinarea modelului NARMAX	128
4.17	Modelul NARMAX 600/500 și datele folosite la determinarea modelului NARMAX	129
4.18	Modelul NARMAX 864/864 și datele folosite la determinarea modelului NARMAX	130
4.19	Modelul NARMAX 600/500 și datele folosite la determinarea modelului NARMAX	131
4.20	Schema logică a algoritmului genetic pentru modele NARMAX	134
4.21	Schema procesului de determinare a modelului comenzii L	137
4.22	Schema sistemului de reglare avansată PID - NARMAX	137
4.23	Corelația grafică propusă de Gilliland și curba Eduljee	139
4.24	Codificarea unei funcții simple ca arbore	140
4.25	Codificarea soluției finale pentru corelația Gilliland	140
4.26	Reprezentarea grafică a valorilor X și Y pentru mai multe corelații	143
4.27	Concentrația componentului ușor x_D la o modificare treaptă a debitului de alimentare F cu $+10\%$	146
4.28	Concentrația componentului ușor x_B la o modificare treaptă a debitului de alimentare F cu $+10\%$	146
4.29	Concentrația componentului ușor x_D la o modificare treaptă a debitului de alimentare F cu -10%	147
4.30	Concentrația componentului ușor x_B la o modificare treaptă a debitului de alimentare F cu -10%	147
4.31	Concentrația componentului ușor x_D la o modificare treaptă a concentrației alimentării x_F cu -10%	148
4.32	Concentrația componentului ușor x_B la o modificare treaptă a concentrației alimentării x_F cu -10%	148

Lista tabelelor

1.1	Presiuni de vapori ale unor hidrocarburi	5
1.2	Valori medii ale parametrului α	6
1.3	Semnificațiile amplificărilor relative	21
3.1	Proprietăți fizico-chimice pentru propan și propenă	63
3.2	Alocarea comenzilor disponibile la necesitățile de reglare pentru structura L-B	66
3.3	Izotermele seturilor de date	69
3.4	Date experimentale izoterme pentru amestecul propan-propenă	70
3.5	Variante de variabile independente pentru amestecul C ₃ -C ₃ '	71
3.6	Corespondența dintre variabilele fictive și cele efective la apelarea rutinei <i>intlagr</i> în rutina <i>equil_data</i>	73
3.8	Date interpolate și experimentale pentru temperatura de 313.15K	74
3.9	Indicatorii statistici MSE și MAPE pentru parametrii y_c și P_c	75
3.10	Date termodinamice experimentale pentru substanța propan	84
3.11	Date termodinamice experimentale pentru substanța propenă	84
3.12	Rutine folosite pentru calculul entalpiilor vapori și lichid	85
3.13	Proprietățile fluxurilor din matricea <i>strm</i>	99
3.14	Parametrii fluxurilor principale pentru un punct tipic de funcționare	99
3.15	Experimente efectuate asupra simulatorului cu semnale de tip treaptă asupra debitului F	101
3.16	Experimente efectuate asupra simulatorului cu semnale de tip treaptă asupra concentrației x_F	105
4.1	Regimul staționar pentru efectuarea testelor de identificare	121
4.2	Rezultatele aplicării de semnale treaptă pe intrările perturbatoare	122
4.3	Rezultatele aplicării de semnale treaptă pe intrările de comenzi ale procesului	124
4.4	Identificarea procesului de separare C ₃ -C ₃ ' pe canalul $F \rightarrow x_D, T_{es} = 150s$	127
4.5	Identificarea procesului de separare C ₃ -C ₃ ' pe canalul $x^F \rightarrow x_D, T_{es} = 150s$	130
4.6	Parametrii de acordare ai PID după metoda Ziegler-Nichols	135
4.7	Valori comparative pentru corelația Gilliland	141

Abstract

Research regarding the application of evolving algorithms to advanced process control of distillation processes

Author:

Ing. Marius OLTEANU

Doctoral advisor:

Prof.Dr.Ing. Nicolae PARASCHIV

Keywords: process control, distillation process, evolutionary algorithms, genetic programming, NARMAX models, identification

Artificial Intelligence techniques represent a relative new area of scientific research, encouraged by the powerful development of computer software and hardware in the last decades. Theoretical foundation of Artificial Intelligence (AI) is an active research domain where new theories and ideas are welcomed, practical applications of AI techniques increasing every year.

The guiding idea of this doctoral thesis is to investigate the possibilities of applying evolutionary techniques of Artificial Intelligence to advanced process control of chemical processes, mainly distillation processes. Being a new area of research, evolutionary techniques have generally a low impact upon the methods used by the researchers in the domain of process control.

The objectives of the thesis are:

- analysis of the existing conventional process control structures used in the chemical process control area from the point of view of applying evolutionary techniques
- development of a mathematical model for the distillation process of propane - propylene mixture in order to obtain a greater accuracy for the stationary and dynamic response of the process
- designing a simulator based on the proposed mathematical model, simulator which can offer many opportunities to investigate different aspects of this complex process, being also an open system

-
- identification of the process with the aid of NARMAX models, optimized by genetic algorithms
 - investigate the performance of a feedforward controller for the distillation column based on a model developed with the aid of genetic programming

Structure of the doctoral thesis:

Introduction - Describes the objectives of the thesis and also the opportunity of the theme in the present context

Chapter 1 - Presents the theoretical foundation of the distillation process, especially binary distillation, the conventional process control schemes applied to distillation columns and also a short insight into advanced control schemes

Chapter 2 - Presents the theoretical fundamentals of evolutionary techniques with regarding to the possibilities of applying them to advanced process control. Bibliographical study of industrial applications of evolutionary techniques in the area of process control: system identification, controller design etc

Chapter 3 - Author contributions to the characterization and modeling of the distillation process for the propane - propylene mixture and to the design of a computer simulator based on the mathematical model developed

Chapter 4 - Develop a method of identification for the distillation process based on non-linear NARMAX models using genetic algorithms, suggests an advanced control scheme based on a NARMAX model and validates a feedforward control scheme for propane - propylene distillation column based on a model developed with the aid of Genetic Programming

Chapter 5 - Final conclusions, synthesis of original contributions and future research directions

Contents

Content	iii
List of Figures	vi
List of Tables	x
Introduction	1
1 State of the art in process control of distillation processes	3
1.1 Fundamentals of distillation processes	4
1.1.1 Fundamentals of vapor-liquid equilibrium	6
1.1.2 Binary distillation column	13
1.2 Objectives of process control applied to distillation processes and available controls	16
1.2.1 Determining the degrees of freedom for a distillation column	23
1.3 Conventional control schemes for distillation columns	25
1.3.1 Controlling the concentration of light component x_D in distillate	25
1.3.2 Pressure control for distillation columns	28
1.4 Advanced process control structures	32
1.4.1 Feedforward control	32
1.4.2 Model based control	34
1.5 Chapter conclusions	36
2 Evolving algorithms characterization from the point of view of advanced process control	37
2.1 Algorithms based on the evolution paradigm	38
2.2 Fundamentals of genetic algorithms	40
2.2.1 Canonical genetic algorithm	40
2.2.2 Theoretical foundations - scheme hypothesis	41
2.3 Genetic algorithms encoding. Genetic operators	45
2.3.1 Genetic algorithms - selection	46
2.3.2 Genetic algorithms - crossover	50
2.3.3 Genetic algorithms - mutation	54
2.4 Applications of Genetic algorithms in process control	55

2.4.1	Off-line applications	56
2.4.2	On-line applications	58
2.5	Chapter conclusions	60
3	Contributions to the modeling and simulation of propane-propene separation process	61
3.1	Propane-propene process characterization	62
3.1.1	Propane-propene separation process technological characterization	62
3.1.2	Propane-propene separation process input-output characterization	64
3.2	Contributions to vapor-liquid equilibrium modeling	67
3.2.1	Interpolation method for two variables based on Lagrange interpolation	67
3.2.2	Implementation of the interpolation method	71
3.3	Mass and heat transfer modeling	76
3.4	Designing the process simulator	80
3.4.1	Modeling of a theoretical equilibrium stage	83
3.4.2	Reboiler modeling	84
3.4.3	Condenser and reflux drum modeling	89
3.4.4	Valve modeling	92
3.4.5	PID controllers modeling	96
3.5	Simulation results	98
3.6	Chapter conclusions	110
4	Contributions to advanced process control based on genetic algorithms	111
4.1	NARMAX models used in process identification	112
4.2	Designing a genetic algorithm for NARMAX models optimization	114
4.2.1	Encoding of solutions for a NARMAX model and genetic operators used	114
4.2.2	NARMAX model optimization using genetic algorithms	120
4.2.3	Implementation of a genetic algorithm for NARMAX models optimization	131
4.3	NARMAX and PID control structure	134
4.3.1	Tuning of the PID controller for light component concentration	135
4.3.2	NARMAX model optimization for NARMAX - PID controlling structure	136
4.4	Feedforward control scheme for propane-propene system	138
4.4.1	Gilliland correlation based on genetic programming	138
4.4.2	Fenske-Underwood-Gilliland control structure for propane-propene distillation column	143
4.5	Chapter conclusions	148
5	Final conclusions, synthesis of original contributions and future research	151
5.1	Final conclusions	151

5.2	Synthesis of original contributions	155
5.3	Future research directions	156
	List of published works	157
	Bibliography	160
	Appendix 1. Isothermal data for propane-propene mixture	167
	Appendix 2. Fortran routines 'intlagr' and 'equil_data'	170
	Appendix 3. Fortran routine 'equil_data_xT'	173
	Appendix 4. Fortran routines for process simulator	175
	Appendix 5. Fortran routines for numerical integration	185
	Appendix 6. Implementation of genetic algorithms for NARMAX models optimization	187