

ANDRIOAIA DRAGOȘ-ALEXANDRU

**Internetul Lucrurilor și Învățarea Automată
în Sistemele de Mentenanță Predictivă
ale Vehiculelor Aeriene fără Pilot**



EDITURA „ALMA MATER”
BACĂU, 2025

Referenți științifici

Prof. univ. dr. ing. George CULEA
Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău

Ș. I. dr. ing. Sorin Eugen POPA
Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
ANDRIOAIA, DRAGOȘ-ALEXANDRU

**Internetul lucrurilor și învățarea automată în sistemele de
mentenanță predictivă ale vehiculelor aeriene fără pilot /**

Andrioaia Dragoș-Alexandru. - Bacău : Alma Mater, 2025

Conține bibliografie

ISBN 978-606-527-732-8

004

62

Copyright © 2025, Editura „Alma Mater” Bacău

Toate drepturile asupra acestei ediții sunt rezervate editurii

Str. Spiru Haret, nr. 8, 600114, Bacău, România

Tel.: +40-234-542-411 int. 638

Tel./Fax: +40-234-545-753

<https://editura-almamater.ub.ro/>

E-mail: almamater@ub.ro

E-mail: edituraalmamater@gmail.com

Cuprins

Conținutul cărții	1
Structura cărții	3
1. Stadiul actual și perspectivele sistemelor de mentenanță predictivă	5
1.1. Paradigma „Industrializarea 4.0”	5
1.1.1. Introducere	5
1.1.2. Internetul lucrurilor	6
1.1.3. Sisteme cyber-fizice	7
1.1.4. Volume mari de date & Extragerea cunoștințelor din date	7
1.1.5. Cloud Computing	8
1.1.6. Internetul serviciilor	8
1.1.7. Mentenanța în contextul Industriei 4.0.....	9
1.2. Aspecte teoretice privind mentenanța.....	10
1.2.1. Mentenanță reactivă	11
1.2.2. Mentenanță proactivă	11
1.2.3. Companii ce oferă servicii de mentenanță predictivă	14
1.3. Elementele componente ale sistemelor de mentenanță predictivă ..	15
1.3.1. Modulul de achiziții date de la senzori.....	16
1.3.2. Modulul de preprocesare și stocare a datelor	16
1.3.3. Modulul de identificare defecte și predicție	17
1.3.4. Modulul de analiză a indicatorilor de performanță și optimizare a programului de întreținere	19
1.3.5. Modulul de implementare a programului de mentenanță.....	20
1.3.6. Preocupări ale cercetătorilor privind sistemele de mentenanță predictivă.....	21
1.4. Componenta dispozitivelor IoT ce permit transferul datelor de la senzori în cadrul sistemelor de mentenanță predictivă.....	23

1.4.1.	Arhitecturi ale sistemelor IoT ce pot fi utilizate în domeniul mentenanței predictive	23
1.4.1.1.	Arhitecturi clasice cu trei, patru și cinci niveluri	23
1.4.1.2.	Arhitectura bazată Edge Computing	25
1.4.1.3.	Arhitectura bazată Fog Computing	27
1.4.2.	Protocoale de rețea utilizate în IoT	29
1.4.2.1.	Standarde la nivel fizic/ nivelul legăturilor	30
1.4.2.2.	Nivelul de rețea	31
1.4.2.3.	Nivelul de transport	31
1.4.2.4.	Protocoale de comunicație la nivel de aplicație, utilizate în IoT	32
1.4.3.	Tehnici de achiziție a datelor	38
1.5.	Tehnici de preprocesare a datelor utilizate de sistemele de mentenanță predictivă	39
1.5.1.	Curățarea datelor	40
1.5.2.	Completarea valorilor lipsă	41
1.5.3.	Reducerea datelor	42
1.5.3.1.	Selecția caracteristicilor	42
1.5.3.2.	Discretizarea caracteristicilor	43
1.5.4.	Tratarea datelor dezechilibrate	45
1.5.4.1.	Supra-eșantionarea	45
1.5.4.2.	Sub-eșantionarea	47
1.5.4.3.	Eșantionarea mixtă	48
1.5.5.	Extragerea caracteristicilor	49
1.5.5.1.	Analiza în domeniul timpului	49
1.5.5.2.	Analiza în domeniul frecvenței	51
1.5.5.3.	Analiza în domeniul timp-frecvență	53
1.5.6.	Normalizarea datelor	55

1.5.7.	Etichetarea datelor	55
1.6.	Algoritmi de ML utilizați de sistemele de mentenanță predictivă	57
1.6.1.	Învățarea supravegheată	58
1.6.1.1.	Clasificarea	59
1.6.1.2.	Regresia.....	60
1.6.1.3.	Algoritmi utilizați de către sistemele de mentenanță predictivă pentru clasificare și regresie	60
1.6.1.4.	Algoritmi clasici de ML supravegheată	62
1.6.1.4.1.	Regresia liniară	62
1.6.1.4.2.	Regresia logistică	62
1.6.1.4.3.	Clasificatorul bayesian naiv	62
1.6.1.4.4.	Mașini cu vectori suport.....	63
1.6.1.4.5.	Arbori de decizie.....	64
1.6.1.4.6.	Algoritmul pădure aleatorie	64
1.6.1.4.7.	Algoritmul celor mai apropiați k vecini	65
1.6.1.5.	Învățare profundă (Deep Learning)	66
1.6.1.5.1.	Rețele neuronale convoluționale.....	66
1.6.1.5.2.	Rețele neuronale recurente.....	68
1.6.1.5.3.	Memoria pe termen lung și scurt	69
1.6.1.5.4.	Autoencoderul.....	71
1.6.1.6.	Rețelele Neuronale Artificiale	72
1.6.1.6.1.	Rețele multistrat de perceptroni	72
1.6.1.7.	Metodele ansamblului	74
1.6.1.7.1.	Bagging.....	74
1.6.1.7.2.	Boosting	74
1.6.2.	Învățare nesupravegheată	75
1.6.3.	Învățare semi-supravegheată	75

1.6.4.	Strategii de validare și evaluare	75
1.6.4.1.	Evaluarea performanțelor clasificatoarelor	76
1.6.4.2.	Evaluarea performanțelor algoritmilor de regresie	78
1.6.5.	Parametrii ce rezultă în urma unui sistem de mentenanță predictivă.....	79
1.7.	Concluzii.....	80
1.8.	Stabilirea direcțiilor de cercetare	81
2.	Cercetări privind realizarea unui sistem de mentenanță predictivă pentru UAV-uri	83
2.1.	Proiectarea și realizarea standurilor experimentale utilizate pentru extragerea datelor de antrenare ale modelelor de ML	83
2.1.1.	Standul experimental utilizat pentru extragerea caracteristicilor de degradare a acumulatorilor de Li-ion	84
2.1.2.	Standul experimental utilizat pentru extragerea caracteristicilor defectelor motoarelor BLDC din cadrul UAV-urilor	87
2.2.	Analiza comparativă a performanțelor algoritmilor de tratare a valorilor anormale, ce pot fi utilizați în cadrul sistemelor de mentenanță predictivă pentru, predicția RUL al acumulatorilor de Li-ion și identificarea tipului de defect a motoarelor BLDC pentru UAV-urilor propulsate electric.....	92
2.2.1.	Introducere	92
2.2.1.1.	Cercetări din literatura de specialitate.....	93
2.2.2.	Analiza comparativă a algoritmilor utilizați în detecția valorilor anormale.....	95
2.2.2.1.	Utilizarea algoritmului IForest în detecția valorilor anormale	96
2.2.2.2.	Identificarea valorilor anormale utilizând AE	97
2.2.2.3.	Utilizarea KNN pentru identificarea valorilor anormale ..	99
2.2.2.4.	Evaluarea performanțelor clasificatorilor utilizați pentru identificarea valorilor anormale	100

2.2.3.	Date experimentale, rezultate și discuții	101
2.2.4.	Concluzii	105
2.3.	Analiza comparativă a performanțelor algoritmilor de tratare a valorilor lipsă ce pot fi utilizați în cadrul sistemelor de mentenanță predictivă pentru, predicția RUL al acumulatorilor de Li-ion și identificarea tipului de defect a motoarelor BLDC din cadrul UAV-urilor propulsate electric.....	106
2.3.1.	Introducere	106
2.3.1.1.	Cercetări din literatura de specialitate.....	108
2.3.2.	Analiza comparativă a algoritmilor utilizați pentru completarea valorilor lipsă	109
2.3.2.1.	Utilizarea interpolării în completarea valorilor lipsă	110
2.3.2.2.	Completarea valorilor lipsă utilizând valoarea medie	111
2.3.2.3.	Utilizarea algoritmului KNN în completarea valorilor lipsă 111	
2.3.2.4.	Completarea valorilor lipsă utilizând algoritmul RF	112
2.3.2.5.	Evaluarea performanțelor algoritmilor de completare a valorilor lipsă.....	113
2.3.3.	Date experimentale, rezultate și discuții	114
2.3.4.	Concluzii	119
2.4.	Predicția RUL al acumulatorilor de Li-ion din cadrul UAV-urilor propulsate electric utilizând tehnicile de ML	120
2.4.1.	Introducere	120
2.4.1.1.	Cercetări din literatura de specialitate.....	122
2.4.2.	Metodologia de predicție a RUL utilizând ML	124
2.4.2.1.	Predicția RUL al acumulatorilor de Li-ion utilizând SVMR 127	
2.4.2.2.	Utilizarea MLR în predicția RUL al acumulatorilor de Li-ion 128	
2.4.2.3.	Predicția RUL al acumulatorilor de Li-ion utilizând RF	129

2.4.2.4.	Evaluarea performanțelor algoritmilor de regresie	130
2.4.3.	Setup experimental.....	131
2.4.4.	Rezultate și discuții	134
2.4.5.	Concluzii	135
2.5.	Identificarea tipului de defect a motoarelor BLDC din cadrul UAV-urilor, utilizând tehnicile de ML.....	136
2.5.1.	Introducere	136
2.5.1.1.	Cercetări din literatura de specialitate.....	138
2.5.2.	Metodologia de identificare a tipului de defect a motoarelor BLDC	140
2.5.2.1.	Utilizarea KNN pentru clasificarea tipului de defect.....	144
2.5.2.2.	Clasificarea tipului de defect utilizând SVM.....	145
2.5.2.3.	Utilizarea algoritmului BN pentru clasificarea tipului de defect	146
2.5.2.4.	Analiza performanțelor clasificatorilor.....	147
2.5.3.	Setup experimental.....	148
2.5.4.	Rezultate și discuții	153
2.5.5.	Concluzii	154
3.	Realizarea unui sistem de mentenanță predictivă pentru UAV-uri folosind Fog Computing.....	156
3.1.	Introducere.....	156
3.2.	Realizări prezentate în cadrul lucrărilor de specialitate.....	158
3.3.	Conceperea și realizarea practică a unui sistem de mentenanță predictivă pentru UAV-uri.....	160
3.3.1.	Schemele bloc și standul experimental	163
3.3.2.	Nivelul dispozitivelor și nivelul fog.....	169
3.3.3.	Nivelul cloud	174
3.4.	Rezultate și discuții.....	183
3.5.	Concluzii.....	184

4. Concluzii.....	186
Bibliografie.....	189